Naturalistische Anthropologie und moderne Physik – eine Kritik szientistischer und reduktionistischer Menschenbilder

Iaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
des Fachbereichs I – Philosophie, Pädagogik, Psychologie
der Universität Trier

vorgelegt von:
Gerhard Jäckels, Februar 2007

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung……. 1

2. Licht in der klassischen Physik…… 12
2.1 Frühe Vorstellungen, Korpuskular- und Wellenmodell des Lichts ……..... 12
2.2 Die elektrodynamische Theorie des Lichts…….. 19

3. Das Licht der Quantentheorie…….. 33
3.1 Max Planck und die Entdeckung des Wirkungsquantums……... 34
3.2 Albert Einstein und die Lichtquantenhypothese…….. 44
3.2.1 Lichtquanten als thermodynamische Konsequenz……... 46
3.2.2 Lichtquantenhypothese und Spezielle Relativitätstheorie…… 49
3.3 Experimentelle Befunde und die Lichtquantenhypothese……... 57
3.3.1 Die Entdeckung des Elektrons und der fotoelektrische Effekt…….....… 61
4. Der Abschied von Bildern……... 71
4.1 Modelle des Atoms…….. 77
4.1.1 Das Atommodell von Ernest Rutherford……. 77
4.1.2 Das Atommodell von Niels Bohr……..... 81
4.2 Taylors Interferenzversuche……..... 87
4.3 Werner Heisenberg und die Matrizenmechanik……..... 89
4.4 De Broglie, Schrödinger und die Wellenmechanik……..... 93

5. Die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik……... 98
5.1 Werner Heisenberg und die Unbestimmtheitsrelation…… 98
5.2 Niels Bohr und der Komplementaritätsgedanke…….. 106
5.3. Das Quantenpostulat und
die statistische Interpretation der Quantenmechanik……... 113
5.4 Exkurs: Konkretes Beispiel der Unschärfe von Ort und Impuls…….. 122

6. Probleme der Interpretation……. 127
6.1 Die Bohr-Einstein-Debatte und die Entdeckung der Nichtlokalität ……... 127
6.2 Das Einstein-Podolsky-Rosen (EPR-) Paradoxon……... 136
6.2.1 Das Bellsche Theorem……. 151
6.2.2 Klassische und quantenmechanische Polarisation……... 153
6.2.3 Die optische Version des EPR-Experiments…… 158
6.2.4 Eine Variante der Bellschen Ungleichung……... 161
6.2.5 Die Verletzung der Bellschen Ungleichung im Experiment……... 166
6.2.6 Starke Korrelationen und die Frage nach der physikalischen Realität…… 170

7. Reduktionismus und die Grenzen…… 176
7.1 Reduktionismus und Quantenmechanik…….. 192
7.2 Determinismus, Indeterminismus und das Problem des freien Willens….. 207
7.3 Supervenienzthese und Indeterminismus im neuronalen System…… 216
7.3.1 Das „quantenmechanische“ Gehirn - Freiheit durch Zufall?..... 219
7.3.2 Holistische Hirnzustände: Neurophysiologische Befunde……..…… 222
7.4. Bewusste Wirklichkeit und die Wirklichkeit des Bewusstseins……. 226

8. Literaturverzeichnis……. 235

1. Einleitung

Sollte man versuchen, den Zustand und das Selbstverständnis der gegenwärtigen Zeit zu charakterisieren, so käme man nicht umhin zuzugestehen, dass unsere gesamte Existenz als moderne Menschen in kaum vollständig zu durchschauender Weise durchsetzt ist von naturwissenschaftlicher Forschung und deren technischen Folgeprodukten. Wir befinden uns inmitten einer atemberaubenden Dynamik des Fortschritts, die am eindrucksvollsten in den Bereichen der Informations- und Kommunikationselektronik sowie denjenigen Disziplinen zu beobachten ist, die man unter dem modischen Oberbegriff *life science* zusammenfassen kann – im weitesten Sinne Abkömmlinge der klassischen Biologie und Humanmedizin. Nicht selten kursieren auf diese Entwicklung bezug nehmend in der Metaphorik des öffentlichen Diskurses Begriffe wie „Revolution“ oder „Wissensexplosion“, oftmals verbunden mit dem eindringlichen Appell an die persönliche Flexibilität und Leistungsbereitschaft des Einzelnen, sich ständig von Neuem der Herausforderung eines lebenslangen Lernens zu stellen. In größerem Maßstab sind naturwissenschaftliche Forschung und Wirtschaft in einer Weise verzahnt, die über den ökonomischen Erfolg bzw. Misserfolg sowie den Lebensstandard ganzer Völker entscheidet und die Politik, die sich ihrerseits am wirtschaftlichen Wohlergehen des Staates messen lassen muss, unterstützt nach Kräften Forschung und Technik in ihrer Funktion als Quelle ständiger Innovationen.

Die empirischen Wissenschaften verfügen gemäß dieser Schlüsselposition in Staat und Gesellschaft über höchstes Ansehen und entsprechende Einflussmöglichkeiten, denn sie beanspruchen für ihre Erkenntnisse idealerweise Unabhängigkeit und Objektivität. Es ist dieses Ansehen, das ihnen in Marketing und Werbung den Nimbus einer vertrauenswürdigen Instanz verleiht. Produkte verkaufen sich besser, wenn sie „klinisch getestet“, „wissenschaftlich geprüft“ oder aufgrund „neuester Erkenntnisse entwickelt“ wurden, denn eines hat die Naturwissenschaft unbestreitbar und immer wieder gezeigt: Sie funktioniert, und ihre Erfolge sind reproduzierbar. Empirisch-induktiv generierte Einsichten bewähren sich wiederum innerhalb der empirisch zugänglichen Konstellationen der Natur und diese Bewährung ist „objektiv“ insofern sie intersubjektiv ist, d.h. sie abstrahiert von der

Perspektive des jeweiligen Einzelmenschen und entwirft das Ideal einer subjekt-unabhängigen und mittels mathematischer Methoden erschöpfend bestimmbaren Realität.

Wirft man nun einen Blick in die historische Entfaltung der neuzeitlichen Naturforschung, so wird andererseits deutlich, dass den offensichtlichen Erfolgen im Verständnis der Naturkräfte und der damit verbundenen Instrumentalisierung dieses Wissens im Sinne einer Verbesserung der Lebensumstände des Menschen ein schmerzlicher Verlust gegenübersteht, der als diffuses aber omnipräsentes Hintergrundrauschen die jüngere abendländische Kultur durchzieht und nur in bestimmten Phasen der geschichtlichen Entwicklung den Weg in das Bewusstsein einer breiteren Öffentlichkeit findet.

Ausgehend von den Arbeiten und Entdeckungen so herausragender Persönlichkeiten wie Johannes Kepler, Galileo Galilei oder René Descartes kommt es im frühen 17. Jahrhundert zu einem folgenreichen Aufstieg bestimmter ontologischer und methodologischer Forschungsprinzipien, unter deren Regiment sich schließlich die Kontouren eines Weltbildes abzeichnen, in dem die ursprünglich nicht vom Begriff der Wirklichkeit zu trennende Art ihres bewussten Gegebenseins nach und nach aus dieser abgespalten, relativiert und damit letztlich entwertet werden wird. Es entsteht hier die Vision eines der Vorstellungswelt des antiken Atomismus verwandten Systems, in dem die gesetzmäßige Bewegung von Materie im leeren Raum demjenigen, der in der Lage ist, diese Gesetze zu erkennen, die Möglichkeit eines umfassenden Verständnisses des Kosmos eröffnet. Das Universum wird gleichsam in die Form eines gewaltigen raumzeitlichen Mechanismus verwandelt, und gerät damit zur Gänze in den Einzugsbereich menschlicher Rationalität.

Vor diesem Hintergrund erwächst das Bedürfnis, nun nicht mehr die flüchtigen und wechselhaften Erscheinungen der Dinge, so wie diese sich als Phänomene im Bewusstsein präsentieren, sondern vielmehr die körperliche Realität selbst zu erfassen, so wie sie jetzt unabhängig vom jeweiligen Gegebensein, d.h. gewissermaßen „an und für sich“ existierend gedacht werden kann. Es ist diese Objektivierungsleistung, die schließlich den Boden bereitet für die prinzipielle und vollständige Trennung von Erkenntnissubjekt und den der Erfahrung zugrundeliegenden physikalischen Vorgängen. Die Natur kann von nun an so behandelt werden als sei „niemand“ da, der sie wahrnimmt und als spiele die Existenz bewusster Repräsentationen schlechterdings keine Rolle. Die uns so vertrauten phänomenalen Eindrücke von Farben, Tönen, Gerüchen etc. geraten zur illusionären

Konstruktion eines sich zunehmend selbst unerklärlicher werdenden Subjekts. Sie werden bestimmten Bewegungen und Anordnungen materieller Körper, d.h. den einzigen jetzt *wirklich* und *objektiv* existierenden Komponenten des Kosmos, nachträglich zugeordnet, ohne dort einen ausgezeichneten Platz beanspruchen zu können, d.h. genau genommen, ohne in selbigem überhaupt „vorhanden“ zu sein.

Mit dieser Ausklammerung des Bewusstseins und seiner Leistungen aus der objektiv vorfindlichen Natur ist aber nicht nur die Idee verbunden, dass Farben und andere Eindrücke dort eigentlich nicht angetroffen werden können. Vielmehr werden schlechterdings *alle* über die Angabe rein mechanischer Parameter hinausgehenden Zuschreibungen aus der Welt verbannt, d.h. die gesamte bewusste Repräsentation derselben, welche immer schon unter den Kategorien von Bedeutung, Zweck, Moral usw., kurzum als unvermeidlich sinnerfüllt erfahren wird. Es ist letztlich die Natur selbst, die sich hier in essentieller Weise transformiert, indem die ihr innewohnende Bedeutsamkeit als externe Zuschreibung und Erzeugnis des Subjekts enttarnt und damit hinsichtlich des ursprünglichen Stellenwertes neutralisiert wird. Die vorgefundenen Qualitäten sind nicht mehr in der Welt, sondern im interpretierenden Geist des wahrnehmenden Menschen – sie sind nun reine Projektionen, und eine wissenschaftlich brauchbare Darstellung der Verhältnisse muss vernünftigerweise von ihnen absehen.

Damit war für die aufstrebende Naturforschung eine komfortable Position erreicht: Ihr Gegenstand war jetzt restlos objektivierbar und einer rationalen Analyse zugänglich. Was nicht in der geometrisch-mathematischen Sprache der Mechanik ausgedrückt werden konnte, wurde dem Bereich der autonomen Subjektivität zugesprochen, welche infolge des aus der christlichen Dogmatik entlehnten Seelenbegriffs als ontologisch gesichertes Territorium gelten konnte. Es waren gerade diese seelischen Kräfte, die den Menschen zu einer eigenverantwortlichen Person werden ließen und damit sein Innerstes jedweder irdischen Verfügungsgewalt entzogen.

Obwohl pragmatisch orientierte Wissenschaftler die Prinzipien der so ermöglichten Subjekt-Objekt-Trennung bereitwillig verinnerlichten, erwuchs spätestens aus den Erfordernissen der humanmedizinischen bzw. physiologischen Forschung die Notwendigkeit einer grundsätzlichen Klärung des Verhältnisses von Körper und Seele. Niemand konnte und wollte noch daran zweifeln, dass der menschliche Körper einem komplexen und von Kausalität regierten Mechanismus gleicht, aber ähnlich offensichtlich

erschien der Sachverhalt, dass die ihrerseits nicht mechanisierbare Seele sich mit diesem in ständiger Wechselwirkung befindet, ohne dass vorstellbar gewesen wäre, wo und wie dies vonstatten geht.

Die philosophische Klärung der Begriffe von Körper und Geist bzw. Seele, so wie sie im 17. Jahrhundert von René Descartes vorgenommen wurde, konnte letztlich nichts zur Erhellung dieser ernsten Schwierigkeit beitragen; sie reichte vielmehr dazu hin, das eigentliche Problem noch weiter zu verschärfen. Descartes´ Projekt, eine dualistische Ontologie zu entwerfen, die einerseits die verlässliche Basis der exakten und unter dem Anspruch der Objektivität stehenden Naturwissenschaft liefern und andererseits der unhintergehbaren Vorgängigkeit seelischer Empfindungen und Willensakte gerecht werden sollte, präsentierte gerade an der empfindlichsten Stelle des Systems, dem Bereich der Interaktion körperlicher und geistiger Prinzipien, eine unübersehbare Schwachstelle. Verbunden mit der radikalen Abtrennung und Isolierung der geistig-seelischen Substanz, der *res cogitans*, aus einer Welt der ausgedehnten Körper, bereitete der Cartesianismus unbeabsichtigterweise den Boden für den Niedergang der Seele. Sie wurde in der Folge für die empirische Naturforschung zu einer substanzlosen Chimäre – verkam zu einem ominösen „Gespenst in der Maschine“[1], welches unter den Objekten eines korpuskularen und kausal abgeschlossenen Universums schlechterdings unauffindbar war, d.h. eigentlich gar nicht existierte.

Mit diesem Schritt in Richtung einer konsequent reduktionistischen Anthropologie ist nun für die Thematik des menschlichen Bewusstseins und seiner Sinn- und Bedeutungskonstitutionen eine Stufe erreicht, die an Invasivität kaum zu überbieten ist: Wenn die Produktion von bewussten Sinnhaftigkeiten jetzt nicht mehr ist als ein materieller und deterministischer Hirnprozess, das Erzeugnis eines neutralen und quasi geistlosen Automatismus, dann wird nicht nur behauptet, dass sich unsere Bedeutungszuweisung auf Gegenstände der äußeren Welt bezieht, denen eine solche eigentlich nicht zukommt, d.h. nicht mehr ist als reine Projektion, sondern vielmehr, dass das bewusste Sinnphänomen paradoxerweise selbst sinnlos ist. Die radikale und kompromisslose Übernahme der Vorstellung, dass der Kosmos ausschließlich eine Anhäufung materieller Atome sei, dass alle diese Elemente in gesetzmäßiger Weise kausal interagierten und wir Menschen als empirisches Naturphänomen schließlich nicht mehr sein könnten als eine

[1] Diese bekannte Metapher stammt von Gilbert Ryle. Vgl. z.B. Ryle (1969), S. 13.

echte Teilmenge dieser Materie, diese Vorstellung lässt keinen anderen Ausweg zu als eine neutralisierende Auflösung unserer Selbst als vermeintlich seelischer Wesen.

Mit der Erforschung der Strukturen des Nervensystems und der Entdeckung elektro-physiologischer Steuerungsmechanismen hatte die Naturwissenschaft gegen Ende des 19. Jahrhunderts zum letzten und gleichsam vernichtenden Angriff auf das traditionelle Selbstverständnis des Menschen geblasen. Und sie traf auf einen hinreichend angeschlagenen Gegner, der bereits unzählige wissenschaftliche Hiobsbotschaften hatte über sich ergehen lassen müssen – popularisierte empirische Erkenntnisse, die vor dem Hintergrund des überlieferten metaphysischen bzw. religiösen Weltbildes, jede für sich wie eine Demütigung wirken mussten.

Konnte sich die Menschheit gemäß der aristotelisch-ptolemäischen Kosmologie und der christlichen Theologie des Mittelalters noch im Zentrum der Schöpfung verorten, so ist die Vertreibung aus dieser ausgezeichneten geometrischen Position bereits ein erster Schritt der Bloßstellung und Korrektur „anthropozentrischer Selbstüberschätzung“. Mit jeder Etappe der weiteren Erschließung des Alls verlagerte sich dann unser räumlicher Standpunkt, ausgehend von der ursprünglichen Zentralstellung, in die Peripherie einer Galaxis, die den Schätzungen nach mehr als 300 Milliarden leuchtende Sterne enthält und unter denen die hiesige Sonne, lokalisiert in einem Seitenarm der Struktur, allenfalls ein mittelmäßiges Exemplar ihrer Gattung darstellt. Und diese bereits unvorstellbar große Anhäufung von sonnenähnlichen Sternen, die am irdischen Abendhimmel als leuchtendes Band der Milchstraße in Erscheinung tritt, ist, wie sich schließlich herausstellen sollte, ihrerseits nur ein Spiralnebel unter vermutlich über 100 Milliarden (!) anderen, viele zum Teil erheblich größer als die „Heimatgalaxis“. In quantitativer Hinsicht verliert sich in Anbetracht dieser gigantischen Ausmaße des Weltalls die Spur des Menschen und „seiner“ Erde in der geometrischen Bedeutungslosigkeit.

Mit der räumlichen Neubestimmung sollte die zeitliche einhergehen, wiederum im Sinne der Auflösung eines ursprünglich kontrollier- und überschaubaren kosmischen Parameters zugunsten der beunruhigenden Tiefe des Grenzenlosen, in dem sich die eigene Position nicht mehr in Relation zum Ganzen artikulieren lässt. Das vermeintliche Alter der göttlichen Schöpfung, noch im 17. Jahrhundert aufgrund biblischer Überlieferungen auf höchstens 6000 Jahre geschätzt, konnte keiner naturwissenschaftlichen Überprüfung standhalten. Frühe geologische Überlegungen und die systematische Erforschung fossiler

Lebensformen gaben nach und nach den Blick frei auf einen Abgrund der Jahrmillionen, eine Tiefendimension, vor der sich die Lebensspanne eines einzelnen Menschen, ja die der ganzen Menschheit als nicht viel mehr erweist als ein Wimpernschlag der Geschichte. Der noch jungen Paläontologie entstammte schließlich die Idee einer kontinuierlichen Entwicklung der Arten und die zur Mitte des 19. Jahrhunderts vorgestellte Evolutionstheorie Darwins bot in Gestalt des Mechanismus von zufälliger Mutation und permanenter Selektion durch die Umweltbedingungen, des „survival of the fittest“, eine teleologiefreie Deutung der Phylogenese des Lebens. Die Eingliederung der menschlichen Spezies *Homo sapiens* – als nur eine unter unermesslich vielen – in das System der belebten Natur ist eine fast unvermeidliche, und dennoch tiefgreifende Konsequenz: Wir wurden nicht erschaffen, sondern sind geworden, und dieses Gewordensein ist nichts als die Kontingenz des „blinden“ Prozesses von Mutation und Selektion – ohne tieferen Sinn und ohne innewohnende Zielrichtung.

Das 19. Jahrhundert endete mit einem Siegeszug der exakten Naturwissenschaften, der in der Geschichte der Menschheit ohne Beispiel ist und hinterließ dennoch im Bewusstsein vieler Zeitgenossen das Gefühl einer tiefen, die gesamte europäische Kultur durchziehenden Krise. Der ungeheure Erkenntnisgewinn auf Seiten der empirischen Forschung hatte einen hohen Preis: Er wurde bezahlt mit einer bodenlosen Relativierung unserer selbst und der Entlarvung aller externen und internen Sinn- und Zwecksetzungen als einer riesigen Ansammlung von anmaßenden Illusionen. Die Disziplinen der erfahrungsorientierten Wissenschaft traten das Erbe der Aufklärung an, die Menschheit aus der Unmündigkeit irrationalen Aberglaubens und fehlgeleiteter Metaphysik zu befreien, doch dieser Akt entließ die derart Aufgeklärten ohne Beistand in das emotionale Vakuum einer positivistisch säkularisierten Welt.

Die zum Teil sehr polemisch ausgetragenen Auseinandersetzungen um die anthropologischen Zumutungen des materialistischen Monismus hatten in Deutschland gegen Ende des 19. Jahrhunderts ihren Höhepunkt erreicht, und der Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit verschob sich nun zunehmend in Richtung der unübersehbar gewordenen gesellschaftlichen und politischen Problemfelder. Die gleichsam verdrängte Spannung zwischen den Erkenntnissen der objektiven Naturforschung und unserem ursprünglichen, subjektiven Welt- und Selbstbild brach sich jedoch immer wieder Bahn durch die vermeintlich unbedenkliche Praxis des pragmatischen Umgangs mit Wissenschaft und

Technik. Der Naturalismus war bislang trotz seiner argumentativen Überlegenheit stets hinter dem eigenen Anspruch einer restlosen reduktionistischen Auflösung des Menschen und des Leib-Seele-Problems zurückgeblieben, und jeder Fortschritt in der empirischen Forschung sollte jetzt dazu beitragen, diese Erklärungslücke endlich zu schließen. So verwundert es nicht, dass im 20. Jahrhundert bei Gelegenheit diverser technologischer und biowissenschaftlicher Errungenschaften die vorübergehend verebbte Debatte wieder neu entfacht wurde.

Die Entwicklung universeller programmgesteuerter Rechenmaschinen, welche imstande waren, immer größere und komplexere Algorithmen zu handhaben, beförderten Spekulationen bezüglich der möglichen Analogie bzw. Identität von regelgeleiteter Symbolmanipulation und den Aktivitäten des menschlichen Zentralnervensystems. Demnach sollte die behavioristische Psychologie durch eine funktionalistische Theorie des Geistes ergänzt und sämtliche Leistungen des menschlichen Gehirns als komplexe Datenverarbeitung verstanden werden. An die Seite des sogenannten „neuronalen Codes“ hatte sich bereits in den 50er Jahren der „genetische Code“ gesellt, dessen Funktion als Vermittler zwischen Geno- und Phänotyp schon seit längerem als unbestritten galt. Die Entschlüsselung der DNS-Struktur und des zugehörigen Transkriptionsmechanismus´ führte jedoch zu einem ungeahnten und bis heute anhaltenden Aufstieg der Molekulargenetik, mitsamt ihrer in der Regel deterministischen Theorie der Lebensvorgänge.

In jüngster Zeit kommen die Impulse und Hypothesen vor allem von Seiten der mit ihrem methodischen Instrumentarium erheblich fortgeschrittenen Neurophysiologie und werden in missionarischem Eifer mittels einer Unmenge populärwissenschaftlicher Publikationen der interessierten und gleichermaßen beeindruckten Öffentlichkeit zugänglich gemacht: „´Sie´, Ihre Freuden und Leiden“, so ist beispielsweise in einem dieser Werke zu lesen, „Ihre Erinnerungen, Ihre Ziele, Ihr Sinn für Ihre eigene Identität und Willensfreiheit – bei alledem handelt es sich in Wirklichkeit nur um das Verhalten einer riesigen Ansammlung von Nervenzellen und dazugehörigen Molekülen. Lewis Carrolls Alice aus dem Wunderland hätte es vielleicht so gesagt: ‚Sie sind nichts weiter als ein Haufen Neurone‘“[2]. – Ähnliche Behauptungen findet der wissbegierige Laie heutzutage keineswegs nur im „Wunderland“, sondern vielmehr allerorten: In den diversen Variationen des reduktionistischen Themas sind wir „nichts als Sternenstaub“, „nichts als eine erfolgreiche Verpackung unseres

[2] Crick (1997), S. 17

Genoms“, „nichts als das evolutionäre Produkt von blindem Zufall und natürlicher Selektion“, „nichts als ein programmgesteuerter Rechenautomat“, „nichts als ein gesellschaftliches Konstrukt“ und so fort – eine Unsitte, die der Biologe Julian Huxley einmal scherzhaft mit der Wortschöpfung „nothing-else-buttery“ betitelt haben soll.[3]

Auch wenn die Befindlichkeit der gegenwärtigen Zeit nicht mit dem Extremfall des *fin de siècle*, jener Depression des ausgehenden 19. Jahrhunderts zu vergleichen ist, kann man doch behaupten, dass heute der hohe Stellenwert naturwissenschaftlicher Forschung und das große Vertrauen, welches ihre Vertreter in der Öffentlichkeit genießen, dazu beiträgt, die von einigen vollmundig propagierten Thesen einer naturalistischen Anthropologie zum vermeintlich gesicherten Bestand des Allgemeinwissens werden zu lassen. Und es ist nicht vermessen zu vermuten, dass eine derart sinnentleerte Metaphysik, quasi subversiv, auch das Selbstbild und die Handlungen derer, die nicht aktiv an der Auseinandersetzung teilnehmen, in einen Zustand innerer Widersprüchlichkeit und Unruhe versetzt. Auf keinen Fall ist aber das spannungsgeladene Dilemma dann noch zu übersehen, wenn die Implikationen einer mechanistischen oder zumindest kausal vollständig determinierten Sicht des menschlichen Organismus tief in der Kultur verwurzelte und in dieser funktional sehr bedeutsame Prinzipien in Frage stellen, wie das im Falle der wiederholt zu vernehmenden Forderung nach einer Revision der Konzepte von Schuld und Verantwortung im Strafrecht zu beobachten ist.

Die Reklamation von Prioritäts- und Kompetenzansprüchen und die damit einhergehende Vereinnahmung anderer Disziplinen seitens der Naturforschung, ist ein häufig anzutreffender Zug der gegenwärtigen Erstarkung des Szientismus. Charismatische Naturwissenschaftler werden wie im Falle Albert Einsteins oder Stephen Hawkings zu „Heiligen der Moderne“ stilisiert, und entsprechend der Erwartungshaltung der jeweiligen „Fangemeinde“ präsentieren sich nun die letzten Rätsel der Menschheit als physikalische Fingerübungen: „This is also a book about God…“, schreibt Carl Sagan in seiner Einleitung zu Stephen Hawkings *Brief History of Time*, einem der meistgelesenen jüngeren Werke über Kosmologie, „or perhaps about the absence of God. The word God fills these pages. Hawking embarks on an quest to answer Einstein´s famous question about whether God had any choice in creating the universe”.[4]

Neuerdings könnte man sogar den Eindruck gewinnen, dass es weniger die Physiker,

[3] vgl. Lorenz (1983), S.197
[4] vgl. Hawking (1993), S. X.

sondern wiederum eher Neurophysiologen und Genetiker sind, die sich für derartige Fragen zuständig fühlen: „Wie Religion im Kopf entsteht“, und „Forscher suchen nach Genen des Glaubens“ sind die durchaus ernstgemeinten Titelthemen einer kürzlich erschienenen Ausgabe der vielrezipierten Zeitschrift *Bild der Wissenschaft*.[5]

Diese wenigen Beispiele stehen stellvertretend für eine ganze Serie von Veröffentlichungen und Forschungsvorhaben – man denke nur an die von US-Präsident George Bush zum 1. Januar 1990 proklamierte „decade of the brain“ oder das „Human Genome Project“ – und sie reichen aus, um die augenblickliche Zuspitzung der Situation vor Augen zu führen.

Im Rahmen dieser Arbeit soll nun der Versuch einer Reduktionismus- bzw. Naturalismuskritik unternommen werden, der von der traditionellen Stoßrichtung der Philosophie abweicht, ohne die dort bereits vorgebrachten Argumentationen infrage zu stellen. Diese sind in ihrem prinzipiellen Charakter eigentlich von größerer Allgemeinheit und Unabhängigkeit, scheinen aber gleichwohl im Kreise der Naturwissenschaft kaum zur Kenntnis, oder zumindest nicht in ausreichendem Maße ernst genommen zu werden.

In einer stark vereinfachten Darstellung lässt sich behaupten, dass ein Großteil jener philosophischen Thesen auf dasjenige zurückgreift, was man in etwas salopper Diktion den „idealistischen Grundbefund“ nennen könnte. Dabei handelt es sich um den generellen Verweis auf die unmöglich hintergehbare ontologische Vorgängigkeit des Erkenntnissubjektes oder allgemeiner, des erkennenden Bewusstseins, dessen phänomenale und wertende Weltkonstitution bei jedweder Erkenntnisleistung immer schon vorausgesetzt werden muss. Bezogen auf die empirische Naturwissenschaft bedeutet dies, dass die Erforschung vermeintlich objektiver Fakten immer und notwendig auf die Verfasstheit derjenigen Subjekte bzw. Menschen zurückverweist, deren Erkenntniswillen und -fähigkeit „wissenschaftliche“ Fragestellungen überhaupt erst ermöglicht. Ohne immer schon vorhandene Sinn- und Zwecksetzungen keine Forschung und ohne eine immer schon vorhandene phänomenale Repräsentation keine Gegenstände: Alles, was auch immer Anlass einer fragenden Einstellung sein mag, ist in erster Linie eine Erscheinung des Bewusstseins, und es erscheint nur hier, oder eben gar nicht. Die reduktionistische Verfahrensweise würde demnach dem Paradoxon begegnen, auf dasjenige, was „wegreduziert“ werden soll, zum Zwecke der Durchführung dieser Reduktion bereits

[5] Bild der Wissenschaft, Juli 2005, S. 28-45.

zurückgreifen zu müssen, und diese unvermeidliche Zirkularität, so das bekannte Argument, stellt die Durchführbarkeit des Projektes grundsätzlich in Frage.

Jenseits dieses traditionellen Ansatzes der Kritik eröffnet sich aber noch eine andere Möglichkeit, die zugegebenermaßen von geringerer Allgemeinheit, aber dennoch für den heutigen, naturwissenschaftlich „imprägnierten“ Adressaten von größerer Überzeugungskraft sein dürfte. In einer naturphilosophischen Analyse des Fortgangs der Physik im 20. Jahrhundert, insofern diese als Grundlagendisziplin das Fundament der Realität zu ergründen trachtet, bietet sich die Gelegenheit, den Reduktionismus gleichsam mit den eigenen Waffen zu schlagen, denn seine Methodik kann unter Verweis auf den tiefgreifenden Wandel innerhalb der Prinzipien des physikalischen Weltbildes bestenfalls noch als heuristisches Mittel, aber keinesfalls mehr im Sinne eines universell-explanativen Instrumentes verstanden werden. Die Darstellung jener revolutionären Umgestaltung soll anhand eines Phänomens unternommen werden, welches wie kein anderes die alltägliche Wahrnehmung der Welt dominiert und dennoch bis heute nichts von seiner faszinierenden Rätselhaftigkeit verloren hat: das Licht. Man kann mit Fug und Recht behaupten, dass an fast allen kritischen Punkten in der Entwicklung der modernen Physik, ihren Krisen, ihren Niederlagen aber auch ihren triumphalen Erfolgen, dem Licht eine Schlüsselrolle zukommt, sodass das Schicksal einer ganzen naturwissenschaftlichen Disziplin aufs Engste mit der Frage nach dem Wesen dieses Phänomens verbunden ist. Das Licht und seine Eigenschaften stehen im Zentrum der Elektrodynamik James Clerk Maxwells und der Speziellen Relativitätstheorie Albert Einsteins, die beide auf ihre jeweils eigene Weise zur Vollendung des Gebäudes der klassischen Mechanik beitrugen.[6] Gleichermaßen beginnt jedoch mit der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Temperatur eines materiellen Körpers und der Intensitäts- und Frequenzverteilung des von ihm emittierten Lichts die physikalische Moderne, die in Gestalt der Quantentheorie mit den grundlegenden Prinzipien der traditionellen Mechanik brechen wird.

Vor dem Hintergrund dieses Umbruchs soll schließlich die Frage erörtert werden, inwieweit die heute vertretenen Konzepte von Materie und Kausalität in der Lage sind, die vor allem den Reihen der Biowissenschaften entstammende naturalistisch-

[6] Auch wenn die Spezielle Relativitätstheorie insofern „unklassisch“ genannt werden kann, als sie die physikalischen Begriffe von Raum und Zeit in einer mit den Ansichten Newtons unverträglichen Weise modifiziert, so ist dennoch ihr Charakter, gemessen an den Umwälzungen, die die Quantenmechanik im frühen 20. Jahrhundert mit sich bringt, ein durchgängig klassischer: Die Begriffe von Kausalität, Determinismus und die Vorstellung von der kontinuierlichen Struktur (Stetigkeit) physikalischer Größen und Funktionen bleiben unangetastet.

reduktionistische Anthropologie zu stützen bzw. zu rechtfertigen. Dabei soll erwiesen werden, dass die gegenwärtige Hirnforschung und methodisch „artverwandte“ Fächer mit Begriffen und Realitätsvorstellungen operieren, die innerhalb der physikalischen Grundlagenforschung als überholt anzusehen sind. Sie verstoßen gegen die Regeln ihres eigenen Selbstverständnisses als exakte und objektiv-empirische Disziplinen, zumindest insofern sie sich, ähnlich wie die Atomphysik zu Beginn des 20. Jahrhunderts, in ein Gebiet vorwagen, in dem eine gründliche Analyse des Subjekt-Objekt-Verhältnisses zum theoretischen Verständnis des Gegenstandes hinzukommen muss, ja eigentlich gar nicht von selbigem zu trennen ist.

Die diesbezüglich entbrannte Kontroverse zwischen Neuro- und Geisteswissenschaftlern und die wechselseitige Reklamation der Zuständigkeit mag als Symptom dieser Sachlage interpretiert werden und gerade die bisweilen als akademischer Luxus angesehene Philosophie befindet sich hierbei in einem ihrer traditionellen Kompetenzbereiche.

2. Licht in der klassischen Physik

2.1 Frühe Vorstellungen, Korpuskular- und Wellenmodell des Lichts

Licht ist ein Phänomen, welches wie kaum ein anderes dazu geeignet ist, als Leitmotiv einer Untersuchung zu dienen, die darauf abzielt, jene Spannungen und Konflikte genauer in den Blick zu fassen, die unmittelbar aus dem Aufeinandertreffen der unterschiedlichen Einstellungen des Menschen zur Welt erwachsen und welche hier vor allem hinsichtlich des Gegensatzes zwischen der uns so vertrauten subjektiv-phänomenalen und der objektiv-naturwissenschaftlichen Betrachtungsweise thematisiert werden sollen.

Die systematische naturphilosophische Auseinandersetzung mit diesem Gegenstand, die einer häufig vertretenen Auffassung zufolge mit den Denkern der griechischen Antike beginnt, operiert zunächst noch im Spannungsfeld dreier Pole, die ontologische, erkenntnistheoretische und subjektiv-psychologische Aspekte des Lichts und seiner jeweiligen Wahrnehmung repräsentieren und die bei den einzelnen Autoren in unterschiedlicher Zusammenstellung und Gewichtung in die Analyse eingehen. Auf vermutlich rein spekulative Art werden bereits hier die Grundtypen möglicher Erklärungsansätze entwickelt, in denen auch die Wurzeln der beiden einflussreichsten Modelle der neuzeitlichen Erforschung des Lichts, das Korpuskular- und das Wellenbild, aufgefunden werden können.

Die prominenteste der antiken Theorien enthält eine Komponente, die für heutige Rezipienten fast schon ein wenig befremdlich klingt und welche den Vorgang der Wahrnehmung des Lichts bzw. den Prozess des Sehens äußerer Objekte durch eine aktive Betätigung der Augen zu erklären trachtet. Diese, so wird dabei behauptet, seien Ausgangspunkt und Urheber geradliniger Sehstrahlen[7], mittels deren die Welt durch mechanische Einwirkung, d.h. gewissermaßen „tastend“ erkundet werden kann. Bei Pythagoras von Samos (6. Jhdt.v.Chr.), der häufig als Begründer der Sehstrahl-Theorie genannt wird, findet sich die Idee feuriger Ausdünstungen des Auges, die den Widerstand, der ihnen durch das Vorhandensein kalter Gegenstände entgegengebracht wird, rückwärts zu gescihrem Ursprungsort transportieren und dort eine visuelle Wahrnehmung generieren.

---

[7] Nach Weinmann stammt dieser Begriff von Archytas von Tarent (ca. 430-345 v. Chr.)
Vgl. Weinmann(1980), S. 60.

Da auch sehr entfernt gelegene Dinge nach Öffnung der Augenlider quasi instantan gesehen werden können, muss die Geschwindigkeit dieser Ausflüsse als beliebig groß, oder sogar als unendlich angenommen werden.

Auch der griechische Mathematiker und Geometer Euklid von Alexandria (ca. 365-300 v.Chr.) gründete seine Überlegungen zur Optik auf den Gedanken des Sehstrahls. Die in der Praxis oftmals genutzte Möglichkeit, über das entlang zweier Punkte verlaufende „Anpeilen“ eines dritten eine Gerade zu konstruieren, schlägt sich hier in der axiomatisch festgelegten Geradlinigkeit der besagten Strahlen nieder und bestimmt sicherlich auch die Bestimmung der geometrischen Urgestalt einer (geraden) Linie, die in seiner berühmten Schrift *Elemente* als eine solche definiert wird, die zu den Punkten auf ihr gleichmäßig liegt.[8]

Die Verfechter dieser Theorie, zu denen neben Pythagoras und Euklid später auch der prominente Astronom Claudius Ptolemäus (ca. 100-160 n.Chr.) zu zählen ist, sahen sich allerdings mit dem Problem konfrontiert, die Rolle externer Lichtquellen, deren stärkste unsere Sonne ist, in die konsistente Erklärung des Sehvorgangs mit einzubeziehen, denn deren Anwesenheit ist neben der aktiven Erzeugung tastender Ausdünstungen seitens der Augen eine weitere Bedingung gelingender Wahrnehmung. Licht aussendende Körper müssen mittels ihrer Einwirkung auf selbst nicht leuchtende Gegenstände diese auf irgendeine Weise erst in die Lage versetzen, die Sehstrahlen der Augen festzuhalten, denn ihr Fehlen in der Dunkelheit der Nacht verhindert erfahrungsgemäß jedwedes Sehen. Andererseits kann die Fähigkeit mancher Tiere, auch in der Nacht zu sehen, auf eine besondere Verfasstheit bzw. Stärke ihrer Strahlen zurückgeführt werden, welche des äußeren Lichts offenbar gar nicht (Fledermäuse) oder nur in geringem Umfang bedürfen.

Die Theorie der Stoiker, wie sie beispielsweise bei L.A. Seneca (4 v.Chr. - 65 n.Chr.) vertreten wird, bezieht das zwischen Auge und Wahrnehmungsgegenstand gelegene Medium mit in die Deutung des Sehprozesses ein. Zum konkreten Vermittler wird nun die uns umgebende Luft, welche unter dem Einfluss äußeren Lichts dazu gebracht wird, einen vom Auge aktiv induzierten Spannungszustand mit unendlicher Geschwindigkeit in die Welt hinaus zu transportieren. Es ist hier kein materielles Prinzip,

---

8 Das hier noch gleichsam als harmlos und unverfänglich erscheinende Verhältnis zwischen empirisch erfahrbarem Raum und dessen geometrisch-idealisierter Beschreibung wird spätestens mit der Entdeckung nicht-euklidischer Geometrien im 19. Jahrhundert und deren Anwendung auf den physikalischen Raum in der Relativitätstheorie Einsteins zum Gegenstand ernstzunehmender Reflektion.

sondern nur die aktiv hervorgerufene, sich instantan fortpflanzende Zustandsveränderung eines ohnehin vorhandenen Mediums, welche gleichsam zum Sehstrahl und damit zum Vehikel der Information wird. Die gespannte Luft ist hier der „Taststock“ des Sehvermögens und nur die von äußerem Licht angeblich „verdünnte“ Luft ist imstande, diesen Zustand anzunehmen und mit unendlicher Geschwindigkeit zu übertragen. Teile jener Idee werden sich später in der Lichttheorie René Descartes´ wiederfinden.

Im Gegensatz zu den unterschiedlichen Variationen des Themas, die den Augen der Lebewesen eine aktive, d.h. eine auf die Umwelt einwirkende Rolle zugestehen, begegnet man bei den Anhängern des Atomismus der konsequenten Behauptung, das Licht selbst bestünde aus sehr feinen materiellen Partikeln, die vom Gesichtssinn lediglich in passiver Weise aufgenommen werden. Leuchtende und beleuchtete Dinge emittieren demnach unablässig feinste Licht-Atome, die es vermögen, Abbilder der Gegenstände durch den Raum zu tragen und qua mechanischer Erregung der Pupille mitzuteilen. Das Medium der Luft, die ja selbst aus winzigen Atomen besteht, wirkt in der Regel eher störend, so dass beispielsweise Demokrit von Abdera behauptet haben soll, man müsste ohne die Anwesenheit der Luft selbst eine am Himmelsgewölbe kriechende Ameise noch scharf erkennen können.[9]

Neben den soeben kurz vorgestellten Positionen, die lediglich Eckpunkte möglicher Erklärungen darstellen, existieren zahlreiche Mischformen, zu denen auch die Theorien der beiden großen Philosophen der Antike, Platon und Aristoteles, gezählt werden können. Sucht man hier wiederum nach Vorbildern der Modelle neuzeitlicher Naturforschung, so kommen die aristotelischen Überlegungen der im 17. Jahrhundert von Christian Huygens (1629-1695) entwickelten Idee der Ätherwellen relativ nahe.[10] In beiden Konzeptionen wird die Wirkung des Lichts mittels der Erregung eines Mediums übertragen und erfolgt ausschließlich vom Gegenstand hin zum Auge – nicht umgekehrt, wie es in der stoischen Lehre behauptet wird.

In der neuzeitlichen Diskussion um das Wesen des Lichts spielt die aktive Betätigung des jeweils Sehenden bzw. seiner Augen keine Rolle mehr. Sehen wird generell als passives Aufnehmen des von den äußeren Gegenständen reflektierten Lichts aufgefasst, wobei zwei

---

[9] Diese Ansicht wird Demokrit von Aristoteles zugesprochen und sogleich kritisiert. Vgl. Aristoteles: Über die Seele, Buch II, 7. 419a 15ff.

[10] Vgl. hierzu Aristoteles, Über die Seele, Buch II, Kap. 7.

grundlegende Erklärungsansätze unterschieden werden können, eine korpuskulare und eine wellentheoretische Deutung.

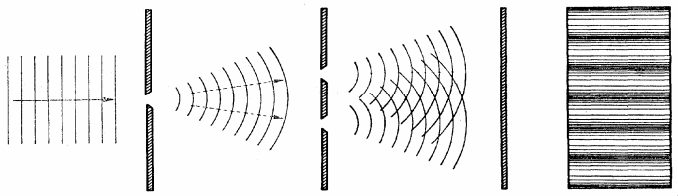
Der prominenteste moderne Physiker, der ähnlich der antiken Atomisten die Auffassung vertrat, Licht sei letztlich nichts als ein Strom kleiner Teilchen, war kein geringerer als Isaac Newton (1643-1727), unter dessen unangefochtener Autorität jenes Modell für fast ein Jahrhundert zum zentralen Paradigma der physikalischen Optik wurde. Newton hatte entdeckt und systematisch untersucht, dass sich weißes Sonnenlicht mittels eines Glasprismas in ein ganzes Spektrum unterschiedlicher Farben aufspalten lässt und dass eine solche Farbe unter Verwendung eines zweiten Prismas nicht um ein weiteres Mal zerlegt werden kann. Umgekehrt bringt eine additive Mischung bzw. Überlagerung all dieser Farben wiederum das ursprüngliche weiße Licht hervor.

Infolge dieser und anderer akribisch dokumentierter Versuchsreihen entwickelte Newton die Idee, dass zu jeder Farbe eine eigene Art von Korpuskeln gehören müsse, die ihre Identität auch in Farbmischungen bewahren und die sich geradlinig durch den Raum ausbreiten. Bezüglich anderer Phänomene, wie etwa den an dünnen Schichten (z.B. Öl auf Wasser) zu beobachtenden Farberscheinungen, postulierte er jedoch eine Wechselwirkung zwischen den Teilchen des Lichts und dem raumerfüllend gedachten universellen Äthermedium, so dass sich bereits in der Optik Newtons gewisse Zugeständnisse an eine mögliche Beteiligung von Wellen auffinden lassen. Generell wurde in jener korpuskularen Theorie jedoch versucht, die unterschiedlichsten Effekte wie z.B. Brechung und Reflexion auf kinematische und dynamische Eigenschaften der materiellen Lichtteilchen zurückzuführen, und in diesem Erklärungsmodell konnten bis zum Ende des 18. Jahrhunderts durchaus beachtliche Fortschritte erzielt werden.

Die These, beim Phänomen des Lichts könne es sich nicht um einen eigenständigen Strom materieller Korpuskeln, sondern eher um die sich rasch ausbreitende Störung in einem Trägermedium handeln, findet sich in der Neuzeit zuerst bei René Descartes. In seiner Theoie überträgt sich die Wirkung einer Lichtquelle über die vermittelnden Teilchen der raumerfüllenden Himmelsmaterie instantan, d.h. mit unendlicher Geschwindigkeit auf alle anderen Teile des Kosmos. Der holländische Mathematiker Chrisitan Huygens (1629-1695), der in jungen Jahren überzeugter Cartesianer war, sich jedoch später von den Prinzipien der Mechanik Descartes´ distanzierte, entwickelte die Idee, dass Licht aus einer Abfolge von unregelmäßigen Störungen des Äthermediums bestehe, die sich mit sehr

großer, aber endlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit bewegten. Sein wichtigstes Argument gegen eine Kospuskulartheorie war die empirische Tatsache, dass sich Lichtstrahlen ungehindert durchdringen und nicht miteinander kollidieren können. Trotz einiger theoretischer Vorteile jener frühen Wellentheorie, konnte diese sich nicht gegen die Vorherrschaft der Newtonschen Auffassung durchsetzen.

Erst infolge der berühmten Interferenz-Experimente des englischen Arztes und Physikers Thomas Young (1773-1829) setzte im frühen 19. Jahrhundert unter den Naturforschern ein langsamer Gesinnungswandel ein. Young hatte an einer verblüffend einfachen Apparatur beobachtet, dass entsprechend vorbereitetes Licht, welches auf zwei feine und sehr eng beieinander liegende Schlitze fällt, hinter diesen Öffnungen ein regelmäßiges Muster vieler heller und dunkler Streifen ausbildet, welches nur durch die Überlagerung zweier konzentrisch von diesen Spalten ausgehender Wellen erklärt werden kann. Konzentrische Wellenzüge, wie sie z.B. auf der Oberfläche eines Teiches entstehen, in welchen man in gewissem räumlichen Abstand voneinander zwei Steine geworfen hat, haben die Eigenschaft, sich ungehindert zu durchdringen. Im Bereich ihrer Begegnung entsteht dabei ein komplex anmutendes Muster, welches aber durch die einfache Regel konstruiert werden kann, dass sich die jeweiligen Wellenhöhen (die Amplituden der Welle) einfach addieren. Wo zwei Wellenberge aufeinander treffen, summieren sie sich zu einer Welle von doppelter Höhe (analoges gilt für die „Tiefe der Täler“), und an der Stelle, an welcher genau ein Wellenberg auf ein Wellental trifft, heben sich beide Auslenkungen gegenseitig auf, so dass die Wasseroberfläche an dieser Stelle in neutraler Position verharrt. Thomas Young prägte für dieses physikalische Überlagerungsphänomen den Begriff der „Interferenz“. Die beiden geschilderten Fälle der maximalen gegenseitigen Verstärkung zweier Wellen und der vollkommenen Auslöschung bezeichnet man heute als „konstruktive“ und „destruktive“ Interferenz, wobei zwischen diesen beiden Extremwerten natürlich alle möglichen Fälle einer teilweisen (konstruktiven) Überlagerung möglich sind. Die folgende Abbildung zeigt die Youngsche Entdeckung in schematischer Form:



– Abbildung nach Bohr (1958), S. 46 / leicht modifiziert –

Die Ideen Thomas Youngs konnten sich zunächst noch nicht gegen die gerade in England schier übermächtige Korpuskulartheorie Newtons durchsetzen, obwohl der skizzierte Doppelspalt-Versuch aus dem Jahr 1801 heute als das *experimentum crucis* der Wellentheorie gehandelt wird. Ein derartiges Interferenzmuster unter der Annahme einer korpuskularen Natur des Lichts zu erklären, scheint ohne die Annahme hoch-komplexer Wechselwirkungen zwischen diesen Teilchen gänzlich unmöglich zu sein, wohingegen es aus der Wellenvorstellung mit vollkommener Leichtigkeit deduziert werden kann. Young konnte sogar aus den geometrischen Verhältnissen der Apparatur und den Abständen der Interferenzstreifen die Wellenlänge des verwendeten Lichts errechnen und erhielt mit 0,000266 Zoll für rotes und 0,000167 Zoll für violettes Licht durchaus angemessene Werte, die umgerechnet 676 und 424 Nanometer betragen.[11]

Die Wellentheorie des Lichts wurde im frühen 19. Jahrhundert vor allem von dem französischen Ingenieur Jean Augustin Fresnel (1788-1827) weiterentwickelt, welcher ihr durch eine systematische Mathematisierung zum endgültigen Durchbruch verhalf. Es zeigte sich, dass schlechterdings alle bekannten optischen Phänomene ebenso gut oder sogar besser (z.B. im Falle der Beugung) unter der Annahme von Lichtwellen erklärt werden können als durch die konkurrierende korpuskulare Hypothese. Vor allem gelang Fresnel infolge einer wichtigen Modifikation der Wellentheorie die Deutung eines Effektes, der sich im Rahmen der Experimente an bestimmten transparenten Kristallen gezeigt hatte und der sich allen bisherigen Erklärungsversuchen beharrlich widersetzt hatte: Die sogenannte „Polarisation“.

Fresnel war, wie alle Wegbereiter der Wellenhypothese, zunächst davon ausgegangen, dass das Licht sich im Äther auf ähnliche Weise bewegt, wie der Schall in der Luft, d.h. in Form von periodischen Schwankungen des Drucks. Die Amplituden der Welle lenken die Partikel des Mediums dabei nicht im rechten Winkel zur Ausbreitungsrichtung aus, wie dies bei Wasserwellen der Fall ist, sondern in der gleichen Richtung, in welcher auch die Welle fortschreitet. Diese Form der Druckwellen nennt man auch Longitudinalwellen. Fresnel kam nun zur Deutung des Polarisationsphänomens auf die Idee, statt dieser Longitudinal-Schwingungen und in gewisser Analogie zu den Wellen des Wassers anzunehmen, dass auch Lichtwellen seitlich ausgelenkte Amplituden haben, d.h.

[11] Vgl. Weinmann (1980), S. 121. Ein Nanometer ist der milliardste Teil eines Meters bzw. der millionste Teil eines Millimeters.

sogenannte Transversalwellen sind. Mittels dieser Vorstellung erhielt das Licht noch einen weiteren Freiheitsgrad für die räumliche Lage seiner seitlichen Bewegungen, denn im Gegensatz zu Wasserwellen, die immer nur parallel zur zur Schwerkraft schwingen, kann eine Lichtwelle senkrecht zur Richtung ihrer Ausbreitung beliebige räumliche Orientierungen aufweisen.

Wie zeigt sich diese Eigenschaft der Polarisation, die Young als erster vollständig erklären konnte, nun empirisch? Menschliche Augen haben keinen Sensus für jenes Attribut und somit können wir (im Gegensatz zu bestimmten Insekten, wie z.B. den Bienen) dem Licht auch nicht „ansehen“ ob und inwiefern es polarisiert ist. Natürliches Licht ist ohnehin weitgehend unpolarisiert, d.h. es besteht aus einer Mischung von Wellen unterschiedlichster seitlicher Richtungen. Es existieren jedoch natürliche Kristalle, die die Eigenschaft eines Polarisationsfilters besitzen und z.B. einen Lichtstrahl nur dann auf geradem Wege passieren lassen, wenn dieser ganz oder teilweise im rechten Winkel zur sogenannten optischen Achse des Kristallgitters schwingt. Von unpolarisiertem Licht können z.B. nur diejenigen Wellenanteile passieren, die diese Bedingung erfüllen; alle anderen werden abgeblockt. Die aus dem Kristall austretende Lichtwelle ist, wie man sagt, „linear polarisiert“ und kann einen zweiten Filter, der im rechten Winkel dazu steht, nicht mehr überwinden.

Mit der Erklärung der Polarisation und dem damit verbundenen Modellwechsel von Longitudinal- zu Transversalwellen hatte die Wellentheorie des Lichts einen großen Erfolg verbuchen können, so dass sie schließlich zum alles dominierenden Paradigma der Optik avancierte. Spätestens zur Mitte des 19. Jahrhunderts sprach kein Physiker mehr von Newtonschen Lichtteilchen.

2.2 Die elektrodynamische Theorie des Lichts

Die Wellentheorie des Lichts, die sich vor allem im Zuge der theoretischen Arbeiten von A. J. Fresnel gegen die von Newton favorisierte korpuskulare Interpretation durchgesetzt hatte, verlangte, wie bereits angedeutet, nach einem geeigneten Trägermedium, denn Wellen sind bekanntlich immer Wellen in oder von etwas und existieren nicht für sich allein. Die betreffende Substanz musste den gesamten kosmischen Raum ausfüllen, dergestalt, dass auch das Licht sehr weit entfernter Sterne zur Erde gelangen konnte und dabei so dünnflüssig sein, dass die Bewegungen der Himmelskörper nicht gestört wurden. Um aber transversale Oszillationen mit der schier unglaublichen Ausbreitungsgeschwindigkeit von 300.000 km pro Sekunde verlustfrei weiterleiten zu können, sollte sie gleichzeitig die mechanischen Eigenschaften des härtesten Festkörpers aufweisen, d.h. auf unverstandene Weise härter sein als alle bekannten irdischen Materialien. Eine Erklärung für diese extrem widersprüchlichen Qualitäten anzugeben und ein befriedigendes Modell für das rätselhafte Verhalten des sogenannten "Lichtäthers" zu konstruieren, gehörte zu den noch ausstehenden Aufgaben der Physik des 19. Jahrhunderts, zudem nun dieser seltsame Stoff seine Nützlichkeit auch jenseits der Optik unter Beweis zu stellen vermochte. Mit seiner Hilfe gelang das theoretische Kunststück, drei ursprünglich separate Phänomenbereiche - Elektrizität, Magnetismus und Licht - auf ein einheitliches materielles Prinzip zu reduzieren und sowohl die Optik als auch die Elektrodynamik vollständig in das gängige mechanistische Paradigma zu integrieren. Diese Vereinigung markiert in Gestalt der Arbeiten James Clerk Maxwells (1831-1879) gleichsam den Höhepunkt der klassischen Physik, die nach Ansicht vieler ihrer führenden Vertreter kurz vor dem krönenden Abschluss zu stehen schien. Nachfolgend sollen in komprimierter Form die Vorgeschichte und die Grundzüge der elektromagnetischen Lichttheorie dargestellt werden.

Bereits 1820 war von dem dänischen Naturphilosophen und Physiker Hans Christian Oersted (1777-1851) entdeckt worden, dass eine Kompassnadel in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt wird und dass sich in Anwesenheit eines elektrischen Stromes immer auch magnetische Wirkungen nachweisen lassen. Der Engländer Michael Faraday (1791-1867) konnte 11 Jahre später den inversen Effekt erzeugen, der darin bestand, dass ein bewegter Magnet bzw. die zeitliche Änderung einer lokalen magnetischen "Feldstärke" in einem Leiter eine

elektrische Spannung induziert.[12] Es gab also offenkundige Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus, so dass die Vermutung nahe lag, es könne sich dabei um zwei Aspekte ein und desselben Naturphänomens handeln. Von der Idee der innigen Verwandtschaft der Naturkräfte angetrieben, suchte Faraday nun auch nach Spuren einer durch Elektrizität bzw. Magnetismus hervorgerufenen Störung der irdischen Gravitation, sowie nach Anzeichen einer möglichen Irritation des Lichts. Trotz ernsthafter Bemühungen schien die Stärke der Schwerkraft schlechthin unbeeinflussbar zu sein, aber zwischen Licht und Magnetismus ließen sich mittels geeigneter Apparaturen tatsächlich subtile Wechselwirkungen beobachten. Im Jahre 1845 machte unter den mit Elektrizität befassten Naturforschern die Nachricht dieser völlig unerwarteten Entdeckung die Runde: Faraday war der empirische Nachweis des später "magneto-optischer Effekt" genannten Vorgangs geglückt, welcher sich im Experiment dergestalt äußerte, dass polarisiertes Licht, das durch einen Glasstab hindurchgesandt wurde, in Anwesenheit eines magnetischen Feldes seine ursprüngliche transversale Schwingungsebene änderte. Über die Ursache dieser Störung und die Natur der beteiligten Kräfte konnte Faraday allerdings nur spekulieren.

Was ihm verwehrt blieb, sollte dem schottischen Physiker James Clerk Maxwell in den 60er Jahren des 19. Jahrhunderts gelingen: Maxwell hatte sich als Theoretiker zum Ziel gesetzt, ein anschauliches Modell zu entwerfen, in dem sowohl elektrische als auch magnetische Kräfte als makroskopische Erscheinungen aufgefasst werden können, die nur infolge bestimmter mikroskopischer Bewegungen eines omnipräsenten Ätherstoffes auftreten, und welche über dieses gemeinsame Substrat rein mechanisch miteinander gekoppelt sind.[13] Ausgehend von Faradays Konzeption des Kraftfeldes als einer eigenständigen, sich auch durch den vermeintlich "leeren" Raum[14] erstreckenden Entität, gelangte er zu einem Satz lokaler Differentialgleichungen, die sich nicht mehr auf

---

[12] Faraday war, wie auch Oersted, von der deutschen romantischen Naturphilosophie beeinflusst und glaubte schon aus prinzipiellen Überlegungen an die enge Verwandtschaft der Naturkräfte. - Das Konzept eines "magnetischen Feldes" beinhaltet bei ihm den Gedanken an die von materiellen Körpern unabhängige räumliche Existenz der magnetischen Wirkungen, eine Idee, auf die er infolge der Möglichkeit der Sichtbarmachung sogenannter "Feldlinien" mittels feiner Eisenfeilspäne verfiel. Die Anzahl der Feldlinien in einem bestimmten Raumelement ist dann ein Maß für die magnetische Feldstärke. Auch Oersteds Entdeckung der magnetischen Wirkung stromdurchflossener Leiter, die selbst aus nicht magnetischem Material bestehen können (z.B. Kupfer), unterstützte diese Intuition.

[13] Für eine komprimierte Zusammenfassung der Theorie Maxwells vgl. Meya/Sibum (1987) S. 216-233.

[14] Mit "leer" ist hierbei ein technisches Vakuum gemeint, welches man z.B. durch das Abpumpen der Luft aus einem geschlossenen Hohlraum erzeugen kann. Da Licht bekanntermaßen ungehindert und unbeeinflusst durch ein solches Vakuum hindurchgeht, muss der Lichtäther von solcher Feinheit sein, dass er alle "konventionelle" Materie ungehindert durchdringen kann, und es demnach praktisch unmöglich ist, ihn zu entfernen.

idealisierte materielle Körper als Zentrum und Ursache von Fernkräften, sondern auf den kinematischen Zustand des Äthers an einem gegebenen Raumpunkt bezogen. Eine magnetische Feldline wurde dabei als winziger Wirbel im Medium aufgefasst und elektrischer Strom als Bewegung noch kleinerer "Friktionsteilchen", welche zwischen den unzähligen Wirbeln eines Magnetfeldes eingelagert sind und auf deren Oberfläche abrollen wie die Kugeln auf dem inneren Ring eines Kugellagers.

Dem Modell gemäß sollte nun jede (positive oder negative) Beschleunigung derartiger Wirbelzellen, d.h. jede Variation in der Stärke eines magnetischen Feldes, auf die angrenzenden Friktionsteilchen eine Kraft ausüben, die proportional zur Änderungsrate der Rotationsgeschwindigkeit ist, mathematisch gegeben durch die zeitliche Ableitung der magnetischen Feldstärke dB/dt. Innerhalb nichtleitender Materialien bzw. im reinen Äther (d.h. im technischen Vakuum) konnten diese Teilchen lediglich aus ihrer Ruhelage verschoben und in einen Spannungszustand versetzt werden, der im Modell das Analogon eines elektrischen Feldes bildete. In Metallen und anderen leitfähigen Stoffen nahm Maxwell sie als frei beweglich an, so dass im Falle einer Verschiebung an den Enden einer unterbrochenen Drahtschleife eine elektrische Spannung, in geschlossenen Kreisen ein fließender Strom zustande kommen musste. Auch der umgekehrte Fall war möglich: Eine Änderung im Bewegungszustand der Friktionsteilchen, d.h. die Modifikation eines elektrischen Feldes, sollte auf den benachbarten Äther ebenfalls Einfluss nehmen, und dort zu einer Neubildung bzw. Modifikation magnetischer Wirbel führen, wobei analog dem obigen Fall das Ausmaß dieser Wirkung proportional zur zeitlichen Ableitung der elektrischen Feldstärke dE/dt war.

Bis zu diesem Punkt hatte das Modell Maxwells keinen empirischen Gehalt, der über die bereits vorliegenden Theorien hinausging. Die etwas elegantere Form der Gleichungen, die aus einer an Faraday angelehnten Interpretation des physikalischen Feldbegriffes resultierte, wich zwar entscheidend von den konkurrierenden, auf dem Konzept der Fernwirkungskräfte[15] basierenden Formulierungen ab, führte aber in konkreten Rechnungen zu gleichen Ergebnissen. Für die neu aufkommende Elektrotechnik war die Auswahl des theoretischen Instrumentariums ohnehin von untergeordnetem Rang. Sie

[15] In Analogie zur Newtonschen Gravitationstheorie werden hierbei sowohl elektrische als auch magnetische Wirkungen als Kräfte aufgefasst, welche von einem sie verursachenden Zentralkörper aus instantan und ungeachtet der räumlichen Trennung auf andere materielle Objekte einwirken können. Die Kräfte sind dabei als unmittelbare Eigenschaften der jeweiligen Zentralkörper zu denken und haben keinerlei autonome Existenz.

markierte gegen Ende des 19. Jahrhunderts den Beginn einer beispiellosen und gleichsam revolutionären Umgestaltung der menschlichen Lebens- und Arbeitsbedingungen, und in diesem extrem innovationsträchtigen Klima verschwommen die Grenzen zwischen theoretischer Physik und anwendungsbezogener Ingenieurskunst immer mehr. Im Bereich der kommerziellen Stromerzeugung, der möglichst effizienten Weiterleitung und Verteilung der Elektrizität sowie auf dem grenzenlosen Gebiet ihrer möglichen Anwendungen im öffentlichen und privaten Umfeld: Überall galt es technische Probleme zu lösen und in all diesen Fällen bot die Maxwellsche Elektrodynamik keinen nennenswerten Vorteile gegenüber den Alternativen.

Dennoch verbarg sich hinter ihren etwas kryptisch anmutenden Symbolen ein entscheidend neuer Gesichtspunkt, der geeignet war, dem weit verbreiteten Instrumentalismus zu begegnen und in die Diskussion physikalischer Grundlagenprobleme einzugreifen: Wenn, wie Maxwell annahm, Magnetismus, Elektrizität und deren Wechselwirkung Strömungsphänomene sind, die sich im Äther abspielen und welche demnach auch unabhängig von der Anwesenheit elektrisch geladener oder magnetischer Gegenstände eine reale Existenz besitzen, dann ergibt sich aus der konsequenten Anwendung des Formalismus die Möglichkeit einer neuen Art von Wellen, die Energie tragen und sich mit endlicher Geschwindigkeit durch das Medium bewegen. Der genaue Betrag dieser Geschwindigkeit ist dabei nur von den mechanischen Qualitäten des Äthers abhängig und diese spiegelten im Modell die physikalischen Eigenschaften magnetischer und elektrischer Kräfte wider, d.h. letztlich gewisse mit diesen im Zusammenhang stehende Naturkonstanten.[16]

In anschaulicher Form sollte die Erzeugung neuer bzw. die Unterstützung bereits im Äther vorhandener Wirbelzellen, was einer Änderung des dortigen Magnetfeldes gleichkäme, eine Verschiebung der angrenzenden Friktionsteilchen bewirken und somit ein elektrisches Feld generieren. Die Bewegung jener Teilchen sollte im Anschluss die Entstehung oder Beschleunigung weiterer Wirbel zur Folge haben, welche dann wiederum Friktionsteilchen

---

[16] Wie bereits angedeutet ist die Stärke eines magnetischen Feldes an einem ausgewählten Punkt durch die Geschwindigkeit der zugehörigen Wirbel bestimmt. Darüberhinaus ist die magnetische Permeabilität durch die Dichte des Äthers, die Stärke eines elektrischen Feldes durch den Grad der Auslenkung einer bestimmten Einheitsmenge von Friktionsteilchen und schließlich die „Dielektrizitätszahl“ durch die Federkonstante eines solchen Teilchens gegeben, d.h. den Proportionalitätsfaktor zwischen einwirkender Kraft und resultierender Auslenkung. Die magnetische Permeabilität ist etwas grob gesprochen ein Maß für die Bereitschaft eines Stoffes in sich magnetische Feldlinien zu bilden. Es gibt hierbei die genormte Permeabilität des Vakuums (μ_0) und die spezifische, jedem Stoff zugeordnete relative Permeabilität (μ_r) - z.B. hat Weicheisen eine bis zu 5000 Mal größere magnetische Permeabilität als das Vakuum. Die Dielektrizitätskonstante ist ein Analogon zur magnetischen Permeabilität und bezieht sich auf die Durchlässigkeit des Vakuums (ε_0) bzw. diejenige beliebiger Stoffe (ε_r) für elektrische Felder.

verschieben usw. Aufgrund der geometrischen Beziehungen der beteiligten Kraftvektoren gab sich der betreffende Prozess als eine Art mechanischer Transversalwelle zu erkennen, wobei hier besonders interessant ist, dass es nach der modellgeleiteten Konstruktion des Gleichungssystems auf die konkrete Manifestation der Vorgänge im Äther eigentlich nicht mehr ankam. Es war offensichtlich, dass zu der vorliegenden mathematischen Formulierung unzählige "Äthermaschinen" denkbar waren und dass die Theorie keine Prognosen liefern konnte, die geeignet gewesen wären, qua *experimentum crucis* eine bestimmte Anordnung auszusondern. Die Möglichkeit "elektromagnetischer" Wellen blieb davon jedenfalls unberührt: Ein sich in seiner Stärke änderndes elektrisches Feld induziert ein ringförmiges, zu diesem orthogonal liegendes magnetisches Feld, welches in seiner Stärke von der Änderungsgeschwindigkeit des elektrischen abhängt. Und dieses variierende magnetische Feld erzeugt wiederum eine rechtwinklig dazu stehende elektrische Verschiebung, womit eine ganze Periode der Schwingung abgeschlossen ist und der Vorgang von neuem beginnt. Da in den Formeln die Stärke eines jeden Feldes von der zeitlichen Änderungsrate (der 1. Ableitung nach der Zeit) des jeweils anderen abhängt, ist in der resultierenden Welle überall dort, wo die magnetische Komponente den Wert Null annimmt, die orthogonal verlaufende elektrische maximal und umgekehrt.

Der besondere Wert jener Ätherwellen lag nun zunächst einmal darin, dass dieses Phänomen in direktem Widerspruch zur Idee instantaner Fernwirkungen stand, so dass der experimentelle Nachweis solcher Effekte dazu hingereicht hätte, den Streit um das Wesen elektrischer und magnetischer Kraftfelder zu entscheiden: Haben sie eine eigenständige Existenz, d.h. sind sie in der Lage, auch ohne die Anwesenheit der Körper, von denen sie normalerweise ausgehen, im Raum präsent zu sein, oder nicht? - Wenn es diese Oszillationen, die sich beliebig weit von ihrem Entstehungsort entfernen können, tatsächlich gibt, so die naheliegende Argumentation, dann legitimieren sie damit gleichsam auch die Autonomie der Felder, aus denen sie letztlich bestehen.[17]

Der zweite und besonders faszinierende Vorzug der Hypothese Maxwells lag aber in der sich andeutenden Möglichkeit, in der physikalischen Theorie des Lichts voranzukommen, denn im Rahmen einer genaueren Analyse der prognostizierten Schwingungen stieß dieser auf ein verblüffendes Faktum, welches kaum unter Bemühung des Zufalls gedeutet werden

[17] Diese Autonomie bezieht sich auf gewöhnliche, d.h. auf nicht-ätherische Materie. Hinsichtlich des Äthers selbst ist ein solches Feld natürlich nicht absolut, sondern nur relativ autonom, insofern seine Form das zugrundeliegende Substratum notwendig voraussetzt.

konnte: Der Term, der die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Störung im Äther beschrieb, und der nur von den beiden Konstanten abhing, welche die Stärke magnetischer und elektrischer Wirkungen im luftleeren Raum quantifizieren (nach moderner Diktion ε_0 und μ_0), lieferte den gleichen Wert, wie die damals schon hinreichend genau bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts.[18] Sollte, so die naheliegende Vermutung, dieses letzten Endes nichts anderes sein, als eine elektromagnetische Welle?

Neben der verblüffenden Deduktion der Geschwindigkeit ermöglichte die Theorie noch eine weitere Voraussage, die sich anhand bereits vorliegender empirischer Daten überprüfen ließ: Es musste einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen dem Brechungsindex[19] eines Stoffes und seiner relativen Dielektrizitätszahl ε_r geben, d.h. eine direkte Beziehung zwischen einem genuin optischen Parameter und einer materialspezifischen Konstante aus dem Bereich der Elektrizitätslehre, und auch diese Prognose erwies sich als zutreffend. Für Maxwell schienen all diese Resultate die Hypothese zu untermauern, dass Licht ein elektromagnetisches Phänomen ist und dass sowohl die physikalische Optik als auch die Elektrodynamik unter Einbeziehung der Äthervorstellung vollständig mechanisiert werden können.

Man hätte nun erwarten sollen, dass sich aufgrund dieser Resultate viele begabte Experimentatoren daran gemacht hätten, die vorhergesagten Wellen im Labor zu erzeugen und ihre Eigenschaften zu bestimmen, um der Theorie gewissermaßen zur entscheidenden Bewährungsprobe zu verhelfen, doch Maxwell, der 1879 starb, sollte den triumphalen Erfolg seiner Ideen nicht mehr erleben. Zwischen den theoretischen Arbeiten aus den 60er Jahren und der Entedeckung „künstlicher“ elektromagnetischer Ätherwellen lagen fast 25 Jahre und dafür lassen sich vielfältige Gründe anführen.

Zum einen war die mathematische Form der Gleichungen so neuartig und komplex, dass nur wenige damit etwas anzufangen wussten; und zum anderen beschränkte sich die Verbreitung der Theorie vornehmlich auf den englischen Sprachraum, denn die

---

[18] Es ergab sich eine erstaunlich einfache Relation: Die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum (d.h. im "reinen" Äther) ist gleich dem Kehrwert der Wurzel aus dem Produkt von ε_0 und μ_0! Durch diesen sich hier andeutenden Brückenschlag zwischen Elektrodynamik und Optik entsteht allerdings ein gewisses Dilemma: Entweder ist qua der Unveränderlichkeit der elektrischen und magnetischen Feldkonstanten die Lichtgeschwindigkeit unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle und/oder des Beobachters immer dieselbe (!), oder die Bedeutung von ε_0 und μ_0 ist nur eine relative und diesen kann nur im „ruhenden“ Äther das Attribut einer Naturkonstanten zukommen. Dieses verwickelte Paradoxon wird erst in der späteren Relativitätstheorie Einsteins in befriedigender Weise aufgelöst werden können.

[19] Der Brechungsindex oder die Brechungszahl ist ein stoffspezifisches Maß für die Stärke der Ablenkung (Brechung) eines Lichtstrahls beim nicht lotrechten Übergang vom Vakuum in ein anderes (transparentes) Medium.

überwiegende Mehrheit französischer und deutscher Physiker stand schon aus eher prinzipiellen Gründen den Postulaten der Ätherphysik Maxwellscher Prägung sehr kritisch gegenüber. Auf dem Kontinent waren ja elektrostatische Gesetze entstanden, die in der Tradition von Ampère und Coulomb von Elektrizitätsatomen und deren instantanen Fernwirkungskräften ausgingen, d.h. Positionen, die einen gewissen Gegensatz zu den Prinzipien der an Faraday anknüpfenden und darüberhinaus eher pragmatisch orientierten viktorianischen Physik bildeten. Und zu aller Unkenntnis und allen ideologischen Ressentiments gesellten sich handfeste experimentelle Schwierigkeiten.

Theoretisch hätte es zur Hervorbringung einer Störung des Äthers nur der Bewegung oder Drehung eines Magneten bedurft, doch derartige Aktionen sind vergleichsweise langsam. Durch die enorme Ausbreitungsgeschwindigkeit ihres elektromagnetischen "Echos" würde die gesamte darin enthaltene Energie über Tausende von Kilometern im Raum verteilt und unter jeder Nachweisgrenze liegen. Ebenso gut könnte man in der Mitte des als ideal ruhend gedachten Atlantiks im Verlauf einer Woche einen Liter Wasser hinzufügen und versuchen, in unmittelbarer Nachbarschaft eine vereinzelte Wellenfront nachzuweisen.

Das Ein- bzw. Ausschalten elektrischer Stromkreise schien da schon vielversprechender zu sein, da diese Wirkung (hier die Variation eines lokalen elektrischen Feldes) viel schneller vonstatten geht. Doch auch dies hätte immer noch den Charakter eines singulären Ereignisses getragen, mit einer entsprechend rasch (nach der Vorhersage mit Lichtgeschwindigkeit!) vorbeiziehenden Wirkung. Eine mögliche Verbesserung der Situation ergab sich aus der geschickten Ausnutzung sehr schneller und über eine gewisse Zeit andauernder Schwingungen, d.h. periodischer Richtungsänderungen eines elektrischen Stromes, die einen länger ausgedehnten Wellenzug erzeugen mussten. Dass solche Oszillationen bei Funkenentladungen sogenannter Leydener Flaschen[20] oder den

[20] Eine Leydener Flasche ist die Urform eines sogenannten Plattenkondensators, d.h. eines Apparates, der aus zwei durch einen Isolator getrennten leitfähigen Metallplatten besteht. Diese Anordnung kann eine gewisse Menge elektrischer Ladung aufnehmen und bei Bedarf schlagartig wieder abgeben, bei höheren Spannungen durch einen sichtbaren Funkenüberschlag. In diesem Fall treten zwangsläufig stark gedämpfte elektrische Schwingungen auf, d.h. der Kondensator wird sehr schnell und in wechselnder Polarität geladen und wieder entladen. Die Frequenz dieser Oszillationen ist dabei vom "Fassungsvermögen", d.h. der Kapazität des Kondensators abhängig und von der Anordnung und Länge der beteiligten Anschlussdrähte, die sogenannte "Induktivitäten" bilden und Energie kurzzeitig in ihrem Magnetfeld speichern. Das genaue Verständnis der Funktionsweise eines solchen Schwingkreises ist hier nicht vonnöten. Durch die relativ hohe Kapazität einer typischen Leydener Flasche ist die Entladefrequenz jedoch niedrig ("nur" 1 Million pro Sekunde oder weniger) im Vergleich zu den Oszillatoren, die schon Anfang des 20. Jahrhunderts in der Rundfunktechnik zum Einsatz kamen. Verteilt man z.B. 1 Million komplette Schwingungen auf die Strecke, die die prognostizierte Störung innerhalb dieser Sekunde im Äther zurücklegt (300.000 Km), so ergibt sich eine Wellenlänge (z.B. gegeben durch den Abstand zweier Wellenberge) von 300 Metern – für eine Messung im Labor viel zu lang.

Hochspannungsblitzen von Induktionsapparaten[21] auftraten, gehörte zum Bestand des physikalischen Wissens, aber die Frequenz dieser Prozesse war für einen möglichen Nachweis elektromagnetischer Wellen im Labormaßstab immer noch viel zu niedrig. Bei der Entdeckung geeigneter, d.h. viel schnellerer Vorgänge sollte schließlich der Zufall eine gewisse Rolle spielen.

Der junge deutsche Physiker Heinrich Hertz (1857-1894) war bereits seit einigen Jahren mit bestimmten qualitativen Vorhersagen der Maxwellschen Theorie und den praktischen Schwierigkeiten ihrer empirischen Bestätigung vertraut, als er 1886 im Rahmen der experimentellen Arbeit an kleineren Induktionsspulen Phänomene beobachtete, die auf extrem schnelle Oszillationen hindeuteten, und die, wie sich später herausstellte, bis zum Faktor 1000 schneller waren als diejenigen, die bei der Entladung Leydener Flaschen auftraten.[22] Wurde eine kleine, auf einen Holzkörper aufgewickelte Spule[23], parallel zu der eine kurze Funkenstrecke[24] geschaltet war, mit einer geladenen Leydener Flasche

---

[21] Ein Induktorium oder Funkeninduktor gehörte damals zum Inventar jedes physikalischen Laboratoriums. Er besteht aus zwei verschieden langen, auf einen "Kern" aus Weicheisen gewickelten Drähten. Der kürzere dieser Drähte ist mit den Polen einer Batterie verbunden. Mittels eines Unterbrecherkontaktes kann dieser kleine Stromkreis in kurzen Abständen immer wieder unterbrochen werden, was bei größeren Induktorien durch unterschiedliche technische Einrichtungen meist automatisch geschieht. Parallel zu diesem Unterbrecherkontakt liegt ein Plattenkondensator, der eine gewisse Menge elektrischer Ladung aufnehmen kann. Bei jeder Unterbrechung entsteht eine Reihenschaltung aus Plattenkondensator und aufgewickelter Drahtspule, die die Eigenschaft hat, elektrische Schwingungen auszuführen, d.h. die Ladung im Kreis "pendelt" ständig zwischen Plattenkondensator und Spule hin und her. Die Frequenz dieser Schwingungen hängt genau wie bei der Leydener Flasche von der Kapazität des Kondensators und der Induktivität (der "Kapazität" einer Spule) der Drähte bzw. der Drahtspule ab und kann nach einer Formel, die William Thomson, der spätere Lord Kelvin, bereits 1853 aufgestellt hat, berechnet werden (Thomsonsche Schwingungsformel). In der zweiten, von der ersten getrennt angebrachten Drahtwicklung, die viel mehr Windungen aufweist (meist einige Tausend), wird von den im Takt der Oszillationen des Primärkreises erfolgenden Schwingungen des Magnetfeldes eine elektrische Spannung induziert, die direkt von der Anzahl der Windungen abhängt und demnach sehr hoch ist. Man kann so Spannungen von annähernd 100.000 Volt und sichtbare Funkenüberschläge in der Luft erzeugen, die 30-40cm überbrücken. Übrigens werden die Funken der Zündkerze moderner Kraftfahrzeuge auf ähnliche Weise, d.h. mittels kleiner Induktorien generiert.

[22] Hertz kannte zunächst nur die allgemeinen Grundzüge der Theorie Maxwells, und das gewissermaßen aus zweiter Hand, d.h. aus den Ausführungen seines Lehrers Hermann von Helmholtz (1821-1894). Helmholtz war daran gelegen, sich von der metaphysiklastigen Tradition der deutschen Naturphilosophie abzusetzen und ihre Prinzipien einer rigorosen Kritik zu unterziehen. Die Physik sollte die Natur als rein mechanisches System auffassen und alle obskuren Kräfte und Finalitäten aus ihren Theorien verbannen. Es gelang ihm, die Berliner Akademie der Wissenschaften zu einer 1879 ausgeschriebenen Preisarbeit zu bewegen, in der empirische Belege für die Richtigkeit des Faraday-Maxwellschen Feldkonzepts beigebracht werden sollten. Helmholtz setzte seinen Schüler Heinrich Hertz darauf an, der aber aufgrund der von ihm bereits vorhergesehenen experimentellen Schwierigkeiten von einer Bearbeitung der Frage absah. Trotzdem war Hertz seitdem entsprechend sensibilisiert für alle Effekte, die im Rahmen eines solchen Unternehmens von Bedeutung sein konnten. Als er in den Jahren nach 1886 auf derartige Phänomene stieß, musste er sich die mathematischen Details der Maxwellschen Gleichungen mühsam erarbeiten, und es dauerte einige Zeit, bis sich bei ihm die Ergebnisse punktueller Messungen zum gedanklichen Bild einer elektromagnetischen Welle verdichteten. Der von der Berliner Akademie ausgesetzte Preis war natürlich längst verfallen.

[23] Da ein Holzkörper im Gegensatz zu einem Weicheisenkern die magnetische Wirkung einer stromdurchflossenen Spule nicht verstärkt, besitzt sie nur eine relativ kleine Induktivität, d.h. sie kann nur recht wenig Energie in ihrem Magnetfeld speichern.

[24] Eine Funkenstrecke ist nichts anderes, als eine kleine Unterbrechung im Stromkreis. Eine hinreichend große elektrische Spannung führt hier zu einem sichtbaren Funkenüberschlag durch die Luft. In ihrem Abstand abstimmbare Funkenstrecken (sogenannte Funkenmikrometer) dienten im 19. Jahrhundert u.a. zur Ermittlung der Größe einer

verbunden, so kam es zu einem sichtbaren Funkenüberschlag und auch an einem benachbarten Stromkreis, der aus einer ähnlichen Spule samt Funkenstrecke bestand, konnte ein kleiner Blitz beobachtet werden. Dies funktionierte seltsamerweise auch dann noch, wenn man sehr wenig Ladung in den primären Kreis brachte, d.h. eine vergleichsweise kleine Leydener Flasche als Stromquelle benutzte. Die Kapazität der Flasche hatte wider Erwarten kaum einen Einfluss auf das Phänomen und auch die Wirkung über einige Entfernung hinweg, d.h. vor allem die Entstehung eines Funkens, der seinerseits auf Oszillationen hindeutete, konnte mit den bekannten elektrodynamischen Gesetzen nicht erklärt werden.[25]

Ausgehend von diesem ersten, durch Zufall entdeckten empirischen Befund eines kleinen Funkens in einem separaten elektrischen Kreis, entwickelte Hertz über einige Jahre experimenteller Arbeit hinweg eine Vorstellung von der Natur der zunächst unverstandenen Vorgänge. Der primäre Kreis bildete dabei mit seiner Drahtspule und der Funkenstrecke eine Art Induktorium mit sehr kleiner Kapazität und ebenfalls sehr kleiner Induktivität, so dass er nach der Thomsonschen Schwingungsformel (vgl. Anm. 21) Oszillationen von extrem hoher Frequenz ausführen musste.[26] Diese stark gedämpften Schwingungen hielten jeweils eine gewisse, wenn auch sehr kurze Zeit an, so dass die im Äther hervorgerufene Störung weniger den Charakter eines einmaligen Ereignisses, als vielmehr den einer periodischen Bewegung, d.h. eines kurzen Wellenzuges zeigte, welcher sich nachweislich in den umgebenden Raum ausbreitete. Hertz konnte diesen mittels eines

---

elektrischen Spannung - je größer der Spalt, d.h. je länger der Funkenüberschlag, desto größer die Spannung. Bei relativ kleinen Spannungen durfte der Spalt nur wenige Mikrometer breit sein, um überhaupt einen Überschlag zu ermöglichen. Dieser Funke war dann entsprechend schwach, und nur mittels eines Vergrößerungsglases im abgedunkelten Raum wahrnehmbar.

[25] Dass die durch einen beginnenden Stromfluss generierte magnetische Wirkung der ersten Spule in der in kurzem Abstand befindlichen zweiten eine Spannung induziert, die man beim Berühren der Enden durch einen leichten Schlag sogar spüren konnte, war keine Neuigkeit und mit den vorhandenen Gesetzen (Faradays Induktionsgesetz) erklärbar. Lediglich die Entstehung eines *Funkens*, der auf eine viel höhere Spannung und vor allem auf oszillatorische Vorgänge hindeutete, erregte die Aufmerksamkeit von Hertz, denn man wusste unter anderem aus fotographischen Aufnahmen, dass in solchen Entladungen schnelle elektrische Schwingungen auftreten. Zur besonderen Rolle des elektrischen Funkens im Rahmen der Hertzschen Versuche und zur Funkenfotografie im 19. Jahrhundert vgl. Hagen, Wolfgang: Fotofunken und Radiowellen. Über Feddersens Bilder und die Hertzschen Versuche. In: Hoffmann/Berz (2001), S. 225-258.

[26] Es handelte sich um Frequenzen von bis zu einer Milliarde (!) Schwingungen pro Sekunde, die aufgrund der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit immerhin noch Wellen von 30cm Länge erzeugten [300000 km/s geteilt durch 1 Milliarde Schwingungen/Sekunde = 30 cm pro Schwingung]. Der primäre Sendekreis wurde in den späteren Versuchen nicht mehr durch eine Leydener Flasche, sondern durch den Hochspannungspuls eines Rühmkorffschen Funkeninduktors mit Energie versorgt. Ein solches Gerät konnte durch eine Automatisierung des Unterbrecherkontaktes hunderte von Malen pro Sekunde eine starke elektrische Entladung produzieren und damit den stark gedämpften Sendekreis immer wieder von Neuem zu Oszillationen anregen. Nur mittels dieser Anordnung war die räumliche Vermessung elektromagnetischer Wellen überhaupt möglich, denn Sender, die permanent und ungedämpft schwingen, und die die Grundlage der späteren Rundfunktechnik bilden sollten, standen Hertz natürlich noch nicht zur Verfügung.

metallischen Parabolspiegels in eine räumliche Richtung fokussieren und an der mit Metallblech verkleideten Laborwand durch eine geeignete Wahl des Abstandes zum Sender dergestalt in sich selbst zurückreflektieren, dass sich eine stehende Welle ausbildete. Solche Wellen können beispielsweise auch an schwingenden Saiten beobachtet werden, wobei sogenannte "Schwingungsbäuche" auftreten, in denen die Saite sich stark bewegt und dazwischenliegende Knotenpunkte, in denen diese in ihrer Mittellage ruht. Zum Nachweis des unsichtbaren elektromagnetischen Phänomens bediente sich Hertz eines geraden, in der Mitte durch den winzigen Spalt eines Funkenmikrometers unterbrochenen Drahtes, der eine weit fortgeschrittene Abstraktion des ursprünglichen, aus Drahtspule und Funkenstrecke bestehenden Empfangskreises bildete. Das an den Schwingungsbäuchen sehr stark oszillierende elektrische Feld der stehenden Welle rief in dieser später "Hertzscher Dipol" genannten Antenne[27] eine elektrische Spannung hervor, die sich als winziger Funke bemerkbar machte, der desto schwächer wurde, je näher der Draht an den Knotenpunkt der Schwingung gerückt wurde. Auf diese Weise ließen sich in feststehenden und immer wiederkehrenden Abständen die "Knoten" der Welle nachweisen und damit ihre räumliche Wellenlänge bestimmen. Zur Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bedurfte es darüber hinaus noch der Kenntnis der Frequenz des elektrischen Oszillationsvorgangs im aussendenden Leiter, welche Hertz mittels der Thomsonschen Formel grob abschätzen konnte.[28] Der aus diesen Daten berechnete Wert lag im Bereich der Lichtgeschwindigkeit.

Um nun die Analogie zwischen Licht und elektromagnetischen Wellen zu vervollständigen und die Maxwellsche Vermutung der Identität beider zu festigen, waren natürlich noch weitere Versuche notwendig, die Hertz in einem zusammenfassenden Aufsatz wie folgt schildert:

„Wir bringen den Leiter, welcher die Schwingungen erregt, in der Brennlinie eines sehr großen Hohlspiegels an. Es werden dadurch die Wellen zusammengehalten, und treten als kräftig dahineilender Strahl aus

---

[27] Das theoretische Verständnis, auf dessen Grundlage die Funktionsweise eines solchen Dipols heutzutage erklärt werden kann, spielte in den Versuchsreihen offensichtlich noch keine Rolle. Es war eher eine lange Reihe von „Versuch und Irrtum“, in der die optimale Konfiguration zuwege gebracht wurde: „Auch dies Mittel mußte durch die Erfahrung selbst an die Hand gegeben werden“ wird Hertz später resümieren, denn „die Überlegung konnte es nicht wohl voraussehen“. Vgl. H. Hertz: Über die Beziehungen zwischen Licht und Electriziät. Vortrag, gehalten bei der 62. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte zu Heidelberg am 20. September 1889. In: Hertz (1988), Bd. 1, S. 339-354, Zitat auf S. 349.

[28] Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle ist dann gegeben durch das Produkt aus der gemessenen Wellenlänge und der Frequenz (d.h. der Anzahl der Schwingungen pro Sekunde) des Senders.

dem Hohlspiegel aus. Freilich können wir diesen Strahl nicht unmittelbar sehen, noch fühlen; seine Wirkung äußert sich dadurch, daß er Funken in den Leitern erregt, auf welche er trifft. Er wird für unser Auge erst sichtbar, wenn sich dasselbe mit einem unserer Resonatoren bewaffenet. Im Übrigen ist er ein wahrer Lichtstrahl. Wir können ihn durch Drehung des Spiegels in verschiedene Richtungen senden, wir können durch Aufsuchung des Weges, welchen er nimmt, seine geradlinige Ausbreitung erweisen. Bringen wir leitende Körper in seinen Weg, so lassen dieselben den Strahl nicht hindurch, sie werfen Schatten. Dabei vernichten sie den Strahl aber nicht, sie werfen ihn zurück; wir könnnen den reflektierten Strahl verfolgen und uns überzeugen, daß die Gesetzte der Reflexion die der Reflexion des Lichts sind. Auch brechen können wir den Strahl in gleicher Weise wie das Licht. Um einen Lichtstrahl zu brechen, leiten wir ihn durch ein Prisma, er wird dadurch von seinem geraden Wege abgelenkt. Ebenso verfahren wir hier und mit dem gleichen Erfolge. Nur müssen wir hier entsprechend den Dimensionen der Wellen und des Strahles ein sehr großes Prisma nehmen; wir stellen dasselbe aus einem billigen Stoffe her, etwa Pech oder Asphalt. Endlich aber können wir sogar diejenigen Erscheinungen an unserem Strahle verfolgen, welche man bisher einzig und allein am Lichte beobachtet hat, die Polarisationserscheinungen. Durch Einschiebung eines Drahtgitters von geeigneter Struktur in den Weg des Strahles, lassen wir die Funken in unserem Resonator aufleuchten oder verlöschen, genau nach den gleichen geometrischen Gesetzmäßigkeiten, nach welchen wir das Gesichtsfeld eines Polarisationsapparates durch Einschieben einer Krystallplatte verdunkeln oder erhellen."[29]

Diese von Hertz geschilderten Versuche hatten die Existenz der von Maxwell vorhergesagten elektromagnetischen Wellen in überzeugender Weise nachgewiesen und im Rahmen einer genaueren Analyse ihrer Eigenschaften ließ sich auch die darüber hinaus gehende Vermutung erhärten, dass Licht physikalisch gesehen nichts anderes ist als eine solche Vibration im Äther, wenn auch mit viel kleinerer Wellenlänge.[30] Dass jene elektromagnetischen Felder einmal zur Übertragung von Information dienstbar gemacht werden könnten und dass sich die Menschheit an der Schwelle eines neuen medialen Zeitalters befand, hatte Hertz noch nicht vorausgesehen. Diese Spur soll hier auch nicht weiter verfolgt werden.

Für die theoretische Physik bestand jedenfalls der Wert der jetzt auch empirisch bestätigten Theorie Maxwells vor allem in der erfolgreichen Reduktion verschiedener, ehemals

---

[29] H.Hertz: Über die Beziehungen zwischen Licht und Electriziät. In: Hertz (1988), Bd. 1, S. 339-354, Zitat S. 352.

[30] Die Wellenlänge war ja bereits von Thomas Young bestimmt worden und bewegt sich je nach Farbe im Bereich zwischen 0,4 und 0,75 tausendstel Millimetern (400-750 Nanometer).

autonomer Phänomenbereiche auf das Gebiet einer von ontologischer Sparsamkeit gekennzeichneten Mechanik. Nicht nur waren jetzt sowohl Optik als auch Elektrizitätslehre lediglich abgeleitete, d.h. prinzipiell entbehrliche Disziplinen – sondern auch die beteiligten Kräfte, d.h. elektrostatische und magnetische Wirkungen, erwiesen sich gleichsam nur als Scheineffekte einer zugrundeliegenden Hydrodynamik des Äthers. Es gab dort keine Fernwirkung, keine *actio in distans*, sondern nur eine mit endlicher Geschwindigkeit – quasi lawinenartig – durch den Äther wandernde, rein stoffliche Verschiebung. Es nimmt nicht wunder, dass in diesem Zusammenhang auch die von Newton als Musterbeispiel einer instantanen Anziehungskraft konzipierte Gravitation zum Gegenstand erneuter Spekulation wurde:

„Da liegt nahe vor uns die Frage nach den unvermittelten Fernwirkungen überhaupt. Giebt es solche? Von vielen, welche wir zu besitzen glaubten, bleibt uns nur eine, die Gravitation. Täuscht uns auch diese? Das Gesetz, nach welchem sie wirkt, macht sie schon verdächtig."[31]

Die Physik des 19. Jahrhunderts hatte die erfolgreiche Integration so unterschiedlicher Phänomenbereiche wie Akustik, Wärmelehre, Elektrodynamik und Optik in das gängige mechanistische Paradigma zuwege gebracht, so dass die einzig verbliebene Fernwirkung gleichsam als „okkulter" Fremdkörper erscheinen musste. Die Hoffnung auf eine analoge Reduktion derselben auf anschauliche Bewegungsmuster des Äthers nährte aber die Zuversicht vieler Naturforscher hinsichtlich des baldigen Abschlusses ihrer Disziplin, der heutzutage mit dem Attribut „klassisch" versehenen Physik.[32] Es ist wohl auch kein Zufall, dass Heinrich Hertz, dessen Name der Nachwelt in der Einheit der technischen Frequenz erhalten ist,[33] in den letzten Jahren seines Lebens an einer umfassenden Neuformulierung der Mechanik arbeitete, aus welcher er den ungeliebten Begriff der „Kraft" sogar gänzlich zu entfernen trachtete. Sein Werk sollte unvollendet bleiben; Hertz starb 1894 im Alter von nur 37 Jahren, vermutlich an den Folgen einer schleichenden Vergiftung mit Quecksilberdämpfen, die aus dem automatischen Unterbrecher seines Funkeninduktors stammten. Es hätte wohl auch niemand fortsetzen wollen, denn am Horizont des

---

[31] H.Hertz: Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität. A.a.O, S. 353.

[32] Man kann bei dieser Gelegenheit an die oftmals zitierte Anekdote erinnern, nach der der Münchener Physiker Philipp von Jolly dem jungen Max Planck dringend vom Studium der Physik abgeraten haben soll - mit der Begründung, das Wesentliche sei bereits erforscht und es gehe nur noch darum, einige unbedeutende Lücken zu füllen. Es liegt wohl eine gewisse Ironie der Geschichte darin, dass gerade Max Planck nur wenige Jahre später als unfreiwilliger Begründer der Quantentheorie die unantastbaren Fundamente der klassischen Physik zum Einsturz bringen sollte. Vgl. Hermann (2005), S. 9.

[33] Mit „Hertz", bzw. der Abkürzung „Hz" wird bei periodischen Vorgängen deren Anzahl pro Sekunde quantifiziert.

vermeintlich Vollkommenen zogen bereits die ersten Wolken neuer Entdeckungen auf, die das Gebäude bis in die Grundfesten zu erschüttern drhoten. Es brach in sich zusammen und an seiner Stelle, so kann man rückblickend behaupten, entstanden zwei neue Häuser – diese allerdings von so unterschiedlicher Bauart, dass es bis heute nicht gelungen ist, an beide ein gemeinsames Maß anzulegen. Die genauere Bestimmung desjenigen Gegenstandes, der schließlich zum Auslöser und Katalysator der Krise werden sollte, hatte Hertz bereits zu Lebzeiten als dringlichstes Desiderat der physikalischen Forschung identifiziert:

„[Es] erhebt sich die gewaltige Hauptfrage nach dem Wesen, nach den Eigenschaften des raumerfüllenden Mittels, des Äthers, nach seiner Struktur, seiner Ruhe oder Bewegung, seiner Unendlichkeit oder Begrenztheit. Immer mehr gewinnt es den Anschein, als überrage diese Frage alle übrigen, als müsse die Kenntnis des Äthers uns nicht allein das Wesen der ehemaligen Imponderabilien offenbaren, sondern auch das Wesen der alten Materie selbst und ihrer innersten Eigenschaften, der Schwere und der Trägheit. Die Quintessenz uralter physikalischer Lehrgebäude ist uns in den Worten aufbewahrt, daß alles, was ist, aus dem Wasser, aus dem Feuer geschaffen sei. Der heutigen Physik liegt die Frage nicht mehr ferne, ob nicht etwa alles, was ist, aus dem Äther geschaffen sei?“[34]

In diesen Worten klingt die Idee einer letzten Vereinheitlichung an, die schon im Denken der Vorsokratiker ihren Ausgang nahm: Äther als *Arché*, als stoffliches Prinzip jedweder materiellen Form. – Doch die immer bedrohlicher werdenden kinematischen Paradoxien bereiteten diesem physikalischen Traum ein Ende. Statt des Aufstiegs zum Urgrund alles Seienden erfuhr der Ätherstoff in der Relativitätstheorie Einsteins seine ersatzlose Streichung. Was sich bereits in den elektrodynamischen Gleichungen Maxwells angedeutet hatte, die in allen Bezugssystemen stets gleiche Geschwindigkeit des Lichts, wurde zum Ausgangspunkt einer revolutionären Umgestaltung der Begriffe von Zeit und Raum, einer relativistischen Kinematik, die eines universellen Äthers nicht mehr bedurfte. Aber auch hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen elektromagnetischen Wellen und gewöhnlicher Materie tauchten immer mehr experimentelle Befunde auf, die im Rahmen der klassischen Ätherphysik nicht mehr verstanden werden konnten und die schließlich zu einer gewissen Renaissance des bereits lange überwunden geglaubten, korpuskularen Lichtbegriffes führen sollten. Für Heinrich Hertz und die meisten der zeitgenössischen Physiker des

[34] H.Hertz: Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität. A.a.O, S. 354.

ausgehenden 19. Jahrhunderts war die Möglichkeit einer grundlegenden Modifikation der mühsam erarbeiteten Theorie des Lichts und eine Abkehr vom Ätherprinzip vollkommen undenkbar:

„Die Wellentheorie des Lichts ist, menschlich gesprochen, Gewißheit; was aus derselben mit Notwendigkeit folgt, ist ebenfalls Gewißheit. Es ist also auch gewiß, daß aller Raum, von dem wir Kunde haben, nicht leer ist, sondern erfüllt mit einem Stoffe, welcher fähig ist, Wellen zu schlagen, dem Äther.“[35]

Der Umsturz dieser Gewissheiten lieferte viel später der auf dem Prinzip der Diskontinuität basierenden Wissenschaftshistoriographie Thomas Kuhns das Musterbeispiel eines sogenannten Paradigmenwechsels. Die revolutionären Umbildungen klassischer Begriffe, die in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts vollzogen wurden, sind in ihrer Tragweite und Radikalität ohne Vergleich. Und es sind diese Erträge der fundamentalsten aller empirischen Diszplinen, der Mikro- bzw. Atomphysik, die im szientistischen Weltbild des modernen Menschen bislang den geringsten Niederschlag gefunden haben.

[35] H.Hertz: Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität. A.a.O, S. 340.

3. Das Licht der Quantentheorie

Es gehört zu den bemerkenswerten Fakten der Wissenschaftsgeschichte, dass die Genese der beiden Theoriegebäude, welche unmittelbar aus der tiefen Krise der klassischen Physik hervorgingen und die sich im wesentlichen bis heute erhalten haben, in engstem Zusammenhang steht mit formalen wie empirischen Schwierigkeiten der auf dem Ätherprinzip fußenden Konzeption des Lichts .

Sowohl die immer exakteren Messungen der Lichtgeschwindigkeit als auch die Vorhersagen der Maxwellschen Elektrodynamik legten zum Ende des 19. Jahrhunderts die Vermutung nahe, dass das kinematische Verhalten des Lichts mit den Grundlagen der klassischen Mechanik unvereinbar sein könnte und dass zum Zweck der anzustrebenden Vereinigung von Optik und Mechanik möglicherweise vollkommen neuartige theoretische Instrumente vonnöten seien. Auch die Untersuchungen der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie gaben den Physikern nun zunehmend Rätsel auf, so dass bald festzustehen schien, dass die Theorie Maxwells nur hinsichtlich freier, sich ungestört im Raum ausbreitender elektromagnetischer Wellen zu adäquaten Vorhersagen führt und dass sie sich zumindest im Falle der energetischen Austauschprozesse, d.h. hinsichtlich der Lichtemission und -absorption als teilweise oder sogar gänzlich unbrauchbar erweisen könnte.

3.1 Max Planck und die Entdeckung des Wirkungsquantums

Es war damals bekannt, dass alle Körper in permanentem Energieaustausch mit ihrer Umgebung stehen und dass an diesem Prozess auch elektromagnetische Wellen beteiligt sind, was sich im Rahmen alltäglicher Erfahrung am offensichtlichsten an heißen Gegenständen dokumentiert, die gleichsam unsichtbar „leuchten“ und spürbar wärmende Strahlen aussenden. Wie sich bereits im 19. Jahrhundert herausgestellt hatte, findet diese der vorwissenschaftlichen Weltauffassung entstammende Analogie von Wärmestrahlung und Licht ihre tiefere Begründung darin, dass beide Phänomene physikalisch gesehen von gleicher Natur sind, d.h. elektromagnetische Wellen, die sich lediglich hinsichtlich ihrer jeweiligen Oszillationsfrequenz unterscheiden.[36] Befindet sich ein materieller Gegenstand innerhalb eines isolierenden Vakuums, so wird diese Form der energetischen Wechselwirkung zur ausschließlichen und die Art der emittierten Strahlung zu einem indirekten Maß seiner Temperatur. Genau genommen, sendet ein solcher Körper nicht nur „Licht“ einer einzigen „Farbe“, d.h. Wellen einer genau bestimmten Frequenz aus, sondern ein ganzes Spektrum unterschiedlicher Wellenlängen mit jeweils eigener Intensität. Ein langsam erhitztes Stück Eisen beginnt beispielsweise zunächst damit, infrarote Wärmestrahlen auszusenden, welche für das menschliche Auge noch unsichtbar sind. Mit zunehmender Temperatur verschiebt sich das Spektrum seiner Strahlung immer mehr in den sichtbaren Bereich. Man kann zunächst ein schwaches, dunkles Rot beobachten, bei weiterer Erhitzung wechselt die Farbe über hellrot, orange, nach gelb und weiß. Doch selbst im Zustand der Weißglut besteht die abgegebene Energie immer noch zu einem beachtlichen Teil aus unsichtbarer Wärmestrahlung, d.h. der Faden einer handelsüblichen Glühlampe emittiert neben sichtbarem auch größere Mengen infraroten Lichts, was dieser, sofern ihre eigentliche Aufgabe im Leuchten und nicht im Heizen besteht, zu einem vergleichsweise schlechten Wirkungsgrad verhilft.

Der Physiker Gustav Kirchhoff (1824-1887) hatte bereits 1859 theoretisch zu zeigen vermocht, dass im Falle eines im thermodynamischen Gleichgewicht befindlichen Körpers die Verteilung der Wellenlängen und deren jeweilige Intensität nicht von der Art des

---

[36] Gemäß der Maxwellschen Theorie sind elektromagnetische Wellen von beliebiger Länge möglich, so dass nur ein winziger Teil derselben den Bereich des sichtbaren Lichts ausmacht. Unterhalb und oberhalb dieses schmalen Bandes gibt es gleichsam ein endloses Reich unsichtbaren „Lichts“. Die Identifikation der Wärmestrahlung mit einem solchen, langwelligen „Licht“ und die Entdeckung der chemisch hochgradig wirksamen ultravioletten Wellen galten zusammen mit der Hertzschen Erzeugung von Radiowellen als beeindruckende Bestätigung der Ideen Maxwells.

Materials, sondern nur von dessen absoluter Temperatur abhängt, d.h. in gewisser Weise eine universelle Funktion darstellt. Dabei ist mit dem Begriff des „thermodynamischen Gleichgewichts“ ein Zustand beschrieben, in dem der Energiefluss zwischen Körper und Strahlungsfeld vollkommen ausbalanciert ist und die Materie genausoviel Energie absorbiert, wie sie andererseits wieder aussendet. Man kann sich z.B. einen evakuierten Hohlraum denken, der sich in einem festen Material befindet, welches seinerseits von außen auf einer konstanten Temperatur gehalten wird. Innerhalb eines solchen Raumes wird sich dann eine charakteristische Strahlung einstellen, die im Experiment mittels einer kleinen Öffnung beobachtet und vermessen werden kann. Kirchhoff selbst hatte bereits 1860 darauf hingewiesen, dass es eine Aufgabe von „hoher Wichtigkeit“ sei, die genaue mathematische Funktion der temperaturabhängigen Strahlungsverteilung zu finden, doch das Unternehmen erwies sich als unerwartet kompliziert.[37]

Ein erster erfolgversprechender Versuch der Behandlung des Strahlungsproblems entstammte den Arbeiten des deutschen Physikers Wilhelm Wien (1864-1928). Seine 1896 publizierte Formel erwies sich für einen bestimmten kurzwelligen Bereich des Spektrums als zutreffend, versagte jedoch bei der Vorhersage der Intensitätsverteilung langwelliger Wärmestrahlung, und das umso mehr, je höher die absolute Temperatur des betrachteten Körpers gewählt wurde.[38] Diese von Otto Lummer und Ernst Pringsheim ermittelten Daten bezüglich des infraroten Lichts standen allerdings Wien zum Zeitpunkt der Publikation seines Gesetzes noch nicht zur Verfügung.[39] Durch eine geschickte Interpolation jener Zahlen und unter Berücksichtigung der ja in bestimmten Grenzen durchaus adäquaten Formulierung Wiens gelang es schließlich dem theoretischen Physiker Max Planck (1858-1947) ein eigenes Strahlungsgesetz zu postulieren, welches er am 19. Oktober 1900 der Physikalischen Gesellschaft in Berlin mitteilte. Die daraus abgeleiteten Vorhersagen standen zwar in befriedigender Übereinstimmung mit den empirischen Messungen, doch mangelte es an einer plausiblen Herleitung derselben aus Prinzipien, und dies umso mehr,

---

[37] Vgl. Hermann (1969), S. 13.

[38] Auch wenn sich das Intensitäts-Maximum im Spektrum der emittierten Strahlung eines Körpers mit zunehmender Temperatur mehr und mehr in den kurzwelligen Bereich verschiebt, verbleibt in seinem „Licht“ immer noch ein beträchtlicher Anteil infraroter Wärmestrahlung.

[39] Otto Lummer (1860-1925) und Ernst Pringsheim (1859-1917) arbeiteten damals an der Physikalisch Technischen Reichsanstalt zu Berlin. Mittels eines von Pringsheim entwickelten Infrarot-Spektrometers wurden bei hohen Temperaturen (ca. 1500 Grad Celsius) und relativ langen Wellen (18 Mikrometer – zum Vergleich: Sichtbares „Rot“ liegt bei ca. 0,7 Mikrometer) deutliche Abweichungen vom Wienschen Strahlungsgesetz festgestellt. Diese und weitere Messungen, welche u.a von Heinrich Rubens (1865-1922) und Ferdinand Kurlbaum (1857-1927) durchgeführt wurden, lieferten den Theoretikern wie Planck auf der Suche nach Kirchhoffs Funktion die entscheidenden Hinweise.

als dass eine solche Fundierung als eigentliches Ziel der theoretischen Behandlung physikalischer Probleme überhaupt zu gelten hat. „Selbst wenn die Strahlungsformel sich als absolut genau bewähren sollte“, so Planck hierzu in einem von ihm verfassten Vortrag, „so würde sie, lediglich in der Bedeutung einer glücklich erratenen Interpolationsformel, doch nur einen recht beschränkten Wert besitzen. Daher war ich von dem Tage ihrer Aufstellung an mit der Aufgabe beschäftigt, ihr einen wirklichen physikalischen Sinn zu verschaffen […]“.[40] In den wenigen Monaten darauf, in denen es Planck gelang, besagte Aufgabe erfolgreich zu bewältigen, profitierte er von vielen seiner bereits geleisteten Vorarbeiten, so dass mit der „glücklich erratenen“, aber offensichtlich zutreffenden Formulierung des Stahlungsgesetzes gleichsam die kritische Masse an theoretischem Verständnis erreicht war, dessen es zur vollständigen Lösung des Problems bedurfte. Im Rahmen eines ersten Versuches, die Kirchhoffsche Funktion aus Prinzipien zu deduzieren, war Planck von der von Maxwell allgemein formulierten und durch Heinrich Hertz weiterentwickelten elektrodynamischen Theorie ausgegangen, die ja die Prozesse der Entstehung und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen zum Gegenstand hat und auf deren Grundlage man mit Recht den entscheidenden Durchbruch erwarten durfte.[41] In seinem Modell sollten die Wände des oben beschriebenen Hohlraumes aus sogenannten Hertzschen Resonatoren bestehen, d.h. aus winzigen Dipol-Antennen, die elektromagnetische Wellen einer bestimmten, jeweils eigenen Frequenz absorbieren und vollständig wieder emittieren können.[42] Makroskopisch betrachtet würden sich solche Flächen wie ein idealisierter Spiegel verhalten, der das auf ihn einfallende Licht zu 100 Prozent zu reflektieren vermag, so dass in besagtem Hohlraum die einmal darin befindliche Menge an Strahlung ewig erhalten bliebe. Plancks Hoffnung war nun, dass sich durch subtile Effekte der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Resonatoren, unabhängig von dem ursprünglichen Charakter einer eingeschlossenen festen Menge an Strahlungsenergie, stets eine nur von dieser Gesamtenergie abhängige Normalverteilung der Frequenzen und

---

[40] Rede von Max Planck, gehalten am 2. Juni 1920 in Stockholm, anlässlich der Verleihung des Nobelpreises für Physik. Abgedruckt in: Planck (1973), S. 125-138, Zitat S. 129.

[41] Diese ersten Versuche zur Lösung des Problems der Hohlkörperstrahlung beginnen bereits im Jahr 1894.

[42] Im realen Experiment ist die Frequenz eines solchen Oszillators von seiner Geometrie abhängig, d.h. von den Abmessungen des Dipols. In Plancks theoretischem Modell spielte jedoch die konkrete Ausführung der Resonatoren keine Rolle. Wichtig war nur ihr resonantes Verhalten, d.h. die Fähigkeit schwingfähiger Systeme (z.B. auch mechanischer Pendel), vorwiegend diejenige Energie absorbieren zu können, die von gleicher Frequenz und Phasenlage ist, wie die jeweils eigene Schwingung. Will man etwa einen Menschen auf einer Schaukel zu immer höheren Bewegungen anregen, so muss sich der Zeitpunkt des Anschiebens nach dem eigenen Takt des Systems richten. Asynchrone oder gar gegenphasige Aktionen vermögen die Schwingung eher zu bremsen als zu befördern.

zugehörigen Intensitäten einstellen sollte, was im gelingenden Fall eine theoretische Lösung des Kirchhoffschen Problems bedeutet hätte. Doch dieser, noch ganz auf dem Boden der klassischen Elektrodynamik errichtete Ansatz führte nicht zum gewünschten Erfolg. Wie Planck später in seiner wissenschaftlichen Selbstbiographie resümierend feststellen wird, erwies sich seine „ursprüngliche stille Hoffnung, die von dem Oszillator emittierte Strahlung werde sich in irgendeiner charakteristischen Weise von der absorbierten Strahlung unterscheiden [...] als trügerisch. Der Oszillator reagiert nur auf diejenigen Strahlen, die er auch emittiert und zeigt sich nicht im mindesten empfindlich gegen benachbarte Spektralgebiete."[43]

War hier der Befund der relativen Unfruchtbarkeit des eingeschlagenen Weges aus der Sicht des theoretischen Physikers bereits mehr als unbefriedigend, so musste nach der erfolgreichen Extrapolation eines adäquaten Gesetzes aus empirischen Daten das Fehlen einer Fundierung desselben aus Prinzipien gleichsam als totales Versagen der Disziplin gewertet werden. Man hatte den Ausdruck direkt vor Augen und dennoch blieb sein tieferer Sinn gänzlich unverstanden. Planck schildert in einem Brief sehr lebhaft die psychologischen Begleitumstände seiner Arbeit am Strahlungsproblem, wenn er betont, dass angesichts des Vorliegens einer angemessenen Formel „eine theoretische Deutung [...] um jeden Preis gefunden werden [musste], und wäre er noch so hoch."[44] Der erneute Anlauf, der in den Herbstmonaten des Jahres 1900 zum erhofften Durchbruch führte, trug für Planck den Charakter eines „Aktes der Verzweiflung"[45], denn er musste sich einer Methode bedienen, die er bisher aufs Schärfste abgelehnt und sogar bekämpft hatte, der auf statistischen Verfahren fußenden Thermodynamik.

Diese untrennbar mit dem Namen des österreichischen Physikers Ludwig Boltzmann (1844-1906) verbundene Theorie beschreibt die makroskopischen Parameter Temperatur, Druck und Volumen eines Gases durch die Analyse der mechanischen Bestimmungsgrößen seiner kleinsten Einheiten, wobei vorausgesetzt wird, dass diese Moleküle bzw. Atome sich in ständiger Bewegung befinden und nur mittels vollkommen elastischer Stöße in Wechselwirkung treten.[46] Man kann dann in diesem Rahmen die Temperatur als mittlere kinetische Energie der Gasmoleküle auffassen und den Druck, den ein in einem Gefäß

---

[43] Planck (1948), S. 24.
[44] Planck in einem Brief an Robert Williams Wood. Abgedruckt in Hermann (1969), S. 31f., Zitat S. 32.
[45] Ebd. S. 31
[46] Ein elastischer Stoß ist ein solcher, bei dem der Satz von der Erhaltung des Impulses streng eingehalten wird. Die Summe der Impulse (der „Impuls" ist das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit) zweier Körper muss vor und nach einem elastischen Stoß stets dieselbe bleiben.

eingeschlossenes Gas auf die Wand desselben ausübt, als eine Folge der rechtwinklig auf diese Fläche auftreffenden Impulskomponenten der Teilchen.[47] Da aufgrund der enormen Anzahl der Korpuskeln[48] die genaue Betrachtung der Trajektorie eines jeden einzelnen nicht durchführbar ist, bedient sich die Boltzmannsche Thermodynamik statistischer und wahrscheinlichkeitstheoretischer Methoden und verlässt damit gewissermaßen den Boden der von analytischer Eleganz geprägten klassischen Mechanik.

Es waren urspünglich diese methodologischen Zugeständnisse, die das Missfallen Plancks auf sich ziehen mussten, der eine solche Verfahrensweise allenfalls als Notbehelf, keineswegs jedoch an Stelle einer strengen Deduktion aus physikalischen Prinzipien akzeptiert hätte. Hinzu gesellten sich noch ernsthafte Zweifel an der von Boltzmann unterstellten Hypothese vom atomaren Aufbau der Materie, die gegen Ende des 19. Jahrhunderts keineswegs als gesichert gelten konnte. Für einen theoretischen Physiker vom Schlage Plancks war es bis zum Oktober des Jahres 1900 nicht mehr als ein Gebot der Vernunft, keine Theorie auf ein derart zweifelhaftes Fundament zu stellen. Nun aber, unter dem Eindruck der neuerlichen Entwicklungen auf dem Gebiet der strahlenden Wärme, sah er sich fast schon dazu gezwungen, diese Grundüberzeugungen zu revidieren, wobei der Schlüssel zur Lösung des Strahlungsproblems vor allem in der wahrscheinlichkeitstheoretischen Begründung des Entropiebegriffes lag, d.h. einer Überlegung, die von Boltzmann im Rahmen seiner korpuskularen Theorie der Gase angestellt worden war.

Die bereits vor dem Aufstieg der statistischen Thermodynamik in die Physik eingeführte Konzeption der „Entropie“ erwuchs ursprünglich aus der Entdeckung, dass in der theoretischen Analyse der Umwandlungsprozesse verschiedener Energieformen ineinander eine rein summative Betrachtung der Energiebilanz nicht in der Lage ist, das Verhalten der beteiligten Systeme vollständig zu beschreiben. Vermischt man beispielsweise einen Liter Wasser mit einer Temperatur von 60 Grad Celsius mit einem Liter von 20 Grad, so ist dem Satz von der Erhaltung der Energie[49] damit genüge getan, dass die in der Mischung enthaltene thermische Gesamtenergie gleich der Summe der beiden Teilenergien ist.

---

[47] Genau genommen ist die absolute Temperatur (gemessen in Kelvin) eine zur mittleren kinetischen Energie der Gasmoleküle proportionale Größe. Die Bewegungsenergie (kinetische Energie) eines Körpers hängt von seiner Masse und seiner Geschwindigkeit ab. Es gilt: $E_{kin} = ½ m v^2$.

[48] 1 Liter eines (beliebigen) Gases enthält unter Normbedingungen (genormter Druck und Temperatur) bereits die kaum vorstellbare Menge von etwa $2{,}688 * 10^{22}$ Teilchen. Als Boltzmann mit seinen statistischen Überlegungen begann, versuchte er aufgrund mangelnder experimenteller Evidenz gänzlich ohne die Annahme einer absoluten Teilchenzahl auszukommen, sondern nur deren Menge als „hinreichend groß“ anzunehmen.

[49] Dieser Satz ist auch als der „erste Hauptsatz der Thermodynamik“ bekannt.

Allerdings sind von diesem Standpunkt aus betrachtet der Vorgang des Vermischens und der Vorgang eines möglichen „Entmischens“ symmetrische Prozesse, so dass es ohne Verletzung des Erhaltungssatzes auch möglich sein müsste, aus zwei Litern lauwarmen Wassers jeweils einen Liter kaltes und einen Liter heißes Wasser wiederzugewinnen, was aber offensichtlich der Erfahrung widerspricht: Das Mischen der Flüssigkeiten von unterschiedlicher Temperatur ist ein Musterbeispiel eines unumkehrbaren physikalischen Prozesses, aus dessen rein energetischer Betrachtung sich keine Erklärung dieser Irreversibilität gewinnen lässt. Um dem Phänomen dennoch Rechnung zu tragen, musste gleichsam neben der Energie noch ein Index der unterschiedlichen Wertigkeit derselben eingeführt werden, so dass z.B. in allen Mischungsprozessen von soeben beschriebener Art die Wertigkeit der Gesamtenergie immer niedriger ist als die Wertigkeit der Teilenergien.[50] Der Begriff der „Entropie“ kann dann im weitesten Sinne als ein reziprokes Maß dieser Wertigkeit gelten: Je größer die Entropie, desto „wertloser“ die zugehörige Energie des Systems und umgekehrt. Neben dem Satz von der Erhaltung der Energie, welcher besagt, dass die Summe der Energien in einem von der Umgebung isolierten System stets konstant bleibt[51], postulierte die Physik des 19. Jahrhunderts demnach noch eine zweite Behauptung, welche fordert, dass die Entropie in einem geschlossenen System bestenfalls konstant bleibt, in der Regel jedoch zunimmt und niemals abnehmen kann.[52]

Die Idee der Entropie wird nun in der statistischen Thermodynamik Boltzmanns weiterentwickelt und mit dem Begriff der Wahrscheinlichkeit in Verbindung gebracht. Je größer die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein gegebenes physikalisches System in einer bestimmten, aus der Menge der möglichen Zustände herausgegriffenen Konstellation befindet, desto größer die damit assoziierte Entropie[53], woraus auch

---

[50] Der Begriff des „Wertes“ ist selbstverständlich kein physikalischer Begriff, sondern ein alltäglicher, der nur eine ungefähre Vorstellung von der Bedeutung der Entropie vermitteln soll. Im angedeuteten Beispiel ist das Vorhandensein von einem Liter heißem und einem Liter kaltem Wasser „wertvoller“, als das Vorhandensein von 2 Litern lauwarmem Wasser, da man letzteres immer durch Mischen der Ausgangsstoffe generieren kann, dies umgekehrt aber nicht mehr möglich ist. Auch ist das Vorhandensein von einer Kilowattstunde elektrischer Energie „wertvoller“ als das der gleichen Menge Wärmeenergie, da aus Strom verlustfrei Wärme generiert werden kann, aber nur unter Inkaufnahme größerer Einbußen (in der Regel über 50%) Elektrizität aus Wärme.

[51] Energie kann nicht „verlorengehen“, sondern nur in andere Formen derselben umgewandelt werden.

[52] Diese Behauptung ist der sogenannte „zweite Hauptsatz der Thermodynamik“: In einem geschlossenen System nimmt die Entropie niemals ab. – Übrigens ist es möglich, mittels einer Wärmepumpe aus zwei Litern lauwarmen Wassers wieder die Ausgangsmengen und –temperaturen zu generieren, doch nur durch den Einsatz zusätzlicher (meist elektrischer) Energie, so dass die Entropie des gesamten Systems (Wasser plus Wärmepumpe plus elektrische Energie) in der Tat wiederum zunimmt.

[53] Da Entropien als additive Größen konzipiert wurden, Wahrscheinlichkeiten jedoch mutiplikative Größen sind, wird die Entropie so definert, dass sie dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit proportional ist. Der Proportionalitätsfaktor ist eine von Planck erstmals eingeführte, später nach Boltzmann benannte Konstante (k_B). Boltzmann selbst hatte noch kein

unmittelbar ersichtlich ist, warum jene Größe in isolierten Systemen mit einer hinreichend großen Anzahl beteiligter Teilchen niemals ab-, sondern in der Regel zunimmt: Die Strukturen mit größerer Entropie sind die wahrscheinlicheren, und ein korpuskulares System entwickelt sich statistisch gesehen stets in Richtung des Zustandes der größten Wahrscheinlichkeit. Wird beispielsweise in einem mit Luft gefüllten Raum in einer Ecke eine kleine Menge Heliumgas eingebracht, so wird sich nach einiger Zeit dieses Gas im ganzen Raum gleichmäßig verteilt haben, so dass Spuren von Helium an beliebiger Stelle nachweisbar sind.[54] Diese maximale Ausbreitung ist die bei weitem wahrscheinlichste Verfasstheit des betrachteten Systems. Alle von dieser Gleichverteilung abweichenden Zustände werden selbst bei geringfügigen Devianzen sehr schnell derart unwahrscheinlich, dass solche Fälle unter praktischen Gesichtspunkten als inexistent gelten dürfen, was sie, und das ist das grundlegende Problem einer naturgesetzlichen Interpretation statistischer Analysen, streng genommen aber nicht sind. Eine zufällige Wiederkehr der Ausgangssituation (Helium konzentriert in einer kleinen Ecke des Raumes), einhergehend mit einer expliziten Verletzung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, kann zumindest *prinzipiell* nicht ausgeschlossen werden.

Diese unliebsame „Lücke“ im Gesetz war für Boltzmann bereits problematisch, für Max Planck jedoch schlechterdings inakzeptabel.[55] Dennoch führte gerade die Ausweitung des probabilistischen Entropiebegriffes auf den Fall elektromagnetischer Strahlung im Hohlkörper zum entscheidenden Durchbruch. Planck orientierte sich dabei an der bereits angedeuteten Untersuchung Boltzmanns, in welcher dieser die Entropie einer vorgegebenen Gasmenge mit ebenfalls bekanntem Gesamtenergiegehalt zu berechnen suchte, indem er die Wahrscheinlichkeit dafür ermittelte, dass sich das System in einem bestimmten, aus der Menge aller möglichen Konstellationen ausgewählten Zustand befindet. Fasst man hierzu die kinetische Energie der Moleküle, wie in der klassischen Physik üblich, als kontinuierliche Größe auf, so besteht das größte Problem darin, dass es

---

absolutes Bezugssystem der Entropie festgelegt, sondern immer nur von relativer Entropie eines Systems sprechen können. Zur absoluten Definition hätte es der Kenntnis der genauen Anzahl der Teilchen bedurft, die sich in einer Gasmenge von vorgegebener Masse befinden. Auf derartige, von empirischen Messungen abhängige Größen wollte sich Boltzmann jedoch nicht einlassen.

[54] Da Helium leichter ist, als die Hauptbestandteile der Luft (Sauerstoff und Stickstoff), wird der Prozess durch die Schwerkraft beeinflusst. Das „ideale“ System sollte deshalb frei von äußeren Kräften sein.

[55] Wird der Entropiebegriff (wie heute üblich) statistisch *definiert*, so ist auch der zugehörige 2. Hauptsatz der Thermodynamik genau genommen kein Naturgesetz, von dem es bekanntlich keine Ausnahme geben darf. Ist dieser jedoch ein strenges Gesetz, was wohl die ursprüngliche Auffassung Plancks gewesen sein muss, so trägt die statistische Begründung desselben eher den Charakter einer Verlegenheitslösung.

unendlich viele Verteilungsvarianten einer endlichen Menge Energie auf eine ebenfalls endliche Anzahl von Teilchen gibt, so dass eine quantitative Betrachtung zunächst als unmöglich erscheinen könnte. Mittels einer trickreichen Maßnahme konnte Boltzmann diese Schwierigkeit jedoch umgehen: Er teilte im Ansatz die Energie zunächst in diskrete Portionen, die gleichsam die kleinste Einheit einer „Energiewährung“ verkörperten, und die dadurch nur auf endlich viele Arten und Weisen unter den Korpuskeln aufgeteilt werden konnten. Setzte man dann die Anzahl der Verteilungsmöglichkeiten, einen konkreten Zustand x zu verwirklichen, in Relation zur Menge aller denkbaren Distributionen, so erhielt man das intendierte Maß der Wahrscheinlichkeit dieser Konstellation.[56] Interessant ist nun, dass jener Quotient, in welchem das Maß der Größe einer Energieportion ε sowohl im Zähler als auch im Nenner vorkam, auch dann endlich blieb, wenn diese Größe beliebig klein gewählt wurde, so dass mittels einer Grenzwertbetrachtung ($\varepsilon \rightarrow 0$) die künstliche Zerteilung der ursprünglich kontinuierlichen Größe wieder rückgängig gemacht werden konnte, ohne die Berechnung der Entropie zu gefährden.

Eines ähnlichen Verfahrens bediente sich nun Planck bei der Herleitung seines Strahlungsgesetzes: Er ging davon aus, dass die elektromagnetische Energie im Hohlkörper, welche sich im Falle der Gleichgewichtssituation zwischen Strahlung und Materie einstellt, der Zustand von größtmöglicher Entropie ist und dass die dort vorgefundene spektrale Intensitätsverteilung des Lichts diejenige Konstellation darstellt, die unter den gegebenen Rahmenbedingungen mit Abstand die wahrscheinlichste ist. Zu jeder vorgegebenen Temperatur des Hohlkörpers existiert nun ein derartiges Entropiemaximum und die zugehörige Strahlungsfunktion, in welche die Temperatur als Argument eingeht, liefert die Distribution der vorhandenen Energie auf die unterschiedlichen Wellenlängen der Strahlung.[57] Mittels dieses Verfahrens, welches auf der von Boltzmann eingeführten statistischen Entropieberechnung beruhte, gelang es tatsächlich, die bereits vorhandene und aus empirischen Daten „glücklich erratene“ Formel theoretisch zu begründen und das 40 Jahre zuvor von Gustav Kirchhoff formulierte Problem einer befriedigenden Lösung zuzuführen.

---

[56] Bekanntermaßen ist in der Stochastik die Wahrscheinlichkeit (p) eines Ereignisses – in einer hinreichend großen Stichprobe – der Quotient aus der Menge der günstigen (x) und der Menge aller betrachteten Ereignisse (m): $p = x/m$.

[57] Genau genommen behandelte Planck nicht die spektrale Verteilung der Strahlung selbst, sondern die Verteilung der Energie auf die Quellen derselben, d.h. auf die Hertzschen Oszillatoren in der Wandung des Hohlraumes. Die Zulässigkeit dieser Vereinfachung hatte Planck bereits theoretisch zu begründen gewusst. Vgl. Planck (1948), S. 23.

Mit diesem Erfolg war die Arbeit am Strahlungsgesetz allerdings noch nicht beendet, denn es galt in der Folge, den beiden darin enthaltenen Konstanten eine physikalische Bedeutung zu verschaffen. Die erste dieser Konstanten (k_B), welche von Planck erstmals eingeführt und später nach Ludwig Boltzmann benannt wurde, spezifiziert den direkten Zusammenhang zwischen absoluter Temperatur eines Gases (gemessen in Grad Kelvin) und der mittleren kinetischen Energie seiner Teilchen. Der Umstand, dass diese Größe eine so wichtige Rolle im Strahlungsgesetz spielt und darüberhinaus nicht ohne die Kenntnis der genauen Anzahl der in einem definierten Gewichtsteil (bzw. Stoffmenge) enthaltenen Korpuskel ermittelt werden kann, trug letztlich dazu bei, dass Planck vom entschiedenen Gegner der Atomistik zu einem ihrer eifrigsten Fürsprecher konvertierte.

Die zweite innerhalb des Gesetzes auftretende Konstante, die von Planck ursprünglich nicht ohne Hintergedanken mit dem Symbol „h“ – als Abkürzung für „Hilfskonstante“ – bezeichnet worden war, stand für diskrete und damit abzählbare Energieportionen, ohne die ja eine der Boltzmannschen Methode analoge Behandlung des Strahlungsproblems nicht durchgeführt werden konnte. Man kann davon ausgehen, dass Planck ursprünglich daran gedacht hatte, diese ansatzweise vorgenommene Quantisierung der Energie in gleicher Weise wie Boltzmann durch einen Grenzübergang ($h \rightarrow 0$) gänzlich aus dem mathematischen Ausdruck zu entfernen, doch unerwarteterweise ließ sich dieser Betrag nicht unter ein durch die empirischen Messungen vorgegebenes Maß reduzieren. Statt einer Wiederherstellung des klassischen Konzeptes kontinuierlicher Größen, erhielt Planck im Zuge seiner Rechnung das hinreichend seltsame Resultat, dass die Energie ε eines Hertzschen Resonators (von Planck „Energieelement“ genannt) nur den Betrag ganzzahliger Vielfacher von h annehmen konnte und daher wegen $h>0$ selbst quantisiert war. Es ergab sich dabei die einfache Beziehung $\varepsilon=h\cdot\nu$, wobei „ν“ für die Frequenz der elektrischen Oszillation, d.h. die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde steht. Dass die Konstante h, welche von Planck später mit dem Namen „elementares Wirkungsquantum“ belegt wurde, gemessen am typischen Energieumsatz makroskopischer Systeme fast von vernachlässigbarer Größe ist[58], änderte dennoch nichts an ihrer grundsätzlichen Unvereinbarkeit mit den Prinzipien der klassischen Mechanik: „Solange man sie als unendlich klein betrachten durfte“, so wird Planck später resümieren, „also bei großen Energien oder langen Zeitperioden, war alles in schönster Ordnung;

[58] Der heutige Wert für h liegt bei etwa $6{,}62607\cdot10^{-34}$ und hat die Dimension einer Wirkung (Energie × Zeit).

im allgemeinen Falle jedoch klaffte an irgendeiner Stelle ein Riß, der um so auffallender wurde, zu je schwächeren und schnelleren Schwingungen man überging. Das Scheitern aller Versuche, die entstandene Kluft zu überbrücken, ließ bald keinen Zweifel mehr übrig: entweder war das Wirkungsquantum nur eine fiktive Größe; dann war die ganze Deduktion des Strahlungsgesetzes prinzipiell illusorisch und stellte weiter nichts vor als eine inhaltsleere Formelspielerei, oder aber der Ableitung des Strahlungsgesetzes lag ein wirklich physikalischer Gedanke zugrunde; dann mußte das Wirkungsquantum in der Physik eine fundamentale Rolle spielen, dann kündigte sich mit ihm etwas ganz Neues, bis dahin Unerhörtes an, das berufen schien, unser physikalisches Denken, welches seit der Begründung der Infinitesimalrechnung durch Leibniz und Newton sich auf der Annahme der Stetigkeit aller ursächlichen Zusammenhänge aufbaut, von Grund aus umzugestalten.“[59]

Diese Worte stammen aus dem Jahr 1920. Zum Publikationszeitpunkt der deduktiven Ableitung des Strahlungsgesetzes, welches Planck am 14. Dezember 1900 der physikalischen Gesellschaft Berlins präsentiert hatte, war noch keineswegs abzusehen, dass mit der Einführung des Wirkungsquantums ein neues Zeitalter der Physik anbrechen sollte, in welchem die Grundlagen des naturwissenschaftlichen Weltbildes auf noch tiefgreifendere Weise umgebildet werden sollten als durch die Modifikation der klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit durch die Relativitätstheorie Einsteins. Planck selbst hatte in den Jahren nach der Deduktion des Strahlungsgesetzes unablässig an der möglichen Eingliederung des Wirkungsquantums in die klassische Elektrodynamik gearbeitet, doch in diesem Punkt blieb ihm der Erfolg versagt: „Manche Fachgenossen haben darin eine Art Tragik erblickt.“, so Planck in seinen autobiographischen Erinnerungen, „Ich bin darüber anderer Meinung. Denn für mich war der Gewinn, den ich durch solch gründliche Aufklärung davontrug, um so wertvoller. Nun wußte ich ja genau, daß das Wirkungsquantum in der Physik eine viel bedeutendere Rolle spielt, als ich anfangs geneigt war anzunehmen, und gewann dadurch ein volles Verständnis für die Notwendigkeit der Einführung ganz neuer Betrachtungs- und Rechnungsmethoden bei der Behandlung atomistischer Probleme.“[60]

[59] Planck (1973), S. 131.
[60] Planck (1948), S. 30

3.2 Albert Einstein und die Lichtquantenhypothese

Welche Auswirkungen hatte die Entdeckung des Wirkungsquantums auf die physikalische Theorie des Lichts? Zur Herleitung der Hohlkörperstrahlung, welche ja eine der jeweiligen Temperatur zugehörige und für diese charakteristische Mischung verschiedener „Farben“ bzw. Wellenlängen darstellt, sah sich Planck dazu gezwungen, die vorgegebene Energie nur in stets gleichen Paketen oder „Quanten“ auf die Licht emittierenden Resonatoren aufzuteilen, so dass für einen solchen „Sender“ die Relation $E = h \cdot \nu$ gilt (wobei h das Wirkungsquantum und ν die Frequenz bezeichnet). Dieser mathematische Kunstgriff bezog sich in Plancks Augen jedoch vornehmlich auf die Emissions- und Absorptionsprozesse, d.h. auf den Bereich der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. Auf die klassische Interpretation des Lichts als einer elektromagnetischen Ätherwelle, die für Planck zu den großen Errungenschaften jahrhundertelanger theoretischer und experimenteller Arbeit zählte, sollte das ominöse Wirkungsquantum keine Auswirkungen haben; der Versuch, an der Wellentheorie des Lichts zu rütteln, erschien ihm noch im Jahre 1913 als völlig undenkbar.

Dieser für Planck aus prinzipiellen Gründen versperrte Weg wurde 1905 von einem in Physikerkreisen noch gänzlich unbekannten jungen Mann namens Albert Einstein(1979-1955) eingeschlagen, der zu jener Zeit seinen Lebensunterhalt am Berner Patentamt bestritt – als „Experte dritter Klasse“. In einer einzigen Ausgabe der Zeitschrift *Annalen der Physik* erschienen im Sommer 1905 drei Aufsätze Einsteins zu unterschiedlichen physikalischen Problembereichen, von denen ein jeder aus heutiger Sicht als „revolutionär“ bezeichnet werden kann. Die bekannteste dieser Abhandlungen trägt die Überschrift „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“[61] und enthält die Grundlagen der Speziellen Relativitätstheorie. Eine weitere beschäftigt sich mit der molekularkinetischen Deutung der Brownschen Bewegung und liefert einen indirekten Beweis der in der statistischen Thermodynamik vorausgesetzten Existenz von Molekülen und Atomen.[62] Der dritte Aufsatz mit dem Titel „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts

[61] Vgl. Einstein (1905c)

[62] Vgl. Einstein (1905b). – Der Botaniker Robert Brown hatte bereits im Jahr 1827 entdeckt, dass kleine, in einem ruhenden Wassertropfen suspendierte Pflanzenpollen unregelmäßige aber beständige Bewegungen ausführen. Er deutete dies zunächst als Anzeichen des Lebens, doch Versuche mit anorganischen Partikeln (z.B. Kohlestaub) widerlegten diese Hypothese. Einstein deutete jene Bewegung nun als das Resultat bzw. die Summe der Zufallsbewegung unzähliger und selbst nicht mehr sichtbarer Wassermoleküle. Die quantitativen Vorhersagen Einsteins deckten sich mit empirischen Messungen und stellten somit einen indirekten Hinweis auf die Existenz jener Wassermoleküle dar.

betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“,[63] welcher für die hiesige Fragestellung von besonderer Bedeutung ist, setzt sich mit der Frage nach dem Wesen des Lichts auseinander. In einer scharfsinnigen Deduktion, die wie im Falle der Planckschen Behandlung des Problems der Hohlkörperstrahlung von den Prinzipien der statistischen Thermodynamik ihren Ausgang nimmt, entwickelt Einstein dort die der Wellentheorie des Lichts zuwiderlaufende Vorstellung, dass das Licht selbst, d.h. die sogenannte freie Strahlung aus einzelnen, quasi korpuskularen Energieelementen der Größe $h \cdot \nu$ bestehe, welche sich als autonome „Lichtquanten“ durch den Raum bewegen.

In vielen systematischen Darstellungen wird der besagte Aufsatz hinter der Entdeckung der Naturkonstanten h durch Max Planck als der zweite Meilenstein auf dem Weg zur vollständig entwickelten Quantentheorie aufgefasst, doch diese retrospektiv und aus systematischen Gründen vorgenommene Würdigung findet in der Reaktion der Zeitgenossen seltsamerweise keinen Widerhall. Man könnte sogar behaupten, dass aus heutiger Sicht die Theorie Einsteins ihren revolutionären Charakter nicht zuletzt dem Umstand zu verdanken hat, dass sie sich im Jahre 1905 fast wie ein physikalischer Anachronismus ausnehmen musste. Zu diesem frühen Zeitpunkt waren seine Thesen für den Großteil der Physikergemeinde jedenfalls viel zu radikal, als dass man sie einer näheren Betrachtung für Wert gehalten hätte. Noch im Jahre 1913 wird in dem von Max Planck mitverfassten Gutachten zur Ernennung Einsteins zum Mitglied der preußischen Akademie der Wissenschaften die Idee der Lichtquanten als eine Spekulation bezeichnet werden, mit der der Kandidat „auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag“. Dies dürfe man ihm aber nicht allzu sehr anrechnen: „Denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, läßt sich auch in der exaktesten Wissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.“[64]

[63] Vgl. Einstein (1905a)
[64] Zitiert nach Stachel (1989), Bd. 5, S. 527.

3.2.1 Lichtquanten als thermodynamische Konsequenz

Dass Albert Einstein seine bahnbrechende Arbeit zur Lichtquantenhypothese bereits zu einer Zeit veröffentlichen konnte, in der die vorliegenden experimentellen Befunde zur Konstitution der Strahlung und ihrer Wechselwirkung mit Materie noch hinreichend unübersichtlich und in ihrer Interpretation umstritten waren, findet seinen tieferen Grund vor allem darin, dass ihm in erster Linie nicht an einer Deutung dieser empirischen Daten gelegen war, sondern vielmehr an einer genauen und konsequenten Analyse der von Planck eingeführten thermodynamischen Behandlung elektromagnetischer Energie. Dieser hatte bekanntlich nur unter größtem Widerstreben eine der klassischen Theorie des Lichts vollkommen zuwiderlaufende Quantelung der Energie vornehmen müssen, deren Größe durch die fundamentale Naturkonstante h vorgegeben ist, ohne dass es ihm jedoch gelungen wäre, den tieferen Sinn dieser scheinbar unausweichlichen Maßnahme zu verstehen. Für Planck stellte die Elektrodynamik Maxwells nach wie vor das sichere und unantastbare Fundament der Strahlungstheorie dar, in welches das sperrige Wirkungsquantum auf irgendeine Weise integriert werden musste, ohne dass abzusehen gewesen wäre, wie.

Einstein fasste nun gerade den umgekehrten Gedanken: Könnte es nicht sein, so seine Idee, dass die Energiequanten das eigentliche Wesen der Strahlung ausmachen, und die klassische Beschreibung des Lichts als elektromagnetische Welle nur auf die zeitlichen Mittel der Bestimmungsgrößen, nicht jedoch auf deren jeweils aktuelle Werte bezogen werden kann? In diesem Falle wäre die klassische Elektrodynamik keineswegs hinfällig, würde aber den Charakter einer Fundamentaltheorie einbüßen.

„Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichts hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das Experiment wohl denkbar, das die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Theorie des Lichts zu Widersprüchen mit der Erfahrung führt, wenn man sie auf die Erscheinungen der Lichterzeugung und Lichtverwandlung anwendet.“[65]

[65] Einstein (1905a), S. 132.

Einstein geht nun in seiner Begründung von der bereits von Planck eingeführten Möglichkeit aus, die Entropie der Strahlung gleich der Entropie eines Gases als Wahrscheinlichkeit zu deuten. Dabei gelangt er zu dem Ergebnis, dass in vollkommener Analogie zu den Berechnungen der Thermodynamik die Entropie einer elektromagnetischen Strahlung mit der Größe des betrachteten Volumens variiert.

Befinden sich beispielsweise eine große Zahl von Gasmolekülen, die beständig elastische Stöße untereinander und mit der Wandung ausführen und demnach in steter Bewegung sind, in einem bestimmten Raum der Größe V_0, so ist die Entropie des Systems maximal, wenn sich die Korpuskeln vollkommen gleichmäßig verteilt haben und die Wahrscheinlichkeit, zu einem frei gewählten Zeitpunkt ein Teilchen anzutreffen, an allen Stellen des Raumes gleich groß ist. Dieser Wert für die maximale Entropie wird aufgrund der Zufallsbewegungen der Teilchen schwanken, doch diese Variabilität ist in Systemen mit hinreichend großer Zahl der Komponenten sehr gering. Betrachtet man nun einen kleinen Teilbereich V desselben Raumes, so wird hier die Entropie viel stärkeren Schwankungen unterworfen sein, denn die Trajektorien einzelner Teilchen spielen jetzt eine ungleich größere Rolle. Je kleiner der ausgewählte Teilbereich V relativ zum Gesamtvolumen V_0, desto stärker ist dieser Effekt. Ähnlich einem Ameisenhaufen, der von großer Entfernung eine homogene Konsistenz zu haben scheint und der bei näherer Betrachtung sich als vollkommen ungleichförmig und in beständiger Bewegung befindlich präsentiert, so hängt die Entropie und mit dieser die Verteilung der kinetischen Energie eines Systems von der Größe des betrachteten Teilvolumens ab. Einstein überträgt nun das thermodynamische Modell eines Gases auf den Fall elektromagnetischer Strahlung und gelangt im Zuge seiner Berechnung zum Schluss, dass monochromatische Strahlung von geringer Dichte „sich in wärmetheoretischer Beziehung so [verhält], wie wenn sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten von der Größe $R\beta\nu/N$ bestünde.“[66] Der Ausdruck „$R\beta\nu/N$“ ist in heutiger Schreibweise als „$h\cdot\nu$“ bzw. „$h\cdot f$“ zu lesen, d.h. die Energie eines solchen Quants ist gegeben durch das Produkt aus dem Planckschen Wirkungsquantum und der Frequenz der betrachteten Strahlung.

Diese Rehabilitation der korpuskularen Lichtvorstellung fußte, wie bereits erwähnt, auf einer Anwendung der statistischen Thermodynamik auf den Fall elektromagnetischer Energie im Strahlungsfeld, und Einstein hatte in dem zur gleichen Zeit erschienenen

[66] Einstein (1905a), S. 143.

Aufsatz zur Deutung der Brownschen Molekularbewegung[67] mit dazu beigetragen, die theoretischen Fundamente der Methode Boltzmanns, d.h. vor allem die Hypothese von der Existenz realer Moleküle und Atome, weiter zu festigen. Doch auch die im Jahre 1905 publizierte Spezielle Relativitätstheorie trug entscheidend zur Entwicklung der Lichtquantenhypothese bei, obwohl diese Verbindung auf den ersten Blick nicht besonders nahezuliegen scheint. Bei näherer Betrachtung sind es jedoch zwei grundlegende Postulate, die den direkten Zusammenhang vermitteln: Die These von der Entbehrlichkeit des Äthers und die Idee von der Äquivalenz von Energie und Masse, welche in der berühmt gewordenen Relation $E=mc^2$ zum Ausdruck kommt.

[67] Vgl. Einstein (1905b)

3.2.2 Lichtquantenhypothese und Spezielle Relativitätstheorie

Die klassische Wellentheorie, die ausgehend von der Entdeckung der Interferenz kohärenten Lichts in der Elektrodynamik Maxwells ihren krönenden Abschluss fand, musste, wie bereits erwähnt, die Existenz eines universellen Trägermediums postulieren, um die Ausbreitung der Wellen im Raum erklären zu können. Mit der Erweiterung des Spektrums um die für das Auge unsichtbaren ultravioletten und infraroten Strahlen und die von Heinrich Hertz entdeckten Radiowellen wurde dieses ätherische Medium zu einem der universellsten und leistungsfähigsten Prinzipien der Physik, was manche Naturforscher sogar dazu verleitete, darüber zu spekulieren, ob nicht auch die „gewöhnliche“ Materie letztlich in nichts anderem bestünde, als bestimmten dynamischen Zuständen dieses Urstoffes.[68]

Dieser Universalität stand aber zur Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert die immer noch ungelöste Frage nach einem physikalischen Modell gegenüber, welches in der Lage gewesen wäre, die von der Empirie geforderten und sich hinreichend widersprechenden Eigenschaften dieser Substanz miteinander zu versöhnen. Da waren zum einen materialspezifische Schwierigkeiten, die extreme Dünnflüssigkeit des Äthers mit der zur verlustfreien Übertragung sehr schneller Wellen erforderlichen Härte in Einklang zu bringen. Zum anderen gab dessen kinematisches Verhalten den Physikern Rätsel auf, was sich vor allem in der Unfähigkeit dokumentierte, Relativbewegungen zum Äther ausfindig zu machen.

Diese Experimente setzten in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ein und gründeten sich auf die naheliegende Annahme, dass die Bewegung des Trägermediums der Lichtwellen relativ zu einem als ruhend gedachten Beobachter eine messbare Auswirkung auf deren Geschwindigkeit haben müsste und dass es mittels einer geeigneten Anordnung möglich sein sollte, Hinweise auf den Zustand des omnipräsenten Lichtäthers zu erlangen. Diese Untersuchungen waren für die Grundlagen der Mechanik von enormer Bedeutung, denn sie eröffneten die Möglichkeit, die bisher eher theoretische Frage nach der Existenz besonders ausgezeichneter Bezugssysteme zum Gegenstand experimenteller Forschung zu erheben.

---

[68] Vgl. oben bereits (Anm. 34) zitierte Passage von Heinrich Hertz.

Die Suche nach einem absoluten Bezugssystem gleicht ein wenig dem sprichwörtlich gewordenen Problem des Archimedes, dem es bekanntlich nur eines einzigen, absolut festen Punktes ermangelte, um mit diesem als Widerlager die ganze Welt aus den Angeln zu heben. Auf die Kinematik bezogen, würde das Vorkommen eines in unbedingter Ruhe befindlichen Punktes die Etablierung eines Koordinatensystems ermöglichen, in bezug auf welches sich für jeden anderen Körper entscheiden ließe, ob er wirklich ruhe oder sich bewege.

Zu Beginn der Neuzeit stand diese Idee bekanntlich im Spannungsfeld zwischen naturwissenschaftlicher Kosmologie und theologisch fundierter Weltdeutung und bereits Galilei verfiel im Rahmen des Streits um die Weltsysteme auf den Gedanken, eine Bewegung könne nicht absolut, sondern immer nur relativ zu einem frei wählbaren Bezugssystem bestimmt werden, so dass weder dem angenommenen Mittelpunkt des Alls, noch den räumlichen Verschiebungen der Planeten eine vom jeweiligen Beobachter unabhängige Bedeutung beigelegt werden kann.

In der Mechanik Newtons wurde dieses Postulat dahingehend erweitert, dass tatsächlich unendlich viele Systeme existieren, in welchen die Gesetze der Mechanik uneingeschränkte Gültigkeit besitzen – sogenannte Inertialsysteme[69] – und dass zwei Beobachter, die in solchen, in gleichförmiger Relativbewegung befindlichen Systemen lokalisiert sind, mittels keiner mechanischen Experimentalanordnung herauszufinden vermögen, wer von beiden sich wirklich bewegt. Newton versuchte trotz dieser später „Relativitätsprinzip“ genannten These den physikalischen Raum selbst als in absoluter Ruhe befindlich und demnach als besonders ausgezeichnetes Koordinatensystem aufzufassen, doch handelte es sich hierbei um keine Aussage von empirischem Gehalt, d.h. Newton konnte keine Kriterien nennen, anhand deren man eine Relativbewegung zum absoluten Raum hätte nachweisen können.[70]

---

[69] Ein „Inertialsystem“ ist ein physikalisches Bezugssystem, in welchem der Trägheitssatz uneingeschränkte Gültigkeit besitzt: Ein in einem solchen System befindlicher Körper verharrt ohne Einwirkung einer Kraft für immer in seinem aktuellen Bewegungszustand (z.B. einer gleichförmigen Translationsbewegung). Alle Systeme, die sich in gleichförmiger (d.h. nicht beschleunigter) Relativbewegung zu einem Inertialsystem befinden, sind nach der klassischen Mechanik wiederum ein solches.

[70] Newton glaubte, die Trägheit der Masse als ein Anzeichen der Anwesenheit des absoluten Raumes werten zu können, doch dieser Effekt ist in allen Inertialsystemen derselbe und in seiner Ausprägung von keiner hypothetischen „Absolutbewegung“ abhängig. Newton war aber offenbar der Ansicht, dass selbst dann, wenn im ganzen Universum nur ein einziger materieller Körper existierte, dieser sich dennoch einer Beschleunigung widersetzen müsste und dass dieser Effekt des Widersetzens dann nur in bezug auf den Raum selbst vorgestellt werden kann. Diese These ist aber durchaus fragwürdig und u.a. von Ernst Mach kritisiert worden, welcher für die Trägheit einer Masse die Anwesenheit der restlichen kosmischen Materie verantwortlich machen wollte.

Mit der sich im 19. Jahrhundert allgemein durchsetzenden Wellentheorie des Lichts rückte nun die interessante Frage in den Fokus des Interesses, ob nicht zumindest hinsichtlich der optischen Erscheinungen das Relativitätsprinzip aufgegeben werden müsste, denn es stand zu erwarten, dass sich die empirisch gemessene Geschwindigkeit des Lichts in Abhängigkeit von der Relativbewegung des jeweiligen Beobachters gegen das Trägermedium verändern sollte. Dies hätte die Möglichkeit eröffnet, mit dem Lichtäther wieder ein absolutes und universelles Bezugssystem einzuführen, denn diesen stellte man sich als homogen und seinerseits unbewegt vor.[71]

Man kann nun an dieser Stelle zwei Entwicklungsstränge unterscheiden, welche sowohl im experimentellen Bereich als auch auf dem Gebiet der deduktiv verfahrenden Theorie die Physik in eine höchst prekäre Situation manövrierten – eine Krise, die das gesamte Gebäude der klassischen Mechanik bis in die Grundfesten zu erschüttern drohte.

Was die experimentelle Seite dieses Krisenphänomens betrifft, so förderten die mittels immer ausgefeilterer Methoden angestellten Versuche, die Auswirkungen möglicher Relativbewegungen zum Äther ausfindig zu machen, höchst widerspüchliche Ergebnisse zutage. Es ließ sich z.B. zweifelsfrei zeigen, dass die Strömung des Wassers, durch welches man in Fließrichtung einen Lichtstrahl schickte, einen merklichen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieses Lichts hat, was man sich nur dadurch erklären konnte, dass der darin befindliche Äther bis zu einem gewissen Grade, aber nicht gänzlich, an der Bewegung der Flüssigkeit teilnimmt, d.h. partiell von dieser mitgeführt wird.[72] Man hätte daraufhin erwarten sollen, dass jener Befund auch für die gesamte Erde zutrifft, so dass sich in Bewegungsrichtung ihrer jährlichen Bahn um die Sonne und im rechten Winkel zu dieser eine jeweils andere Lichtgeschwindigkeit einstellen sollte, doch seltsamerweise war kein derartiger Effekt zu entdecken. Selbst die genauesten Messungen[73] ließen gegen Ende des 19. Jahrhunderts kaum mehr einen Zweifel daran, dass die auf der Erde gemessene Lichtgeschwindigkeit in allen Raumrichtungen und unabhängig vom Bewegungszustand

---

[71] Diese Hypothese gründet sich auf die Annahme, dass eine beschleunigte Bewegung des Äthers im Kosmos (z.B. eine kreisförmige Bewegung) einen merklichen Einfluss auf die Vermittlung des Lichts sehr weit entfernter Sterne haben müsste. Derartige „Lichteffekte“ sind jedoch nicht zu beobachten, d.h. das Sternenlicht scheint aus allen Raumrichtungen und über längere zeitliche Perioden hinweg in unveränderter Form zur Erde zu gelangen.

[72] Diese Versuche wurden 1851 von dem französischen Physiker Armand Hippolyte Fizeau (1819-1896) durchgeführt.

[73] Hier sind die von Abraham Michelson und Edward Morley in den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts begonnenen Interferometer-Experimente zu nennen. Ein Interferometer macht sich die Möglichkeit der Interferenz von Lichtwellen zunutze und erreicht aufgrund der enorm kleinen Wellenlänge des Lichts sehr große Genauigkeiten bei der Messung geringster Geschwindigkeitsunterschiede des auf verschiedenen Wegen (in der Regel zwei Strahlen im Winkel von 90 Grad) geführten Lichts.

des Planeten stets dieselbe ist,[74] und dass dies auch für das Licht kosmischer Objekte gilt, die sich zum Teil in erheblichen Relativbewegungen zu unserem Planeten befinden.[75] Bis zur Veröffentlichung der Speziellen Relativitätstheorie Einsteins im Jahre 1905 war es trotz einiger erfolgversprechender Ansätze[76] nicht gelungen, diese scheinbar inkompatiblen Resultate unter dem Dach einer konsistenten Theorie zu vereinigen.

Jenseits der Bemühungen um die Interpretation experimenteller Daten hatten sich aber auch im Bereich der theoretischen Physik erste Inkonsistenzen angedeutet, die für die Genese der späteren Überlegungen Einsteins von ungleich größerer Bedeutung waren, als das zähe Ringen um die empirische Messung der Ätherbewegungen. Der Ausgangspunkt dieser Probleme findet sich inmitten der Maxwellschen Theorie, in welcher wie bereits oben ausgeführt, mit der Reduktion der Optik auf die Elektrodynamik erstmals die theoretische Vereinigung zweier ehemals autonomer physikalischer Disziplinen gelungen war. Maxwell hatte zu Beginn seiner Untersuchungen nicht damit rechnen können, dass sich diese Option einmal ergeben würde, und ursprünglich nur auf eine vereinfachende Synthese der bereits vorliegenden Gesetze des Magnetismus und der Elektrizität abgezielt. Bis zur Entdeckung der Möglichkeit elektromagnetischer Ätherwellen und der Deduktion ihrer Geschwindigkeit hatte sich seine Arbeit in einer gewissen Unabhängigkeit von der Debatte um die Relativbewegungen des Äthers vollzogen, doch spätestens ab diesem Zeitpunkt war die enge Verbindung zum Bewegungsproblem unübersehbar.

Nach der vereinigten elektrodynamischen Theorie stehen die Beträge der elektrischen und magnetischen Feldkonstanten (ε_0 und μ_0) in direktem Zusammenhang mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts, was scheinbar unausweichlich dazu führt, dass

---

[74] Um genau zu sein, müsste man hier von der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum sprechen. In allen anderen lichtdurchlässigen und isotropen Medien (z.B. auch in der Luft) weicht die Lichtgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom jeweiligen Brechungsindex von dieser Vakuum-Geschwindigkeit ab, ist aber ebenfalls in jeder räumlichen Richtung von gleichem Betrag.

[75] Die Geschwindigkeit dieses Lichts ist nicht verändert, wie man nach der klassischen Kinematik erwarten sollte, sondern nur dessen Frequenz. Gleich dem aus der Akkustik bekannten „Doppler-Effekt“ vergrößert sich die Wellenlänge des Lichts von Objekten, die sich von der Erde entfernen, in linearer Abhängigkeit von deren relativer Geschwindigkeit und verkleinert sich im umgekehrten Falle. Am eindringlichsten lässt sich dies an Doppelsternsystemen zeigen, die aus zwei Objekten bestehen, die umeinander rotieren. Bei entsprechender räumlicher Lage bewegt sich immer einer der beiden Sterne auf die Erde zu, während der jeweils andere sich entfernt. Die Frequenzen des emittierten Lichts verschieben sich im Rotationsrhythmus, obwohl dessen Geschwindigkeit stets dieselbe bleibt.

[76] Der niederländische Physiker Hendrik Antoon Lorentz hatte gegen Ende des 19. Jahrhunderts eine Theorie entwickelt, die unter der Annahme eines absolut ruhenden Äthers die meisten der bis dato angesammelten experimentellen Befunde erklären konnte (die sogenannten „Effekte erster Ordnung“). Die enorme Genauigkeit des Michelson-Morley-Interferometers reichte jedoch dazu hin, die Lorentzsche Theorie zu widerlegen, da nach dieser sogenannte „Effekte zweiter Ordnung“ zu erwarten waren, die jetzt jedoch nachweislich fehlten. Alle bisherigen Versuche hatten aufgrund ihrer mangelnden Genauigkeit für diese Frage keine Relevanz. Die Darstellung und Begründung jener subtilen Unterscheidung zwischen Effekten erster und zweiter Ordnung kann hier entfallen. Der interessierte Leser sei z.B. auf Born (2003), S. 101-110 verwiesen.

deren empirische Bestimmung von der Bewegung des Messgerätes gegen den Äther abhängen muss. Das Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik wäre dann hinsichtlich der optischen bzw. elektrodynamischen Phänomene verletzt, denn ein Beobachter könnte anhand einer solchen Messung definitiv entscheiden, ob er sich in absoluter Ruhe befinde oder nicht; es gäbe nicht mehr unendlich viele, sondern nur noch *ein* wirkliches Inertialsystem, nämlich dasjenige, in dem der Äther ruht.

Wollte man sich aber mit dieser Konsequenz nicht abfinden, und an der Idee unendlich vieler absolut gleichberechtigter Inertialsysteme festhalten, so sähe man sich mit dem Umstand konfrontiert, dass mit den jetzt beobachterunabhängigen Werten von ε_0 und μ_0 seltsamerweise auch eine in all diesen Systemen konstante Lichtgeschwindigkeit einhergeht; und das unabhängig vom Ausmaß der jeweiligen Relativbewegung von Sender und Empfänger sowie gänzlich unbeeinflusst vom Zustand des Äthers. Diese verwickelte Situation gleicht der sprichwörtlichen Wahl zwischen Pest und Cholera, und es bedurfte, wie Max Born später feststellen wird, einer „erhabene[n] Freiheit von den Konventionen der überkommenen Theorie, die erst dann möglich ist, wenn der gordische Knoten von Konstruktionen und Hypothesen so verwickelt geworden ist, daß das Durchhauen die einzige Lösung bleibt.“[77]

Betrachtet man nun die Voraussetzungen der Speziellen Relativitätstheorie, in welcher Albert Einstein im Jahre 1905 den sprichwörtlichen Knoten zu durchtrennen suchte, so sind es lediglich zwei scheinbar unvereinbare Prämissen, deren zwangsweise Zusammenführung den Schlüssel zur Auflösung der quälenden Paradoxien darbot: Die gleichsam apriorische Geltung des Relativitätsprinzips und dessen Ausweitung auf die gesamte Physik sowie die These von der für alle Beobachter stets konstanten Vakuumlichtgeschwindigkeit.

„[…] die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum ´Lichtmedium´ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden ´Prinzip der Relativität´ genannt wird) zur Voraussetzung

[77] Born (2003), S. 123.

erheben, und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche Voraussetzung einführen, daß sich das Licht im leeren Raume stets mit einer bestimmten, vom Bewegungszustande unabhängigen Geschwindigkeit *V* fortpflanze.“[78]

Einstein hatte schon in frühen Jahren die Anwendbarkeit des klassischen Additionstheorems für Geschwindigkeiten[79] auf den Gegenstand der Maxwellschen Ätherwellen in Zweifel gezogen, und darüber spekuliert, ob ein Beobachter, der sich mit Lichtgeschwindigkeit neben einer solchen Welle herbewegte, gleichsam ruhendes Licht wahrnehmen könnte, und wie dieses dann wohl aussähe.[80] In der 1905 veröffentlichten Relativitätstheorie wird nun gerade die Existenz extrem verlangsamter oder sogar im Raume erstarrter Ätherwellen als unmöglich deklariert und deren Geschwindigkeit als konstant angenommen. Die sich daraus ergebenden Paradoxien werden mittels einer operationalistisch motivierten Erneuerung der physikalischen Begriffe von Raum und Zeit aufgelöst: Zeit ist dann lediglich das, was eine Uhr misst und Raum (d.h. Länge, Breite, Tiefe) dasjenige, was nur durch direkten Vergleich mit einem materiellen Maßstab bestimmt werden kann. Da eine Geschwindigkeit durch den Quotienten aus Raum und Zeit gegeben ist, kann die stets gleiche des Lichts auch dadurch konsistent erklärt werden, dass sich in relativ zum Beobachter bewegten Systemen die Maßstäbe ändern, d.h. Uhren „langsamer“ laufen und Referenzlängen in Bewegungsrichtung zusammenschrumpfen. Jedes Inertialsystem hat dann seine eigene Zeit und sein eigenes Raummaß und über die Invariante der Lichtgeschwindigkeit sind all diese Maße ineinander transformierbar.

Ohne hier auf die Details der Speziellen Relativitätstheorie weiter einzugehen, zeigt sich in diesem Kunstgriff jedoch ein wichtiger Gedanke, der für die Entwicklung der Lichtquantenhypothese von Bedeutung ist: Obwohl der Äther mit den grundlegenden Postulaten der Theorie Einsteins streng genommen nicht in Konflikt gerät, verliert er dennoch seine bisherige Rolle als vermeintlich absolutes Bezugssystem und wird somit für die Physik entbehrlich. Man mag sich weiterhin die Frage nach seiner Existenz bzw. seinem Bewegungszustand stellen, doch kein empirisches Experiment, so die Prognose der

---

[78] Einstein (1905c), S. 891f.

[79] Die klassische Kinematik steht hier in völliger Übereinstimmung mit dem Alltagsverstand: Bewegt sich ein Passagier innerhalb eines Zuges, der mit 100 km/h auf einer geraden Strecke unterwegs ist, mit 5 km/h in Fahrtrichtung durch den Waggon, so ist seine Relativgeschwindigkeit zum einem neben der Strecke ruhenden Beobachter 100km/h+5km/h=105 km/h.

[80] Umgekehrt kann man, da die Situation nach den klassischen Bewegungsgesetzen anaolg ist und vielleicht weniger utopisch anmutet, auch fragen, ob eine Taschenlampe, die sich in rückwärtiger Richtung leuchtend mit Lichtgeschwindigkeit von einem irdischen Beobachter entfernte, diesem gleichsam ruhendes bzw. auf der Stelle stehendes Licht hinterlassen könnte.

Relativitätstheorie, wird in der Lage sein, diese Frage zu entscheiden. In allen Inertialsystemen haben genau die gleichen optischen Gesetze zu gelten, und in diesen ist nun auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts als beobachterunabhängige Konstante festgelegt. Damit erhält das Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik seine axiomatische Geltung zurück, und der Äther wird als funktionslose Entität zum prominenten Opfer des Ockhamschen Ökonomieprinzips.

Für Einstein sind es neben den bereits vorgestellten thermodynamischen Argumenten auch die Grundsätze der Speziellen Relativitätstheorie, die entscheidend zur Plausibilität seiner Lichtquantenhypothese beitragen. Nach der Abschaffung des Trägermediums der Lichtwellen steht deren physikalische Realität grundsätzlich in Frage, denn ohne Medium ist die Energieübertragung durch Wellen schlechterdings unvorstellbar. Um dem Phänomen dennoch gerecht werden zu können, scheint eine erneute Revision der physikalischen Theorie des Lichts unumgänglich, welche letztlich auf eine gewisse Rehabilitierung der bereits lange überwunden geglaubten korpuskularen Interpretation hinausläuft: „Die das Licht konstituierenden elektromagnetischen Felder erscheinen [...] nicht mehr als Zustände eines hypothetischen Mediums, sondern als selbständige Gebilde, welche von den Lichtquellen ausgesandt werden, gerade wie nach der Newtonschen Emissionstheorie[...]“[81]

Zwei Monate nach der Publikation der Speziellen Relativitätstheorie und der Lichquantenhypothese war im November 1905 eine kurze, nur dreiseitige Abhandlung erschienen, in der Einstein, auf den Prinzipien seiner vorherigen Arbeit aufbauend, nachweisen konnte, dass sich die träge Masse eines Licht aussendenden Körpers durch diese Emission um einen winzigen Betrag verringern muss, und dass diese Massenabnahme gegeben ist durch den Quotienten aus der emittierten Energie und dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit.[82] In formaler Schreibweise ausgedrückt gilt dabei die Relation: $\Delta m=E/c^2$, und durch einfache Umstellung: $E=\Delta m \cdot c^2$. Qualitativ bedeutet dies, dass elektromagnetische Strahlung in der Lage ist, träge Masse von einem Körper wegzutransportieren und demnach selbst eine ihres Energiegehaltes proportionale Masse besitzt, wenn diese auch durch das im Nenner des Bruchs befindliche c^2 fast unmessbar

[81] Einstein (1909), S. 487.
[82] Vgl. Einstein (1905d)

klein ausfällt.[83] Da aus der thermodynamischen Betrachtung der Strahlungsenergie bereits die Konsequenz abgeleitet wurde, dass sich diese so verhält, als bestünde sie aus diskreten Lichtquanten der Energie $E=h\cdot\nu$, so folgt aus $E=h\cdot\nu$ und $E=m\cdot c^2$ durch Gleichsetzen der Schluss, dass jedes Lichtquant die Masse $h\cdot\nu/c^2$ besitzt. Der Impuls p, der bekanntlich das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit ist, ergibt sich ebenfalls durch eine einfache Überlegung: $p=m\cdot v$ und da $v=c$ und $m=h\cdot\nu/c^2$ folgt $p=h\cdot\nu/c$. Lichtquanten bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit c und tragen den Impuls $p=h\cdot\nu/c$.

Man könnte nun vermuten, dass dies alles dafür spräche, Lichtquanten einfach als kleine materielle Korpuskel zu betrachten, z.B. als miniaturisierte Billardkugeln oder dergleichen, doch scheint das Auftreten des Symbols ν, mit welchem bekanntlich die Oszillationsfrequenz elektromagnetischer Wellen gegeben ist, ein ausschließlich korpuskulares Bild jener Objekte zu verhindern. Bevor auf die damit im Zusammenhang stehenden Schwierigkeiten weiter eingegangen wird, sollen nach der Darlegung der theoretischen Argumente zunächst einmal einige ausgewählte empirische Anhaltspunkte vorgeführt werden, denn es waren letztlich jene experimentellen Resultate, infolge deren viele Physiker ihren anfänglichen Widerstand gegen die weitreichenden Thesen Einsteins nach und nach aufgaben.

---

[83] Würde man annehmen, dass die komplette Leistung einer 100-Watt-Glühbirne in Form elektromagnetischer Wellen (sichtbares und unsichtbares, d.h. vor allem infrarotes Licht) abgestrahlt wird, so würde diese in einer Sekunde die Energie von 100 Wattsekunden = 100 Joule emittieren. Über $m=E/c^2$ ergäbe sich eine korrespondierende Masse von $100J/90.000.000.000.000.000(m^2/s^2)$ = 0,000.000.000.000.001kg = 0,000.000.000.001g. Demnach verlässt diese Glühbirne pro Sekunde eine Masse von ca. 1 Pikogramm. Um auf die Menge von einem Gramm zu kommen, müsste die Birne ca. 31700 Jahre ununterbrochen brennen!

3.3 Experimentelle Befunde und die Lichtquantenhypothese

Auch ohne eine physikalische Theorie dies Lichts zu besitzen, ist bereits im Rahmen alltäglicher Erfahrung feststellbar, dass von diesem kausale Wirkungen ausgehen, die sich beispielsweise in der langsamen Erwärmung stark beleuchteter Körper dokumentieren. Es gehört ebenfalls zum Bestand des gemeinen Wissens, dass längere Aufenthalte im Sonnenlicht zu schmerzhaften Verbrennungserscheinungen der Haut führen können, und dass dies auch und besonders ausgeprägt im Hochgebirge geschehen kann, obwohl die wärmende Wirkung der Strahlung hier nur sehr schwach oder sogar gar nicht mehr wahrzunehmen ist. Man könnte demnach auf den allgemeineren Gedanken verfallen, dass Licht in irgendeiner Form Energie überträgt und sich fragen, auf welche Weise genau dies vonstatten gehe.

Nach dem von der klassischen Physik entwickelten Modell wird Licht bekanntlich als Transversalwelle in einem zugehörigen Trägermedium aufgefasst, und kann deshalb mathematisch in ähnlicher Weise behandelt werden, wie andere mechanische Schwingungen und Wellen. Auch die Theorie Maxwells, in welcher das Licht als elektromagnetische Welle aufgefasst wird, änderte nichts an dieser Möglichkeit, denn auch die differentielle Beschreibung des zeitlichen Verhaltens und der gegenseitigen Beeinflussung dieser Felder stand in einer unübersehbaren Analogie zur Mathematik eines Federpendels oder anderer mechanischer Oszillatoren.[84] Um nun die zu Beginn des 20. Jahrhunderts diskutierten empirischen Evidenzen einschätzen zu können, die diese Konzeption des Lichts nach fast 100 Jahren ihres unangefochtenen Erfolges schließlich als unzulänglich erweisen sollten, ist es an dieser Stelle angebracht, kurz auf die allgemeine Theorie mechanischer Wellen einzugehen.

Eine Welle wird in der Regel durch einen Oszillationsvorgang generiert, der sich auf ein Medium überträgt, welches diesen über eine zeitlich verzögernde elastische Koppelung an die jeweils benachbarten Regionen weitervermittelt. Es entsteht eine Wellenfront, die sich mit einer von den mechanischen Eigenschaften des Mediums abhängigen Geschwindigkeit

---

[84] Beispielsweise wird im Falle der harmonischen Schwingung eines an einer Schraubenfeder aufgehangenen Gewichts die Energie des Systems ständig zwischen potentieller Lageenergie und kinetischer Bewegungsenergie hin und her transformiert. Am oberen und am unteren Totpunkt ist die kinetische Energie „Null“ und die potentielle (oben durch Gravitation, unten durch die Federkraft verursacht) Energie maximal. In der Mittelpunktslage verhält sich diese Verteilung genau umgekehrt. Auf ähnliche Weise stellt sich bei elektromagnetischen Wellen der Zusammenhang zwischen der Energie des elektrischen und derjenigen des magnetischen Feldes dar.

in den umgebenden Raum ausbreitet. Vereinfachend könnte man sagen, dass eine Welle eine auf räumliche Dimensionen gestreckte Schwingung ist, die das zeitliche Nacheinander derselben in ein räumliches Nebeneinander transformiert. Dieses Auseinanderziehen der Bewegung hat zur Folge, dass in jedem vollständigen Element der räumlichen Figur, bestehend aus einem Wellenberg und einem darauffolgenden Tal, eine bestimmte Menge Energie gespeichert ist, die infolge der Ausbreitung des Wellenzuges vom Ausgangspunkt wegtransportiert wird. Der erregende Oszillator „strahlt“ also beständig Wellenenergie in den umliegenden Raum ab und würde, ohne dass diese aus externen Quellen ersetzt wird, relativ bald zur Ruhe kommen.

Die Gesetze, die die Entstehung und Ausbreitung von Wellen beschreiben, sind bereits in der klassischen Mechanik vollständig entwickelt. Es zeigt sich, dass die in einer Welle pro Zeiteinheit transportierte Energie proportional zum Quadrat der Amplitude und dem Quadrat ihrer Frequenz ist, wobei mit „Amplitude“ die maximal vorkommende Auslenkung relativ zur Ruhelage, und mit „Frequenz“ die Anzahl der vollständigen Schwingungen[85] pro Sekunde bezeichnet wird. Zwischen der räumlichen Länge einer kompletten Oszillation (λ), deren Frequenz[86] (f) und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit (v) gelten folgende einfache Beziehungen: $\lambda=v/f$, $f=v/\lambda$ und $v=\lambda\cdot f$. Am Beispiel von Wasserwellen kann man sich nun weitere Eigenschaften dieser Gebilde vor Augen führen, die vor allem die Art und Weise ihrer Energieübertragung betreffen und welche hinsichtlich der Diskussion bestimmter empirischer Daten von Bedeutung sein werden.

Wasserwellen, wie man sie nach dem Wurf eines Steines auf der Oberfläche eines ruhigen Teiches beobachten kann, sind ein leicht zu produzierendes und gut zu beobachtendes Phänomen. Ausgehend von dem Punkt des Eintauchens breitet sich ein kreisförmig geschlossenes Wellenpaket[87] in alle Richtungen der Ebene aus und schwächt sich dabei immer mehr ab. Da die Länge des Paketes in Ausbreitungsrichtung stets dieselbe bleibt, bildet sich um den Ursprungsort ein Kreisring von konstanter Breite, dessen horizontal projizierte Fläche stetig und direkt proportional zum Abstand vom Mittelpunkt anwächst.

---

[85] Überträgt man die Auslenkung eines Oszillators auf die Ordinate und die verstrichene Zeit auf die Abszisse eines Cartesischen Koordinatensystems, so besteht eine vollständige Schwingung in einer positiven und einer nachfolgenden negativen Auslenkung des Systems um jeweils maximal den Betrag der Amplitude. Danach ist ein vollständiger Zyklus durchlaufen und der Vorgang beginnt von Neuem.

[86] Alternativ zum Symbol „f“ für die Frequenz ist auch der griechische Buchstabe „ν“ (Nü) gebräuchlich. Wegen der möglichen Verwechselung mit dem lateinischen „v“ für die Geschwindigkeit der Welle wird hier „f“ verwendet.

[87] Da das Eintauchen des Steines ein einmaliges Ereignis ist, bilden sich nur wenige rasch versiegende Oszillationen des Wassers aus und es entsteht ein Wellenzug von endlicher Länge, ein sogenanntes Wellenpaket.

Nimmt man dabei idealisierend an, dass die Energie in der vom Wellenpaket eingenommenen Fläche gleichmäßig verteilt ist, so reduziert sich deren Dichte (gegeben als Energie pro Fläche oder „flächenbezogene“ Energie) ebenfalls proportional zur Entfernung vom Entstehungsort. Eine analoge Betrachtung der Energie von Lichtwellen muss nun berücksichtigen, dass hinsichtlich der Ausbreitungsmöglichkeiten eine weitere räumliche Dimension zur Verfügung steht, so dass sich um eine punktförmige Lichtquelle herum eine Wellenfront in Form einer konzentrischen Kugelschale ausbildet. Da nun die Oberfläche einer Kugel nicht linear sondern proportional zum Quadrat ihres Radius zunimmt, so reduziert sich die Energiedichte eines Wellenzuges der Kugelwelle (diesmal gegeben als Energie pro Volumeneinheit) in direkter Abhängigkeit vom Quadrat des Abstandes zum Mittelpunkt. An jeder parallel zur Wellenfront und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle ausgerichteten Fläche wird pro Zeitintervall und Größe der Fläche eine bestimmte Menge Energie abrufbar sein, die direkt proportional zur räumlichen Energiedichte der Welle ist, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit der letzteren als konstant angenommen wird. Die *Intensität* einer Kugelwelle (gegeben als Energie pro Zeit und parallel zur Wellenfront liegender Fläche) nimmt demnach mit dem Quadrat des Abstandes vom Urspungsort ab. Ähnliche Relationen gelten für alle radialsymmetrischen Felder der Physik, d.h. auch für die Gravitationswirkungen und die elektrostatischen Kräfte: Ihre Stärke variiert umgekehrt-proportional zum Quadrat des Abstandes der Probekörper.

Klassische Wellen können nun beliebige Energiegehalte haben, und bei entsprechender Distanz zum punktförmigen Ursprungsort von beliebig kleiner Amplitude sein. In vielen realen Medien (wie z.B. im Wasser) verlieren sie jedoch durch Reibungsverluste an Energie und werden nach relativ kurzer Strecke vollständig absorbiert. Dass das Licht unermesslich weit entfernter Sterne dennoch von der Erde aus sichtbar ist, kann im Rahmen der Theorie der Ätherwellen nur durch die zusätzliche Annahme verstanden werden, dass die inneren Reibungsverluste in diesem Medium vernachlässigbar klein sind oder sogar vollkommen fehlen müssen. Ätherwellen kommen damit dem theoretischen Modell quasi verlustfreier Wellenausbreitung sehr nahe und abgesehen von der schier unlösbaren Frage nach der eigentlichen Konstitution dieses Stoffes, zählte die klassische Optik zu den besten physikalischen Theorien ihrer Zeit. Seit den Interferenzversuchen Thomas Youngs, deren Resultate nach wie vor nicht anders als durch die Überlagerung

kohärenter Schwingungen gedeutet werden können, gelang auf der Grundlage der Wellenauffassung des Lichts die Erklärung aller damals bekannten optischen Erscheinungen: Reflexion, Beugung, Brechung, Doppelbrechung, Dispersion, Polarisation etc. Angesichts dieser Erfolge erscheinen die oben bereits zitierten Worte von Heinrich Hertz, der ja entscheidenden Anteil an der Vollendung der Undulationstheorie hatte, keineswegs überzogen oder gar leichtsinnig: „Die Wellentheorie des Lichts ist, menschlich gesprochen, Gewißheit.“[88]

Es war nun diese „Gewissheit“, welche die Interpretation derjenigen experimentellen Befunde, die schließlich zu ihrer eigenen Überwindung beitragen sollten, so lange belastete, bis aus vielen theoretischen und empirischen Bausteinen das Gebäude einer neuen Theorie errichtet werden konnte, und dieser Prozess zeigt viele Merkmale, die ihn als Musterbeispiel eines Kuhnschen Paradigmenwechsels qualifizieren. Allerdings sollen im gegenwärtigen Kontext die psychologischen und wissenssoziologischen Dimensionen dieses Geschehens nur am Rande Erwähnung finden und zugunsten einer eher systematischen Rekonstruktion in den Hintergrund treten, die dem tatsächlichen, jahrelangen zähen und vielleicht sogar schmerzhaften Ringen um eine konsistente Deutung der neueren Experimente natürlich nicht gerecht werden kann.

Als einen der ersten Schritte auf dem Weg zur Überwindung der klassischen Wellentheorie des Lichts kann man bereits die präzise Vermessung der Hohlkörperstrahlung ansehen, die sich, wie oben schon erwähnt, einer Deutung im Rahmen der Maxwellschen Elektrodynamik beständig widersetzte. Die von Max Planck ausgearbeitete theoretische Behandlung des Problems bediente sich zwar der Konzeption gequantelter Energie, doch die Frage nach der physikalischen Bedeutung dieses Verfahrens und der dabei neu eingeführten Naturkonstanten „h“ war damit keinesfalls beantwortet.

Die Inanspruchnahme diskreter Energiepakete im Rahmen der Lichtquantenhypothese Einsteins bewegte sich zunächst auf theoretischer Ebene und wurde aufgrund ihrer gewagten Postulate für längere Zeit kaum beachtet. Dass sich letztlich der revolutionäre Bruch mit den Prinzipien der klassischen Physik endgültig vollziehen konnte, liegt nicht zuletzt an ihrer bereits in der Publikation von 1905 erprobten Anwendung auf schon vorliegende experimentelle Daten und der Prognose einiger quantitativer Beziehungen, die sich im Verlauf der folgenden Jahre als zutreffend erweisen sollten.

---

[88] Vgl. Anm. 35.

3.3.1 Die Entdeckung des Elektrons und der fotoelektrische Effekt

Zu den allgegenwärtigen Instrumentarien der Elektrizitätsforschung zählten zur Mitte des 19. Jahrhunderts neben den Funkeninduktoren auch evakuierte bzw. teilevakuierte Glasröhren mit eingeschmolzenen elektrischen Kontakten, sogenannten Elektroden. Verband man diese mit einem Induktorium, welches als Hochspannungsquelle diente, so zeigten sich je nach Restdruck im inneren der Röhre unterschiedliche Leuchterscheinungen, deren jeweilige Interpretation Anlass zu vielen physikalischen Auseinandersetzungen bot. In den Gefäßen konnte nun im Zuge der Entwicklung immer besserer Vakuumpumpen der Gasdruck so weit reduziert werden, dass das Glimmen im Röhrenkörper mehr und mehr verblasste und sich an der der Kathode[89] gegenüberliegenden Glaswand ein diffuses, grünliches Licht einstellte. Es lag dabei die Vermutung nahe, dass dieses Phänomen durch von der Kathode ausgehende Strahlen verursacht wird, die beim Auftreffen auf die Wandung das dortige Glas zum leuchten anregen. Von dieser These ausgehend konnte der englische Physiker William Crookes (1832-1919) in zahllosen Experimenten zeigen, dass in den Strahlengang eingebrachte Gegenstände einen scharfen Schatten auf die Glaswand werfen, dort plazierte dünne Metallfolien bis zur Rotglut erwärmt werden und dass das Auftreffen dieser sogenannten „Kathodenstrahlen“[90] sogar kleine Flügelräder in Bewegung setzen kann, was Crookes als Anzeichen des materiellen Charakters der Strahlen wertete. Für ihn waren die Kathodenstrahlen ionisierte[91] und im elektrischen Feld zwischen den beiden Elektroden stark beschleunigte Gasmoleküle, die ihre kinetische Energie beim Einschlag in die Gefäßwand teilweise in sichtbares Licht verwandeln. Diese Korpuskularhypothese wurde von den meisten englischen Physikern geteilt, doch kann es nicht verwundern, dass vor allem in Deutschland die Neigung bestand, die Phänomene im inneren der evakuierten Glasröhren auf Ätherwellen zurückzuführen. Heinrich Hertz hatte zur Unterstützung seiner Annahmen zu zeigen vermocht, dass Kathodenstrahlen dünne Metallfolien nicht nur

---

[89] Mit „Kathode“ wird der negative Pol, mit dem Begriff „Anode“ der positive Pol einer Entladungsröhre bezeichnet.

[90] Der Begriff „Kathodenstrahlen“ wurde 1876 von dem dt. Physiker Eugen Goldstein (1850-1930) geprägt. Vgl. Meya/Siebum (1987), S. 254.

[91] Gasatome üben normalerweise keine elektrostatischen Kräfte aufeinander aus, d.h. sie erscheinen einem äußeren Beobachter als elektrisch „neutral“. Intern bestehen sie jedoch aus einem positiv geladenen Kern und einer negativ geladenen Hülle, deren Kraftwirkungen sich weitgehend kompensieren. Fügt man einem neutralen Gasteilchen von außen auf geeignete Weise soviel Energie zu, dass die negative Ladung ganz oder teilweise aus der Hülle entfernt wird, so ist das verbleibende Rumpfatom positiv geladen und reagiert entsprechend auf äußere elektrostatische Kraftfelder. Ein solches, geladenes Atom nennt man „Ion“ und den Vorgang seiner Erzeugung „Ionisation“.

erwärmen, sondern sogar durchdringen können, was als Widerlegung der Crookesschen Teilchenhypothese gewertet wurde. Materielle Korpuskel, so das Argument, hätten wohl angesichts einer immer noch mehrere Millionen Atomschichten dicken und als „massiv“ vorgestellten Metallwand kaum eine Chance, selbige ungehindert zu passieren.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts begann der englische Physiker Joseph John Thomson (1856-1940) sich mit Kathodenstrahlen zu beschäftigen. An äußerst hoch evakuierten Röhren hatte er bemerkt, dass die Strahlen elektrische Ladung transportieren und sich sowohl durch magnetische als auch elektrische Felder ablenken lassen. Dass geladene Teilchen in Anwesenheit eines Magneten eine Kraft erfahren, die rechtwinklig zu den Feldlinien desselben und ebenso rechwinkling zu ihrer jeweiligen Bewegungsrichtung wirkt, war eine aus der Maxwellschen Elektrodynamik sich ergebende Konsequenz. In einem von außen erzeugten homogenen Magnetfeld beschrieben die von Thomson untersuchten Kathodenstrahlen eine kreisförmige Bahn, deren Krümmungsradius nachweislich nicht von der Art bzw. der Masse des immer noch unvermeidlichen Restgases in der Röhre abhing. Auf diese Weise konnte er ausschließen, dass es sich, wie von Crookes vermutet, um einen Strahl geladener Gasmoleküle handelte, denn die Ausmaße der Kreisbahn hätten in Abhängigkeit von deren Masse variieren müssen.[92] Dennoch war offensichtlich, dass Kathodenstrahlen eine Masse haben und sich im Magnetfeld wie geladene Teilchen verhalten. Thomson konnte aus dem gemessenen Radius der Bahn, der angelegten Beschleunigungsspannung und der bekannten Stärke des äußeren Magnetfeldes die massenspezifische Ladung, d.h. das Verhältnis von Ladung und Masse der Korpuskeln berechnen und gelangte zu einem Wert, der mehr als 1000 Mal größer war als derjenige, den man in Elektrolyseversuchen am Element Wasserstoff gemessen hatte.[93] Entweder war die Ladung der Kathodenstrahlen etwa um diesen Faktor größer als die des Wasserstoffs, oder ihre Masse um mindestens denselben Faktor kleiner. Thomson entschied sich für letzteres und postulierte, dass alle in der Materie vorkommende elektrische Ladung an kleine Teilchen gebunden ist, welche als

---

[92] Die Kreisbahn ist das Resultat zweier Kräfte, die sich die Waage halten: Einerseits wirkt die aus der Elektrodynamik Maxwells hergeleitete und nach dem holländischen Physiker Hendrik Antoon Lorentz benannte „Lorentzkraft“ und andererseits die Fliehkraft bzw. Zentrifugalkraft kreisförmig bewegter Massen.

[93] Lässt man durch Salzsäure (HCl) einen elektrischen Strom fließen, so scheidet sich an der Anode Chlorgas und an der Kathode Wasserstoffgas ab. Es war nun durch Messungen diejenige Elektrizitätsmenge bekannt, deren es bedarf, um ein Gramm Wasserstoff abzuscheiden und damit die massenbezogene Ladung (spezifische Ladung) dieses Elementes. Weiterhin nahm man an (wie auch heute noch), dass Wasserstoff das leichteste der bekannten Elemente ist.

Kathodenstrahlen indirekt „sichtbar“[94] gemacht werden können und deren Masse über 1000 Mal kleiner ist als die des Wasserstoffatoms.

Obwohl sich diese These von „Subatomarteilchen“ zunächst nicht durchsetzen konnte, deuteten immer mehr experimentelle Befunde darauf hin, das Thomson in seinen Untersuchungen tatsächlich einen neuen Bestandteil der Materie entdeckt hatte, für den der irische Physiker George Johnstone Stoney bereits 1891 den Begriff „Elektron“ vorgeschlagen hatte. Diese Elektronen sollten die materiellen Trägerteilchen des elektrischen Stromes sein und aufgrund ihrer geringen Masse und der daraus erschlossenen Kleinheit auch problemlos dünne Metallschichten durchschlagen können, wie dies in den Hertzschen Versuchen bereits vorgeführt worden war.

In den Kathodenstrahlröhren konnten den dargestellten Experimenten zufolge beschleunigte Elektronen durch Wechselwirkung mit den Atomen des Restgases oder denjenigen der Glaswandung Wärme und sichtbares Licht erzeugen. Dass umgekehrt Licht Wärme erzeugen kann, bedurfte keines gesonderten Beweises, aber die weitere Frage danach, ob Licht nicht auch in der Lage sein könnte, unter geeigneten Bedingungen Kathodenstrahlen zu generieren, d.h. Elektronen aus ursprünglich elektrisch neutralen Stoffen herauszulösen, war zunächst noch unbeantwortet.

Erste Hinweise auf eine derartige Wechselwirkung zwischen Licht und Elektrizität waren bereits von Heinrich Hertz entdeckt worden.[95] Im Rahmen seiner Versuche mit sehr schnellen elektrischen Oszillationen, in denen sowohl am Induktorium des Sendekreises als auch in der Empfängerschleife Funkenstrecken positioniert waren, bemerkte er zufällig, dass das bläuliche Licht eines elektrischen Überschlages offenbar dazu geeignet ist, die Entladung an einer zweiten, davon unabhängigen Funkenstrecke zu begünstigen. Ausgehend von diesem ersten Befund untersuchte Hertz mit beeindruckender experimenteller Akribie das Phänomen aufs Genaueste und kam zu dem Schluss, dass nur der unsichtbare ultraviolette Anteil des Lichts als Auslöser des beschriebenen Effektes in Frage kommt, ohne dass klar gewesen wäre, wie die Wirkung der Strahlung genau

---

[94] Kathodenstrahlen im Hochvakuum sind selbst unsichtbar. Sie kollidieren jedoch in weniger stark evakuierten Gefäßen beständig mit den Atomen des Restgases, welche sie, sobald sie eine bestimmte Menge kinetischer Energie erreicht haben, zum Leuchten anregen können. Thomson ließ seinen Kathodenstrahl die Ebene einer mit Maßeinheiten versehenen Glasplatte streifen, auf welcher sich ihre Spuren als grün leuchtende Linien abzeichneten. Die Bildröhren bisher gebräuchlicher Fernsehgeräte und Computermonitore sind ebenfalls Kathodenstrahlröhren. Ein von hinten kommender Strahl wird durch magnetische Kräfte abgelenkt und zeilenweise über den vorderen Bildschirm geführt, der beim Auftreffen Licht aussendet.

[95] Vgl. Heinrich Hertz: Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtsauf die elektrische Entladung. In: Hertz (1988), Bd. 2, S. 69-86.

vonstatten geht: „Nach den Resultaten unserer Versuche hat das ultraviolette Licht die Fähigkeit, die Schlagweite der Entladungen eines Inductoriums und verwandter Entladungen zu vergrössern.[...] Ich beschränke mich [...] darauf, die festgestellten Thatsachen mitzutheilen, ohne eine Theorie über die Art, wie die beobachteten Erscheinungen zu Stande kommen, zu versuchen.“[96]

Elektrische Funkenüberschläge durch die Luft sind ein natürliches Phänomen. In geradezu gigantischen Ausmaßen lassen sie sich während eines Gewitters beobachten, aber auch winzige elektrostatische Entladungen, die eher gehört und gefühlt werden können als im störenden Umgebungslicht direkt gesehen, sind aus alltäglichen Situationen wohlbekannt. Den Physikern, die sich im 19. Jahrhundert mit Elektrizität beschäftigten, waren jene Funken ein probates Mittel zur Messung einer elektrischen Spannung, denn der räumliche Abstand, der durch einen solchen Blitz überwunden werden kann, steht zu dieser Größe in direkter Korrelation.[97] Es gehörte weiterhin zum Bestand des Wissens, dass im Rahmen eines Funkenüberschlages elektrische Ladung plötzlich durch die Luft fließen konnte, obwohl diese normalerweise ein sehr guter Isolator ist. Wurde nach der Zündung eines Funkens z.B. von einer chemischen Batterie oder einem Generator beständig Elektriziät „nachgeliefert“, so konnte aus dem einmaligen Funken ein dauerhaft brennender, gleißend leuchtender Lichtbogen werden, und Lichtquellen von dieser Art, sogenannte „Bogenlampen“ lieferten aufgrund ihrer konkurrenzlosen Helligkeit noch lange Zeit nach der Erfindung der Glühlampe das Licht für Leuchttürme und Filmprojektoren.

Das Phänomen, dass aus einem für Elektrizität normalerweise unpassierbaren Stoff plötzlich ein recht guter Leiter wird, bedurfte natürlich einer Erklärung. Die Erfahrungen, die man in Elektrolyseversuchen gesammelt hatte, deuteten darauf hin, dass im Wasser gelöste Metallsalze in Form sogenannter „Ionen“ vorkommen, d.h. als Atome oder Moleküle, die nicht mehr neutral, sondern positiv oder negativ geladen sind und die sich bei Anlegen einer äußeren Spannung an im Wasser befindliche Elektroden in Bewegung setzen und dort einen fließenden Strom verursachen. Die Experimente mit den Kathodenstrahlröhren hatten zur Entdeckung eines materiellen Teilchens geführt, des sogenannten Elektrons, in welchem man den Träger der negativen elektrischen

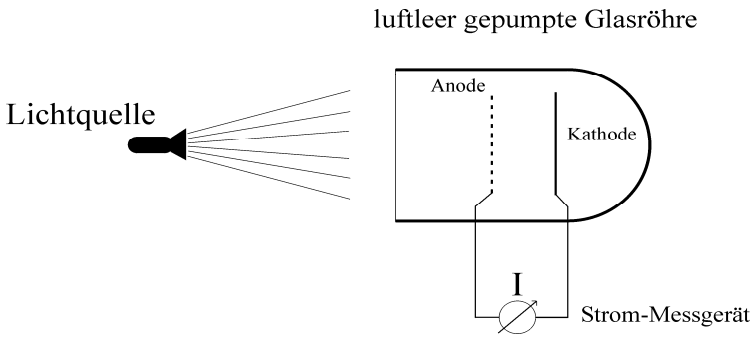
---

[96] H. Hertz: Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtsauf die elektrische Entladung. A.a.O. S. 86.

[97] Auf diesem Prinzip beruhten die oben bereits erwähnten Hertzschen Funkenmikrometer. Der Abstand zweier Elektroden und der zwischen diesen befindliche Luftspalt ließen sich mittels einer Gewindeschraube äußerst fein justieren. Die kleinste Distanz, ab der ein sichtbarer Funkenüberschlag einsetzte, war ein indirektes Maß der elektrischen Spannung zwischen den beiden Elektroden.

Elementarladung erblickte, so dass sich langsam ein diffuses Bild vom Inneren der Atome auszubilden begann: Sie sind ein nach außen neutral erscheinendes Konglomerat aus „schwerer“ positiver und verhältnismäßig „leichter“ negativer Ladung, wobei die Träger der letzteren, die Elektronen, durch geeignete Zufuhr von Energie aus dem Atom herausgerissen werden können – ein Vorgang, den man „Ionisation“ nennt. Die von Heinrich Hertz beschriebene Beobachtung der Begünstigung elektrischer Blitze durch ultraviolettes Licht konnte man sich im Rahmen dieses Modells als licht-induzierte Ionisation der Luftteilchen vorstellen, d.h. als Auslösung von Elektronen aus vormals neutralen Atomen. Neben der Wärmewirkung elektromagnetischer Strahlung war dies möglicherweise ein neuartiger Effekt der Welchselwirkung zwischen Licht und Materie und dessen genauere quantitative Untersuchung für die Physik von besonderem Interesse.

Erste Versuche dieser Art waren um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert von den Hertz-Schülern Wilhelm Hallwachs (1859-1922) und Philipp Lenard (1862-1947) angestellt worden. Wie sich dabei gezeigt hatte, werden von kurzwelligem Licht nicht nur Gasatome ionisiert, sondern auch Metalle, d.h. durch Bestrahlung von metallischen Oberflächen lassen sich Elektronen aus diesen herauslösen. Um dabei Störfaktoren möglichst zu beseitigen, bedient man sich in den Experimenten luftleer gepumpter Kathodenstrahlröhren. Ein entsprechender Versuchsaufbau sei hier kurz skizziert:



Das Licht unterschiedlicher Lichtquellen tritt durch ein Fenster in die luftleer gepumpte Röhre ein, passiert die gitterartig durchbohrte Anode und fällt auf das Metallblech der Kathode. Dabei werden bei geeigneter Wahl des Lichts und des Kathodenmaterials aus dieser Elektronen ausgelöst, die durch die evakuierte Röhre wandern und teilweise auf der Anode auftreffen. Die Kathode verliert negative Ladungsträger und wird positiv geladen, die Anode erhält zusätzliche Elektronen hinzu und bildet ein negatives Potential aus. Verbindet man beide über ein empfindliches Messgerät (Ampèremeter), so kann man einen

geringen Stromfluss von der Anode zur Kathode hin messen, der zur Intensität des einfallenden Lichts proportional ist: Je größer die Intensität des Lichts (Energie pro Fläche und Zeit bzw. Leistung pro Fläche), desto größer ist der Strom (Ladungsträger pro Zeit), d.h. die Anzahl der ausgelösten Elektronen ist proportional zu Intensität des Lichts. Diese Resultate sind nach der klassischen Wellentheorie relativ einfach zu deuten: Elektronen tragen eine Ladung, auf die im oszillierenden elektrischen Feld elektromagnetischer Wellen eine Kraft ausgeübt wird. Die negativen Ladungsträger, die über die Anziehungskraft der positiven Atomrümpfe an die Atome gebunden sind, beginnen im Feld einer Lichtwelle um ihre Ruhelage zu schwingen und wenn die Amplitude dieser Bewegung ausreicht, um die Bindungskraft zu überwinden, können sie das Atom verlassen. Je mehr Energie die Welle enthält, desto mehr Elektronen erhalten die zum Verlassen des Metalls notwendige Schwingungsenergie und desto größer wird der außen registrierbare Strom.

Mittels einer leichten Modifikation des obigen Versuchsaufbaues gelang es Philipp Lenard, genauere Daten über die Bewegungsenergie der ausgelösten Elektronen in Abhängigkeit von der Intensität und Art des verwendeten Lichts zu erlangen. Dazu sind einige einfache Relationen vorauszuschicken: Die Energie eines Elektrons im potentialfreien Raum ist ausschließlich kinetische, d.h. Bewegungsenergie und wird im Falle nicht allzu großer Geschwindigkeiten[98] durch den aus der klassischen Mechanik bekannten Term $E_{kin}=½\cdot m\cdot v^2$ beschrieben. Dabei ist *m* die Masse des Elektrons und *v* seine Geschwindigkeit. Befindet sich ein Elektron in einem elektrischen Feld, so erfährt es in analoger Weise eine Kraft, wie eine Masse im Gravitationsfeld und für eine Bewegung gegen diese Kraft muss Arbeit bzw. Energie aufgewendet werden, die das Elektron in potentielle Energie umsetzt.[99] Nach der klassischen Elektrodynamik gilt für diese Arbeit eine einfache Gleichung: Durchläuft ein Elektron im elektrischen Feld eine bestimmte Potientialdifferenz[100] (U), so ist die dafür nötige Energie gleich dem Produkt aus der

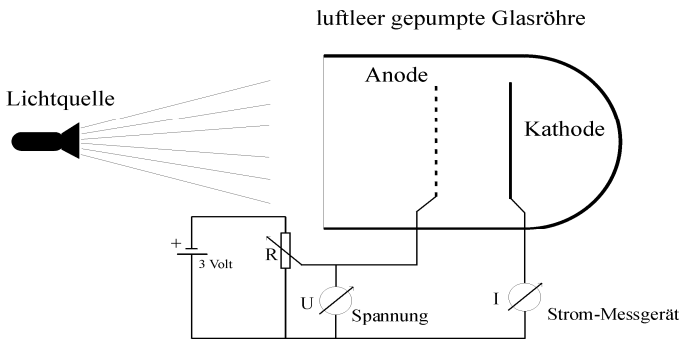
---

[98] Wird die Geschwindigkeit so groß, dass sie relativ zur Lichtgeschwindigkeit (300.000 km/s) nicht mehr als „klein“ angesehen werden kann, so gilt diese Gleichung nicht mehr und muss durch eine relativistische Berechnung ersetzt werden. Im Rahmen der Messungen des Fotoeffektes ist diese Bedingung ($v/c \ll 1$) jedoch erfüllt und der klassische Ausdruck für die kinetische Energie angemessen.

[99] Dies geschieht in völliger Analogie zum Beispiel der Schwerkraft: Wird ein Körper im Schwerefeld angehoben, so bedarf es dazu einer von der Masse, der Stärke des Feldes und der Höhendifferenz abhängigen Menge an Arbeit bzw. Energie. Der Körper speichert diese gleichsam als potentielle Energie und kann dieselbe in umgekehrter Richtung, d.h. beim Herabfallen, wieder freisetzen.

[100] Wird z.B. zwischen zwei parallelen, im Abstand von 10cm aufgestellten Platten eine elektrische Spannung von 10 Volt angelegt, so bildet sich zwischen diesen ein (schwaches) elektrisches Feld aus. Das Potential dieses Feldes an einem

Ladung des Elektrons (e) und dieser Potentialdifferenz: $E_{pot} = e \cdot U$. Zur Messung der maximalen kinetischen Energie der vom Licht ausgelösten Fotoelektronen legte Lenard nun zwischen Anode und Kathode ein einstellbares elektrisches Potential, gegen das die Elektronen „anfliegen“ müssen, um die Anode zu erreichen. Wird dieses Potential so hoch gewählt, dass der Strom im Kreis gerade vollständig zum Erliegen kommt, so hat man damit über die Gleichung $E_{pot}=e \cdot U=E_{kin}$ mit den bekannten Größen e und U die maximale kinetische Energie derselben bestimmt, denn ein Elektron kann die Anode nur dann erreichen, wenn seine kinetische Energie mindestens so groß ist, wie diejenige, die es braucht, um die Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode zu überwinden. Der entsprechende Versuchsaufbau lässt sich schematisch wie folgt darstellen:



Mittels einer externen, über einen regelbaren Widerstand (R) justierbaren Spannungquelle kann die zwischen Anode und Kathode angelegte Gegenspannung zwischen 0 und 3 Volt variiert werden, bis der durch die lichtinduzierte Emission von Elektronen aus der Kathode verursachte Strom völlig zusammenbricht. Lenard ermittelte auf diese Weise die maximale kinetische Energie der Teilchen und gelangte zu dem völlig unerwarteten Resultat, dass diese Größe vor der Intensität der eingesetzten ultravioletten Strahlung in keiner Weise beeinflusst wird.[101] Auf der Grundlage der elektromagnetischen Auffassung des Lichts hätte man gerade an dieser Stelle eine starke Korrelation erwarten sollen. Da die Energie der Lichtwelle hier proportional zum Quadrat der schwingenden Größe (elektrischer bzw. magnetischer Feldvektor) ist, müsste ein von dieser beeinflusstes Elektron, ähnlich einem

---

bestimmten Punkt wird nun relativ zu einer als Bezugspunkt gewählten Platte angegeben. In der Regel ist dies die negative Platte. Relativ zu dieser hat die positive Platte ein elektrisches Potential von +10 Volt. Auf zu dieser parallel liegend gedachten Flächen zwischen den Platten nimmt das Potential des Feldes mit jedem Zentimeter in Richtung des Bezugspols um 1 Volt ab und erreicht auf der negativen Platte den Wert 0.

[101] Die Intensität lässt sich einfach durch teilweises Abdecken der Lichtquelle reduzieren oder durch eine Vergrößerung des Abstandes zur Lampe.

auf dem Meer treibenden Boot, von einer großen Welle viel mehr Bewegungsenergie empfangen können als von einer Schwingung mit kleiner Auslenkung, doch dies war offensichtlich nicht der Fall. Lediglich die Anzahl der pro Zeitintervall emittierten Teilchen variierte mit der Intensität des Lichts, aber nicht deren kinetische Energie.

Über diese seltsamen Daten hinaus hatte Lenard feststellen können, dass die Bewegungsenergie der Elektronen zwar nicht von der Intensität der Strahlung, sehr wohl aber vom Typ des eingesetzten Kathodenmaterials und von der Art des verwendeten Lichts abzuhängen schien. Wurden mit ein und derselben Lichtquelle Kathoden aus unterschiedlichen Metallen bestrahlt, so variierte mit diesen auch die maximale Energie der emittierten Elektronen. Ebenso verhielt es sich im Falle eines einheitlichen Kathodenmaterials, auf welches man Licht verschiedener Herkunft einwirken ließ. Je nach Ursprung der Strahlung (Funkenüberschläge, Bogenlampen u.a.), erhielt man unterschiedliche maximale Energien.

Die Abhängigkeit des Effektes vom verwendeten Kathodenmaterial konnte man sich durch die These erklären, dass zur Auslösung von Elektronen eine für jedes Element charakteristische Menge an Arbeit aufgewendet werden muss, die sogenannte „Ionisierungsenergie“, und dass die maximale kinetische Energie eines emittierten Teilchens einfach gegeben ist durch die Differenz aus der insgesamt zur Verfügung stehenden und der zur Ionisation benötigten Energie. Dass aber, wie bereits von Heinrich Hertz beobachtet, nur relativ kurzwellige Strahlung überhaupt zur Emission von Elektronen führt, und sichtbares Licht, selbst bei sehr großen Intensitäten, nur zu einer Erwärmung des beleuchteten Metalls, nicht jedoch zur Ionisation desselben hinreicht, blieb auf der Grundlage der klassischen Wellentheorie völlig unverstanden.

Es sind nun diese qualitativen Ergebnisse der Studie Lenards, für die Albert Einstein in seiner Arbeit zur Lichtquantenhypotese eine theoretische Deutung zu geben versucht. Einstein nimmt, wie bereits dargestellt, aufgrund thermodynamischer Erwägungen an, dass elektromagnetische Strahlung aus einzelnen Lichtquanten der Energie $E=h\cdot\nu$ besteht[102], und dass die negativen Ladungsträger in einer bestrahlten Metalloberfläche nur jeweils die Energie eines solchen Lichtquants ganz oder teilweise absorbieren können. Wenn es zur Emission eines Elektrons darüberhinaus einer materialspezifischen Ionisierungsenergie bedarf, so kann ein solches Teilchen nur dann ausgelöst werden, wenn die Energie der

[102] Zur Erinnerung: „h“ ist dabei das Plancksche Wirkungsquantum und „ν“ die Frequenz der Lichtwelle.

einzelnen Lichtquanten mindestens so groß ist, wie diese Ionisierungsenergie. Bezeichnet man diese Austrittsarbeit mit W_a und die kinetische Energie eines aus der Metalloberfläche emittierten Elektrons mit E_{kin}, so muss gelten: $E_{kin} \leq h \cdot \nu - W_a$. Die *maximale* kinetische Energie der Fotoelektronen ist gleich der Differenz aus der Energie eines kompletten Lichtquants und der Ionisierungsenergie des beleuchteten Stoffes. Auf der Grundlage dieses Modells lässt sich verstehen, warum Licht mit zu niedriger Frequenz trotz hoher Intensität keine Ladungsträger auszulösen vermag: Die erhöhte Intensität korreliert lediglich mit einer größeren Anzahl der pro Zeit- und Flächeneinheit eingestrahlten Lichtquanten, nicht jedoch mit einer wachsenden Energie der Quanten selbst. Deren Energie hängt nach wie vor nur von der Frequenz der elektromagnetischen Strahlung ab. Umgekehrt kann kurzwelligeres Licht von sehr geringer Intensität, d.h. mit einer geringen räumlichen und zeitlichen „Dichte“ der Quanten, dennoch Atome vollständig ionisieren, wenn auch nur entsprechend wenige.[103] Die kinetische Energie der emittierten Lichtteilchen hängt nicht von der Intensität der Strahlung ab.

Einstein weist in seiner Arbeit darauf hin, dass im Falle der Gültigkeit der Relation $E_{kin\ max.} = h \cdot \nu - W_a$ zu erwarten sei, dass die in einem Cartesischen Koordinatensystem aufgetragenen Daten von $E_{kin\ max.}$ in Abhängigkeit von der Frequenz der Strahlung eine Gerade ergeben müssen, deren Steigung von der Art des eingesetzten Kathodenmaterials unabhängig ist.[104] Es lässt sich darüberhinaus aus der Gleichung unmittelbar ablesen, dass über diese Steigung eine weitere Möglichkeit gegeben ist, den Wert des Planckschen Wirkungsquantums h empirisch zu bestimmen.[105] Die Messungen Lenards, auf die sich Einstein in seiner Publikation bezieht, reichten jedoch dazu nicht hin, da die Frequenz des Lichts nicht systematisch-quantitativ, sondern allenfalls qualitativ, d.h. durch Verwendung unterschiedlicher Lichtquellen, variiert wurde.

Die erste genaue Bestätigung der prognostizierten Korrelation ließ fast ein Jahrzehnt auf sich warten und erfolgte 1914 durch den amerikanischen Experimentalphysiker Robert A. Millikan (1868-1953). Millikan war es in den Jahren zuvor schrittweise gelungen, die vielen möglichen Fehlerquellen zu beseitigen, die die empirischen Messungen des fotoelektrischen Effektes überlagerten, und seine präzisen und umfangreichen Daten

---

[103] Man kann sich hierbei eine sehr weit entfernte (z.B. kosmische) Lichtquelle denken.
[104] Einstein (1905a), S. 146.
[105] Durch Umstellen der Gleichung erhält man: $h = (E_{kin\ max} + W_a) / \nu$. Die maximale kinetische Energie der Fotoelektronen, die Austrittsarbeit des verwendeten Kathodenmaterials und die Frequenz des eingesetzten Lichts sind dabei die experimentell zu ermittelnden Größen.

überzeugten nun die meisten Fachkollegen von der Richtigkeit des Einsteinschen Gesetzes, aber keineswegs von der realen Existenz der Lichtquanten.[106] Sogar Millikan selbst war noch etliche Jahre davon überzeugt, die beobachteten Relationen müssten sich auch klassisch, d.h. nur auf Basis der elektrodynamischen Wellentheorie erklären lassen, doch alle Versuche, dies zu erreichen, schlugen letztlich fehl.

[106] Zu den Versuchen Millikans vgl Wheaton (1983), S. 238ff.

4. Der Abschied von Bildern

Die Physik stand nach ihrem eigenen Selbstverständnis gegen Ende des 19. Jahrhunderts kurz vor ihrer Vollendung, und es ist wohl dieser Umstand, vor dessen Hintergrund sich die besondere Vehemenz der einsetzenden Krise verstehen lässt, in welche die Disziplin sowohl durch die Offenlegung innerer Widersprüche als auch infolge eines sich immer stärker abzeichnenden Mangels an Erklärungskraft geraten war. Was die oben bereits erwähnte Unvereinbarkeit der Maxwellschen Elektrodynamik mit den Bewegungsgesetzen der klassischen Mechanik anbetrifft, so war bekanntlich 1905 mit der Speziellen Relativitätstheorie Einsteins der entscheidende „Befreiungsschlag“ gelungen, der dazu hinreichte, die kinematischen Probleme, die sich aus der Ausdehnung des Relativitätsprinzips auf die Phänomene der Optik ergeben hatten, zu einer befriedigenden Lösung zu bringen. Hinsichtlich der Schwierigkeiten aber, die die experimentelle Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie zutage gefördert hatten, deutete sich mit der zunächst noch unspektakulär anmutenden Einführung des Planckschen Wirkungsquantums ein letztlich nicht mehr zu kaschierender Bruch mit den Prinzipien der klassischen Physik an, der zu einem tiefgreifenden Wandel des naturwissenschaftlichen Weltbildes führen sollte. Dieser Prozess ist nun mehr als nur das tragische Versagen und die daraus resultierende Überwindung einer der bewährtesten und fast für unwiderruflich erachteten Theorien; dass eine solche nicht leichtfertig und kampflos preisgegeben werden kann, bedarf eigentlich keiner gesonderten Erwähnung.[107] Er tangiert vielmehr die oftmals unartikulierten Voraussetzungen der physikalischen Modellbildung überhaupt, insofern sich diese auch jenseits naiv-realistischer Erkenntnistheorien an den Prinzipien der alltäglichen Erfahrung orientiert, d.h. Systeme entwirft, in welchen die anschauliche, raumzeitlich strukturierte und kausal determinierte Interaktion mathematisch idealisierter

---

[107] Mit eindringlichen Worten ist dieser nachvollziehbare Konservativismus z.B. bei Max Planck formuliert, der ja bekanntlich selbst, gleichsam als „Revolutionär wider Willen“, mit dem Wirkungsquantum h eine grundsätzlich nicht-klassische Größe in die Physik eingeführt hat. Noch im Jahr 1910 weist er darauf hin, „[…] daß gegenüber der Korpuskulartheorie des Lichts die größte Vorsicht geboten ist. […] die Theorie des Lichts würde nicht um Jahrzehnte, sondern um Jahrhunderte zurückgeworfen, bis in die Zeit, da Christian Huygens seinen Kampf gegen die übermächtige Newtonsche Emissionstheorie wagte. Wie hartnäckig derselbe geführt wurde, und wie später die endlich siegreiche Huygenssche Theorie mit der Maxwell-Hertzschen Elektrodynamik restlos verschmolzen wurde, ist bekannt. Und alle diese Errungenschaften, die zu den stolzesten Erfolgen der Physik, ja der Naturforschung überhaupt gehören, sollen preisgegeben werden um einiger noch recht anfechtbarer Betrachtungen willen? Da bedarf es denn doch noch schwereren Geschützes, um das nachgerade sehr stark fundierte Gebäude der elektromagnetischen Lichttheorie ins Wanken zu bringen.“ – M. Planck: „Zur Theorie der Wärmestrahlung“. In: Annalen der Physik 31 (1910), S. 758-768. Wieder abgedruckt in Planck (1958), Bd. 2, S. 237-247, Zitat S. 242f.

Elemente als vollkommene oder zumindest angenäherte Analogie der jeweils modellierten Naturprozesse selbst gelten kann. Diesen Gedanken einer prästabilierten Harmonie zwischen den Strukturen der als objektiv vorgestellten Welt und denjenigen des erkennenden Subjekts hatte der Entdecker elektromagnetischer Wellen, der Physiker Heinrich Hertz mit folgenden Worten auf den Punkt gebracht: „Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, daß die denknotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände. Damit diese Forderung überhaupt erfüllbar sei, müssen gewisse Übereinstimmungen vorhanden sein zwischen der Natur und unserem Geiste. Die Erfahrung lehrt uns, daß die Forderung erfüllbar ist und daß also solche Übereinstimmungen in der Tat bestehen.“[108]

Unabhängig davon, ob der Grund dieser „Übereinstimmungen“, wie von Hertz vorgeschlagen, in der bisherigen Erfahrung zu suchen ist oder, wie in der Tradition der kantischen Erkenntnistheorie, in den apriorischen Bedingungen der Möglichkeit von Erkenntnis überhaupt: die Konstruktion physikalischer Bilder erfährt letztlich ihre Legitimation in der stets vorauszusetzenden „Fotogenität“ der abzubildenden Gegenstände, d.h. einer stets unterstellten inneren Rationalität, die der Rationalität der Abbildungen korrespondiert und diesen erst ihren Sinn verleiht. Auch wenn man eine solche Auffassung angesichts der gerade zu Beginn des 20. Jahrhunderts in Mode gekommenen positivistischen oder gar sensualistischen Strömungen infrage stellen kann, so ist dennoch die Beschränkung der Möglichkeit von „Bildern“ im soeben skizzierten Sinne einer der entscheidenden Faktoren des Krisenphänomens. Max Planck, der als unfreiwilliger Vater des Wirkungsquantums noch sehr lange daran festhielt, das Auftreten diskreter Energieniveaus ausschließlich dem Bereich der Wechselwirkung zwischen elektromagnetischen Feldern und konventioneller Materie zuzubilligen, empfand die prinzipielle Unanschaulichkeit dieser Vorgänge bereits als Grenze des Zumutbaren. In der Diskussion eines Vortrages von Einstein, in dem dieser ein neues Argument für die Annahme der quasi-korpuskularen Konstitution des Lichts vorgebracht hatte[109], bestand Planck auf der Forderung, die Theorie der freien Strahlung unangetastet zu lassen und allenfalls die Schwingungszustände der damit interagierenden Resonatoren als quantisiert anzunehmen.

---

[108] Hertz (2002), S. 67.

[109] Vgl. Einstein (1909). Der Wortlaut der anschließenden mündlichen Diskussion wurde zuerst publiziert in: Physikalische Zeitschrift 10 (1909), S. 825f., und ist ebenso wiedergegeben in Stachel (1989), Bd. 2, S. 585f.

Doch, so Planck, „[...]ist die Frage immer: wie stellt man sich so etwas vor? Daß heißt, man verlangt ein mechanisches oder elektrodynamisches Modell eines solchen Resonators. Aber in der Mechanik und in der jetzigen Elektrodynamik haben wir keine diskreten Wirkungselemente und daher können wir auch ein mechanisches oder elektrodynamisches Modell nicht herstellen. Mechanisch erscheint das also unmöglich und man wird sich daran gewöhnen müssen. Auch unsere Versuche, den Lichtäther mechanisch darzustellen, sind ja vollständig gescheitert.“[110]

Für Planck ist an dieser Stelle ein Abschied von anschaulichen Modellen wohl nicht zu vermeiden, und jene Besonderheit der instantanen Übergänge zwischen verschiedenen Schwingungs- bzw. Energiezuständen wird später sogar unter dem Begriff des „Quantensprungs“ in die alltägliche Sprache eingehen.

Für Einstein, der sich über diese Zugeständnisse Plancks hinausgehend dafür aussprach, die stetigen Differentialgleichungen der Maxwellschen Elektrodynamik auch für den Fall der freien Strahlung aufzugeben und statt dessen Licht und elektromagnetische Wellen generell als Strom raumzeitlich lokalisierbarer „Energiepakete“ aufzufassen, ergab sich bezüglich der Anschaulichkeit physikalischer Theorien noch ein weiteres Problem, dessen Lösung man beim damaligen Stand des Wissens zumindest prinzipiell noch erwarten durfte: die theoretische Verbindung der korpuskularen Aspekte des Lichts mit seiner nach wie vor bestehenden Fähigkeit zu konstruktiver und destruktiver Interferenz, d.h. letztlich die zwangsweise Vereinigung zweier diametral entgegengesetzter Attribute unter dem Dach eines einheitlichen und widerspruchsfreien Modells.

Es bietet sich an dieser Stelle an, die sich widerstreitenden Eigenschaften von Wellen und Teilchen kurz auf den Punkt zu bringen, so dass das Ausmaß dieser Schwierigkeit vollends zur Geltung kommen kann: Die Wellen der klassischen Physik sind immer Wellen in oder von etwas und verlangen nach einem Medium. Ihnen wesentlich ist ihre Form bzw. ihr Bewegungsmuster und nicht das jeweilige materielle Substrat. Korpuskeln brauchen hingegen kein Medium; sie können sich als eigenständige Gebilde bewegen und sind dabei raumzeitlich lokalisiert und scharf begrenzt. Sie transportieren Masse und damit Bewegungsenergie (kinetische Energie), die an den jeweiligen Ort des Teilchens gebunden ist und mit diesem mitwandert. Wellen, wie z.B. die Kugelwelle des Lichts, transportieren keine Masse und okkupieren während ihrer Ausbreitung immer größere Bereiche des

[110] vgl. Stachel (1989), S. 585.

Raumes. Die Teile des jeweiligen Mediums werden nur lokal bewegt (ausgelenkt), und die an einem Ort verfügbare Leistung (Energie pro Zeit) ist proportional zum Quadrat der maximalen Auslenkung (Amplitude) und proportional zur Frequenz der Welle (Anzahl der vollständig abgeschlossenen Oszillationen pro Sekunde). Die Gesamtenergie eines endlichen Wellenzuges verteilt sich mit der Zeit über immer größere räumliche Areale, so dass sich die Amplitude der Schwingung entsprechend reduziert. Zwei Wellen durchdringen sich völlig ungestört und behalten auch nach einer „Begegnung" ihre ursprüngliche Form. Im Bereich der Überlagerung bildet sich eine komplexe Bewegung aus, deren lokale Auslenkung jedoch einfach die Summe der Amplituden der beiden autonomen Teilwellen ist. Die Überlagerung von Wellen gleicher Frequenz nennt man Interferenz, und je nach Phasenbeziehung[111] kann sich diese von der völligen Auslöschung (destruktive Interferenz) bis hin zur Verdopplung (konstruktive Interferenz) der Wellenamplitude erstrecken. Teilchen durchdringen sich hingegen nicht ungestört. Sie können allenfalls kollidieren, aber niemals interferieren (sie können sich z.B. nicht gegenseitig auslöschen). Nicht ohne Grund wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts die Newtonsche Korpuskulartheorie des Lichts infolge der Interferenzversuche Thomas Youngs entscheidend geschwächt, so dass jenes Doppelspaltexperiment in vielen Lehrbüchern der Physik als typisches Beispiel eines *experimentum crucis* angeführt wird.[112]

Als nun Einstein bereits im Jahr 1905 die Ansicht vertrat, die elektrodynamische Wellentheorie des Lichts müsse wieder durch ein korpuskulares Modell ersetzt werden, so war dies, wenn überhaupt, nur dann zu rechtfertigen, wenn dieses mittels seiner neuartigen Voraussetzungen auch in der Lage gewesen wäre, allen bereits bekannten Phänomenen der Wellenoptik Rechnung zu tragen, d.h. verständlich zu machen, warum sich ein Strom von

---

[111] Den zeitlichen Verlauf einer harmonischen Schwingung erhält man durch die vertikale Projektion (Schattenwurf) des gegen den Uhrzeigersinn rotierenden Radius eines Kreises. Liegt dieser Radiusvektor beispielsweise horizontal, so ist die vertikale Projektion „Null", steht dieser vertikal (im Winkel von 90 Grad zur Horizontalen), so ist die vertikale Projektion maximal. Die Amplitude einer harmonischen Oszillation kann also in Abhängigkeit vom Radiuswinkel (relativ zur horizontalen, nach rechts weisenden „Startposition") angegeben werden, und diesen Winkel nennt man auch „Phase". Sind zwei Wellenzüge von gleicher Amplitude und Frequenz um 180 Grad (oder ein ungerades Vielfaches davon) phasenverschoben, so interferieren sie destruktiv. Liegt eine Phasenverschiebung von Null Grad, 360 Grad oder ein gerades Vielfaches davon vor, so interferieren sie konstruktiv, was im geschiderten Beispiel einfach zu einer Verdopplung der Amplitude führen würde.

[112] Diese Klassifizierungen von Versuchen als *experimenta crucis* sind in fast allen Fällen nur aus der Kenntnis der nachfolgenden historischen Entwicklung möglich und in der Regel hinreichend idealisiert. Das langsame Anwachsen der Akzeptanz des Wellenmodells erstreckt sich über die ersten drei Jahrzehnte des 19. Jahrhunderts und bedurfte vieler experimenteller und theoretischer Arbeiten, wobei hierbei neben Thomas Young (1773-1829) vor allem Augustin Jean Fresnel (1788-1827) in Frankreich und Joseph Fraunhofer (1787-1826) in Deutschland zu nennen sind.

Teilchen im Experiment so verhalten kann, als sei er eine Welle. Und es ist leicht einzusehen, dass die größte Herausforderung darin besteht, die scheinbare Fähigkeit zur Interferenz zu verstehen, die sich im Youngschen Doppelspaltversuch am eindringlichsten darin zeigt, dass genau dort, wo bei geradliniger Ausbreitung von Korpuskeln ein Schatten zu erwarten wäre, sich der hellste Streifen des Beugungsmusters einstellt. In seinem ersten Aufsatz zur Lichtquantenhypothese geht Einstein offensichtlich noch davon aus, dass die klassische Undulationstheorie als Beschreibung eines „Massenphänomens" unzähliger Lichtquanten aufgefasst werden kann und insofern durchaus ihre Berechtigung habe. Sie wird, wie er ausdrücklich betont „wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden."[113] Wie sich durch die Wechselwirkung vieler Teilchen ein Interferenzmuster erklären ließe, findet sich hier zwar nicht weiter ausgeführt, doch dass dies nur durch eine komplexe Interaktion der Korpuskeln untereinander und mit den jeweiligen optischen Gerätschaften denkbar ist, scheint außer Frage zu stehen. Diese Annahme findet man ebenfalls in der oben bereits zitierten Diskussion eines Vortrages aus dem Jahr 1909 wieder,[114] in welcher der Physiker Johannes Stark, der von der prinzipiellen Richtigkeit der Thesen Einsteins überzeugt war, bemerkt, dass die Interferenzexperimente, die Max Planck als eindeutige Gegenevidenz zur Korpuskularhypothese des Lichts angeführt hatte, „mit sehr dichter Strahlung angestellt sind, so daß sehr viele Quanten der gleichen Frequenz in dem Lichtbündel konzentriert waren; das muß bei der Behandlung jener Interferenzerscheinungen wohl berücksichtigt werden. Mit sehr dünner Strahlung würden die Interferenzerscheinungen wohl anders sein."[115] Auch Einstein selbst betont wiederum besonders diesen Punkt, denn man dürfe nicht annehmen, „daß die Strahlungen bestehen aus Quanten, die nicht in Wechselwirkung stehen; das würde unmöglich sein für die Erklärung der Interferenzerscheinungen."[116]

Selbst die wenigen Befürworter der Lichtquantenhypothese konnten sich also an diesem Punkt der Entwicklung noch berechtigte Hoffnung auf eine anschauliche Deutung der Lichtquantenbewegung im Doppelspaltexperiment machen, so dass letztlich die Trajektorie eines jeden infolge der Wechselwirkung mit den vielen anderen in der Apparatur befindlichen Teilchen in eindeutiger Weise determiniert gewesen wäre. Lediglich die vollkommen „unklassische" Beschränkung der im System zulässigen

[113] Vgl. Einstein (1905a), S. 132
[114] Vgl. Einstein (1909)
[115] Vgl. Stachel (1989), S. 586
[116] Vgl. Stachel (1989), S. 586

Energiewerte auf ganzzahlige Vielfache von h musste in ähnlicher Weise wie bereits im Planckschen Gesetz der Hohlkörperstrahlung als unliebsamer Fremdkörper wirken. Diese Konstante, die bisher nur in einem kleinen Spezialgebiet der Physik zum Einsatz gekommen war, sollte schließlich auch in der Theorie der Materie eine bedeutende Rolle spielen, so dass sich ihr unmittelbarer Anwendungsbereich letztlich auf die gesamte Mikrophysik erweiterte.

4.1 Modelle des Atoms

4.1.1 Das Atommodell von Ernest Rutherford

Die These, dass die Materie aus kleinen, für jedes chemische Element charakteristischen Einheiten, den sogenannten Atomen aufgebaut ist, war unter den Naturforschern des frühen 20. Jahrhunderts zu immer breiterer Akzeptanz gelangt. Aus den unterschiedlichsten Gebieten der Physik mehrten sich die Hinweise auf die atomare Konstitution der Stoffe, und man konnte infolge dieser Resultate erste qualitative Vorstellungen von der Struktur dieser Atome entwickeln. J.J. Thomson, dem bekanntlich die Entdeckung des Elektrons geglückt war, d.h. eines Teilchens, welches über 1000 Mal leichter war als das leichteste der bekannten Elemente, der Wasserstoff, entwarf ein Modell der Atome, in dem eine relativ schwere positiv geladene Masse aufgrund elektrostatischer Anziehungskräfte genau so viele Elektronen, d.h. leichte negative Ladungsträger bindet, bis das Gebilde nach außen elektrisch neutral erscheint. Die bereits erwähnten Versuche Philipp Lenards, in denen es gelungen war, Kathodenstrahlen durch dünne Aluminiumfolien hindurch zu schießen, legten dabei die Vermutung nahe, dass die positiven und negativen Massen im Inneren der Atome äußerst ungleichmäßig verteilt sein müssten und dass unter Umständen sogar große Teile ihres Volumens völlig frei von schwerer Materie sein könnten. Der englische Physiker Ernest Rutherford (1871-1937) veröffentlichte im Jahr 1911 die Resultate seiner berühmten Streuversuche, in denen er – statt mit Elektronen – mit der erst einige Jahre zuvor entdeckten Alpha-Strahlung radioaktiver Elemente auf eine extrem dünne Goldfolie geschossen hatte. Diese Strahlung entsteht beim spontanen Zerfall bestimmter schwerer Elemente und besteht aus ionisierten Helium-Atomen, d.h. aus Korpuskeln, die etwa 7300 Mal schwerer sind als ein Elektron. Obwohl die Dicke der Folie immer noch mehr als 100 Atomschichten betrug, konnten fast alle Alphateilchen völlig ungehindert passieren. Einige wenige wurden von ihrem geraden Weg abgelenkt, und extrem selten ereignete sich sogar eine Totalreflexion, d.h. eines dieser „Geschosse“ kam im gleichen Winkel wieder heraus, in dem es in die Goldfolie eingetreten war. Rutherford konnte auf der Grundlage dieser Ergebnisse erste quantitative Aussagen über die Atomstruktur formulieren. Er schloss, dass fast die gesamte Masse eines Atoms in einem sehr kleinen positiv geladenen Raumbereich, dem sogenannten „Kern“,

konzentriert sein muss und dass in vergleichsweise riesigem Abstand die Elektronen auf kreisförmigen Bahnen um diesen Kern herumlaufen, so dass die Fliehkraft ihrer Bahnbewegung die elektrostatische Anziehungskraft des Zentrums gerade kompensiert. Der bei weitem größte Teil des Volumens eines solchen Gebildes ist demnach völlig frei von schwerer Masse, und nur deshalb können die meisten Alphateilchen selbst durch eine viele Atomschichten dicke Goldfolie ungehindert hindurchfliegen.

Dieses Rutherfordsche Modell markierte einen entscheidenen Schritt in der noch jungen Atomforschung und führte bereits die grundlegende Unterscheidung zwischen Atomhülle und Kern ein, die später mit der sogenannten „Kernphysik“ die Ausbildung eines neuen naturwissenschaftlichen Spezialgebietes ermöglichen sollte. Doch bereits zum Zeitpunkt der Veröffentlichung waren die Grenzen dieser Theorie mit Händen zu greifen: Warum haben die Atome eine definierte Größe, d.h. warum sind die Durchmesser der Elektronenbahnen relativ genau bestimmt? Nach der klassischen Physik sollten hier, ähnlich wie in einem kosmischen Planetensystem, beliebige Konstellationen möglich sein.[117] Ein weiteres, sehr ernstzunehmendes Problem bestand in der Stabilität der Elektronenbewegung überhaupt. Die klassische Elektrodynamik prognostizierte für ein periodisch bewegtes und elektrisch geladenes Teilchen die permanente Aussendung von Energie in Form einer elektromagnetischen Welle. Dieser Energieverlust sollte das Elektron nach sehr kurzer Zeit spiralförmig in den Kern stürzen lassen, wie ein Satellit, den man durch gezieltes Abbremsen zum Eintritt in die Erdatmosphäre, d.h. letztlich zum „Absturz“, bringen kann. Warum geschieht dies nicht? Was führt zur enormen Stabilität der Elemente, die nachweislich sogar in chemischen Verbindungen stets ihre „Identität“ behalten und sich aus selbigen wieder einzeln herauspräparieren lassen? Und wie lassen sich die spezifischen physikalischen wie chemischen Qualitäten der unterschiedlichen Stoffe erklären? Das auf sehr einfachen Prinzipien fußende Atommodell Rutherfords konnte auf diese Fragen keine befriedigende Antwort liefern. Insbesondere schien es nicht möglich zu sein, ein bereits länger bekanntes physikalisches Phänomen begreiflich zu

[117] Im kosmischen Maßstab ergibt sich die Bahn eines Planeten aus dem Gleichgewicht zwischen seiner nach außen gerichteten Fliehkraft und der entgegengesetzten gravitativen Anziehungskraft seines Zentralgestirns. Hier sind unendlich viele Bahnen möglich, d.h. ein Körper kann seinen Abstand zum Zentrum (beliebig) verringern, indem er entsprechend schnellere Umläufe tätigt und seine Fliehkraft demgemäß erhöht. Auch im Rutherfordschen Atom können die Elektronen theoretisch auf beliebigen Bahnen um den Kern laufen. Der Durchmesser eines Atoms wäre, der Erfahrung widersprechend, nicht festgelegt.

machen, dessen Lösung man von einer leistungsfähigen Atomtheorie unbedingt erwarten musste: das Auftreten elementspezifischer Emissionsspektren.

Regt man ein gasförmiges chemisches Element durch eine elektrische Entladung oder durch Wärmezufuhr zum Leuchten an, so zeigt das durch ein Prisma in seine Komponenten zerlegte Licht kein kontinuierliches Spektrum (d.h. z.B. einen vollständigen „Regenbogen“ im sichtbaren Bereich der Strahlung), sondern einige wenige, relativ scharf begrenzte Linien. Diese diskreten Lichtfrequenzen sind im Gegensatz zur Kirchhoffschen Schwarzkörperstrahlung nicht temperaturabhängig und für jeden Stoff charakteristisch, stellen also eine Art „Fingerabdruck“ der Elemente dar, anhand dessen man sie eindeutig identifizieren kann.[118] In Festkörpern und flüssigen Stoffen werden diese besonderen Farben durch das thermische Spektrum überlagert, welches durch die permanente Wechselwirkung der relativ nahe beieinander liegenden Atome entsteht und im Idealfall für alle Substanzen die gleiche Verteilung zeigt.

Seit dem frühen 19. Jahrhundert waren diese elementspezifischen Spektrallinien bekannt und auch, dass für jedweden Stoff jeweils eigene Linien existieren und sich diese „umkehren“, wenn man ein Gas dem kontinuierlichen Licht einer Glühlampe aussetzt. Dann werden nur die diskreten Eigenfarben des betreffenden Elementes gestreut (d.h. absorbiert und in unterschiedliche Richtungen wieder emittiert), was sich in der anschließenden Zerlegung der Strahlung durch dunkle, d.h. lichtschwächere Streifen bemerkbar macht, die an den gleichen Stellen lokalisiert sind wie die Linien des Emissionsspektrums.[119] Ein Stoff absorbiert demnach nur diejenigen relativ scharf begrenzten Teile des Lichts, die er andererseits auch aussendet. Für alle anderen Frequenzen scheint er völlig unempfindlich zu sein, und es war vor allem die Erklärung dieses Umstandes, die im Rahmen der klassischen Physik nicht gelungen war und welche man sich von einer elaborierten Atomtheorie erhoffen konnte. Obwohl das Atommodell von Rutherford dazu beitrug, die physikalischen Vorstellungen über den Aufbau der

---

[118] Eine praktische Anwendung findet dieser Umstand z.B. in Feuerwerken, deren unterschiedliche Farbeffekte mit thermischer Strahlung nicht zu erreichen wären. Hier nutzt man die stoffspezifischen Linienspektren unterschiedlicher Elemente: Natrium für „gelb“, Barium für „grün“, Strontium für ein leuchtendes „rot“, Kalium für „violett“ usw.

[119] Bereits 1802 hatte der englische Chemiker William H. Wollaston bemerkt, dass der „Regenbogen“ des spektral zerlegten Sonnenlichts von scharfen dunklen Linien durchsetzt ist. 1814 wurde unabhängig davon der Münchener Optiker Joseph Fraunhofer auf dieses Phänomen aufmerksam, welches er systematisch studierte und die zugehörigen Frequenzen bestimmte. Er katalogisierte insgesamt über 500 solcher Linien. Dabei handelt es sich nach heutiger Interpretation um die elementspezifischen Absorptionsspektren der oberen, gasförmigen Sonnenschichten, und diese geben Auskunft über deren chemische Zusammensetzung. Die Existenz eines neuartigen Elementes, dem man den Namen „Helium“ gab, konnte aufgrund der im Sonnenspektrum vorgefundenen Absorptionslinie vorhergesagt werden, noch bevor dessen Isolation auf der Erde gelang.

Materie weiter zu präzisieren, konnten auf seiner Grundlage die diskreten Emissions- bzw. Absorptionsmuster der Elemente immer noch nicht verstanden werden. Die Klärung dieses Problems gehörte neben der Erforschung der natürlichen Radioaktivität zu den großen Herausforderungen der noch jungen Atomphysik, und das Plancksche Wirkungsquantum wird hierbei eine bedeutende Rolle spielen.

4.1.2 Das Atommodell von Niels Bohr

Es war der dänische Physiker Niels Bohr (1885-1962), der im Jahr 1913 unter der Voraussetzung gequantelter Energiezustände eine Rechnung präsentierte, aus der sich die bekannten Linien des Wasserstoffspektrums ergaben und darüber hinaus noch bis dahin unentdeckte Frequenzen, deren Existenz sich in der Folge auch experimentell bestätigen ließ. Für die bereits vorliegenden und genau vermessenen Linien des Wasserstoffs hatte der schweizer Mathematiklehrer Jakob Balmer (1825-1898) bereits 1885 ein Bildungsgesetz „erraten“, ohne jedoch eine theoretische Begründung dafür angeben zu können.[120] Niels Bohr war es nun gelungen, diese Formel zu reproduzieren und den darin befindlichen festen Faktor, den man bis dahin lediglich als unverstandenes Faktum hingenommen hatte, auf andere fundamentale Naturkonstanten zurückzuführen. Ausgangspunkt der Überlegung waren dabei die qualitativen Ideen Rutherfords, d.h. die Vorstellung von Elektronen, die einen positiv geladenen Atomkern umkreisen, welche Bohr jedoch um die vollkommen unklassische Bedingung ergänzte, dass der Bahnimpuls[121] eines solchen Teilchens nur ganzzahlige Vielfache von ħ (sprich „h quer“)[122] annehmen kann. Das Wasserstoffatom ist der einfachste Fall unter den bekannten Elementen, da sich in dessen Hülle nur ein einziges Elektron aufhält. Nach den überlieferten mechanischen und elektrostatischen Gesetzen sind für dieses Elektron unendlich viele verschiedene Bahnen möglich, in denen die Anziehungskraft des Kerns und die jeweilige Fliehkraft sich genau die Waage halten. Kombiniert man diese Bedingung mit der Einschränkung, dass der Bahnimpuls nur ganzzahlige Vielfache von ħ annehmen darf, so ergeben sich diskrete Bahnen oder sogenannte „Energieniveaus“ des Elektrons und vor allem eine absolut niedrigste Stufe, für die die Relation $L=1\cdot\hbar$ bzw. $L=\hbar$ erfüllt ist. Der Radius dieser Bahn lässt sich recht einfach berechnen und stimmt mit der

---

[120] Die Linien des Wasserstoffspektrums (d.h. die Frequenzen des emittierten Lichts) ergeben sich aus der recht einfachen Relation: $f_n = K \cdot (¼ - 1/n^2)$, mit n = 3,4,5,6… und $K \approx 3{,}3\cdot 10^{15}\ s^{-1}$. Diese Frequenzen nennt man auch „Balmer-Serie“. Nach der Entwicklung des Bohrschen Atommodells konnte man weitere Serien vorhersagen, die sich im Experiment auch nachweisen ließen. Sie liegen im unsichtbaren Bereich des Spektrums, d.h. sowohl im Ultravioletten (Lyman-Serie) als auch im Infraroten (Paschen-Serie, Brackett-Serie, Pfund-Serie).

[121] Der Bahndrehimpuls L eines auf einer Kreisbahn bewegten Massenpunktes ist in der klassischen Physik gegeben durch die Beziehung $L = r\cdot m\cdot v$, wobei mit „r“ der Radius der Bahn, mit „m“ die Masse und mit „v“ die Geschwindigkeit entlang der Bahn bezeichnet ist.

[122] Mit dem Symbol ħ (h quer) bezeichnet man in der Physik den Quotienten aus dem Planckschen Wirkungsquantum h und dem Doppelten der Kreiszahl Pi. Es gilt demnach: $\hbar = h/2\pi$.

mittels anderer Methoden extrapolierten Größe des Wasserstoffatoms überein.[123] Für die in der Balmer-Formel anzutreffende Konstante K ergab sich der Ausdruck $K= m_e \cdot e^4 / 8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^3$, wobei m_e für die Masse des Elektrons, e für dessen Ladung, ε_0 für die elektrische Feldkonstante und h für das Plancksche Wirkungsquantum steht. Diesen Wert K dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit c nennt man heute auch Rydberg-Konstante. Er ergibt sich, wie man sieht, durch eine Kombination anderer fundamentaler Naturkonstanten und ist demnach auf diese zurückführbar.

Bohr nahm nun an, dass sich das Elektron in der Hülle des Wasserstoffatoms normalerweise auf der kleinstmöglichen Bahn befindet, was dem niedrigsten Energieniveau und in etwa dem empirisch erschlossenen Atomdurchmesser entspricht. Die Gesamtenergie des umlaufenden Elektrons ergibt sich aus der Summe der Bewegungsenergie auf der Bahn und der potentiellen Energie im radialsymmetrischen elektrischen Feld des Kerns. Legt man den Bezugspunkt des elektrischen Feldes (wie in der Physik üblich) ins Unendliche, so ergibt sich für den Grundzustand (die kleinste mögliche Bahn) eine Gesamtenergie von -13,6 eV, was genau der experimentell ermittelten Energiemenge entspricht, die man dem Wasserstoffatom hinzufügen muss, um das Elektron aus ihm vollends zu entfernen (Ionisierungsenergie).[124] Bohr konnte neben diesen Größen auch die charakteristischen Wellenlängen der vom Atom emittierten bzw. absorbierten Strahlung errechnen, indem er annahm, dass das Elektron durch die Aufnahme von elektromagnetischer Energie auf eine der „höheren“ Bahnen wechseln und unter Abstrahlung der selben Menge wieder in den Grundzustand zurückkehren kann. Es kommen deshalb nur diejenigen diskreten Werte für auf- bzw. abgegebene Energie vor, die genau der Energiedifferenz zweier Bahnen entsprechen, wobei neben dem direkten Wechsel in den energetisch niedrigsten Zustand beliebige andere Übergänge erlaubt sind. Das Elektron muss beispielsweise nicht notwendigerweise von einem hochangeregten Zustand sofort in die innerste Bahn „zurückspringen“, sondern kann dies auch gleichsam

---

[123] Die Größe eines Atoms lässt sich beispielsweise im Rahmen der kinetischen Gastheorie abschätzen.

[124] Die Einheit „eV“ (Elektronenvolt) hat sich in der Physik für sehr kleine Energien eingebürgert. 1 eV ist diejenige kinetische Energie, die ein Elektron erlangt hat, wenn es im elektrischen Feld (welches ja eine Kraft auf diese Ladung ausübt) eine Potentialdifferenz von 1 Volt durchlaufen (bzw. „durchflogen“) hat. Da die Masse des Elektrons sehr klein ist, ergibt sich die Relation $1eV \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Joule. Die Energie im Grundzustand ist negativ, da man, um vom unendlichen Bezugspunkt aus ein Elektron auf diese Bahn zu bringen, eine negative Arbeit verrichten muss, d.h. „man bekommt eigentlich Arbeit hinzu“, da das Elektron ja vom positiven Kern angezogen wird. Ähnlich müsste man eine „negative“ Arbeit verrichten, um einen Stein vom Dach eines Hauses auf die Straße zu transportieren. Man kann auch umgekehrt sagen, dass das Elektron eine Arbeit (oder Energie) von 13,6 Elektronenvolt benötigt, um sich ganz vom Kern zu entfernen (Ionisierung).

kaskadenartig über zwischengelagerte Niveaus bewerkstelligen, wobei bei jedem Übergang der Differenzbetrag der Bahnenergien nach außen abgestrahlt wird. Die Verknüpfung zwischen Lichtfrequenz und Energie wird über die Beziehung $E=h\cdot\nu$ bzw. $\nu=E/h$ hergestellt, d.h. Bohr geht hier wie Einstein von der quantenhaften Absorption und Emission elektromagnetischer Strahlung aus.

Mittels der geschickten Verknüpfung des Planckschen Wirkungsquantums mit der ursprünglich kontinuierlichen (d.h. „klassischen“) Größe des Bahndrehimpulses war Bohr mit einem Schlage der Schlüssel zum Verständnis der bis dahin völlig rätselhaften Energiestufen der Atome in die Hände gefallen, und die verblüffende Leistungsfähigkeit seines Modells des Wasserstoffs erschien den Physikern seiner Zeit wie eine Offenbarung. Selbst viele Jahre später wird Einstein in seinen autobiografischen Erinnerungen die Bohrsche Intuition noch als „Wunder“ bezeichnen.[125]

Diese Mischung aus der Rutherfordschen Vorstellung eines winzigen Planetensystems aus positivem Kern mit umlaufenden negativen Elektronen und der gequantelten Bahnenergie wird im Rückblick oftmals als „halbklassisches“ Modell bezeichnet, in welchem man je nach Perspektive sowohl die theoretischen Instrumente der klassischen Mechanik und Elektrodynamik als auch die grundlegenden Ideen der erst noch vollständig zu entwickelnden Quantentheorie wiederfindet. Aus der Sicht eines ganz auf dem Boden der traditionellen Physik stehenden Naturforschers mussten aber einige der Postulate des Bohrschen Modells als unverständliche ad-hoc-Hypothesen erscheinen. Bohr nimmt z.B. einfach an, dass der Umlauf der Elektronen auf den Bahnen, welche der Quantenbedingung $L=n\cdot\hbar$ (mit $n=1,2,3...$) genügen, im Gegensatz zur Vorhersage der Maxwellschen Elektrodynamik „strahlungsfrei“ erfolgt.[126] Andere Bahnen als diese sind gleichsam „verboten“, und es stellt sich die Frage, wie denn ein Elektron von einer zur jeweils anderen wechseln können soll, ohne die dazwischenliegenden Energiebereiche, zumindest vorübergehend, ebenso einnehmen zu können. Wie kann man sich diese „Quantensprünge“ anschaulich vorstellen, ohne dem Prozess einen stetigen Verlauf unterstellen zu müssen? Und noch etwas anderes deutet entschieden auf die Grenzen des anschaulichen

---

[125] „Dass diese schwankende und widerspruchsvolle Grundlage hinreichte, um einen Mann mit dem einzigartigen Instinkt und Feingefühl Bohrs in den Stand zu setzen, die hauptsächlichen Gesetze der Spektrallinien und der Elektronenhüllen der Atome nebst deren Bedeutung für die Chemie aufzufinden, erschien mir wie ein Wunder – und erscheint mir auch heute noch als ein Wunder. Dies ist höchste Musikalität auf dem Gebiete des Gedankens.“ Einstein in Schlipp (1970), S. 44ff.

[126] Hieraus „erklärt“ sich letztlich die Stabilität der Materie, denn das Elektron des Wasserstoffatoms kann deshalb nicht in den Kern stürzen, weil Energiebeträge $< \hbar$ nicht „erlaubt“ sind.

Planetenmodells hin, was wohl dem Physiker eher Kopfzerbrechen bereitet als dem verständigen Laien: Die Frequenzen des emittierten Lichts haben, wie anhand einer einfachen Rechnung erwiesen werden kann, in den unteren Energiestufen nichts mit der Umlauffrequenz des Elektrons zu tun. Das periodisch im Kreise schwingende Elektron kann also hier nicht als Hertzscher Sender einer elektromagnetischen Welle angesehen werden, doch woher stammt dann die genau bestimmte Oszillation der Lichtwelle? Im Spektrum zeigen sich ja immer wieder die gleichen farbigen Linien, deren relativ scharfe Begrenzung bei einem nicht-sprunghaften Wechsel der Bahn, d.h. einer gleichsam spiralförmigen Vergrößerung des Abstandes vom Kern und einer kontinuierlichen Zunahme der Bahnfrequenz, nicht zu erwarten wäre. Interessanterweise nähern sich diese Parameter aber, die Umlauffrequenz des Elektrons und die Frequenz des emittierten Lichts, im Fall des Übergangs zwischen benachbarten Bahnen höherer Energieniveaus immer mehr an, so dass im Grenzfall die klassische Vorstellung durchaus angemessen erscheint. Dieser Übergang wurde bereits von Bohr ausdrücklich angesprochen und als „Korrespondenzprinzip“ bezeichnet. Es gibt Grenzbedingungen, infolge deren die quantenmechanischen Gesetze in die klassischen übergehen, aber im allgemeinen Fall ist offensichtlich, dass die Mittel der traditionellen Physik zur Beschreibung der Vorgänge in der Atomhülle nicht ausreichen.

Die Jahre nach der Entdeckung des Bohrschen Atommodells wurden von der Diskussion dieser Schwierigkeiten beherrscht. Einige Physiker arbeiteten daran, die Paradoxien vielleicht doch noch in den Rahmen der überlieferten theoretischen Systeme integrieren zu können, aber in kurzen Abständen tauchten immer mehr experimentelle Befunde auf, die die Situation insgesamt eher verschärften, als einen erkennbaren Ausweg anbieten zu können. Die Atomvorstellung wurde vor allem unter der Obhut des Münchener Physikers Arnold Sommerfeld weiterentwickelt, ohne jedoch die von Bohr eingeführten Quantenbedingungen infrage zu stellen, geschweige denn ihre tiefere Bedeutung zu verstehen. Die Spektren wurden immer genauer vermessen, und man entdeckte in den einfachen Elementen Wasserstoff und Helium viele zum Teil sehr schwache neue Linien, d.h. stationäre Energiestufen, die durch die Einführung neuer Quantenzahlen theoretisch verstanden werden konnten. Neben der sogenannten Hauptquantenzahl (n) mit $n=1,2,3,\ldots$, die bereits im Bohrschen Modell des Wasserstoffatoms die möglichen kreisförmigen Bahnen der Elektronen numerierte, wurde eine sogenannte Bahnquantenzahl (l) mit $l \leq (n-1)$

eingeführt, die man sich als elliptische Bahn-Varianten des zugehörigen Hauptenergieniveaus (n) vorstellen konnte. Weiterhin eine sogenannte Magnetquantenzahl[127] (mit der Bedingung $|m| \leq l$) und letztlich sogar eine später Spin-Quantenzahl[128] genannte Größe (s) mit $|s|=½$. Die Auswirkungen der letzen beiden Quantenzahlen m und s zeigen sich vor allem darin, dass das gesamte magnetische Moment eines Atoms, welches als die Summe der Teilmomente der Bahnen und Elektronen aufgefasst werden kann, ebenfalls quantisiert ist. Lässt man z.B. einen Strahl aus Silberatomen mit einem inhomogenen äußeren Magnetfeld wechselwirken, so spaltet sich dieser in zwei Strahlenbündel auf, die durch ihr Auftreffen auf eine fotografische Platte zwei diskrete Punkte erzeugen.[129] Klassischerweise hätte man einen Streifen erwarten dürfen, d.h. kontinuierlich verteilte magnetische Momente. Dreht man die Apparatur, um in einer anderen Richtung zu messen, so erhält man wiederum zwei diskrete Punkte im gleichen Abstand. Egal in welcher Richtung man misst: Ein Silberatom zeigt immer einen von zwei möglichen Werten für sein magnetisches Moment!

Viele Atomforscher entwickelten in dieser Zeit bereits ein intuitives Gefühl für das seltsame diskrete Verhalten der Materie, so dass, wie der Physiker Werner Heisenberg später in einem Vortrag zur Geschichte der Quantentheorie bemerken wird, „schon einige Zeit, bevor eine präzise Formulierung der Quantentheorie gegeben werden konnte,[...]man mehr oder weniger genau [wußte], wie das Ergebnis irgendeines Experimentes aussehen würde.“[130] Dies geschah aber offenbar, ohne anschaulichen Gebrauch von definierten Elektronenbahnen im Atom machen zu können und ohne zu verstehen, wie Lichtenergie, die nachweislich nur in Form quasikorpuskularer Pakete emittiert und absorbiert wird, zugleich auch die physikalischen Eigenschaften einer stetigen, räumlich ausgebreiteten Welle haben kann, ja sogar haben muss, denn der Impuls und die Energie eines solchen Lichtquants lässt sich infolge der Einsteinschen Relationen

---

[127] Der kreisförmige Umlauf einer Ladung erzeugt ein magnetisches Moment, welches sich so verhält, als würde rechtwinklig zur Bahnebene ein winziger Magnet stehen. In bestimmten Stoffen (ferromagnetischen Stoffen, wie z.B. Eisen und Nickel) lassen sich die Momente aller Atome dauerhaft in eine einzige Richtung bringen, d.h. sie werden zu einem makroskopischen Magneten.

[128] Ein einzelnes Elektron hat ebenfalls ein winziges magnetisches Moment, welches man sich klassisch so erklären kann, dass dieses Teilchen um seine eigene Achse rotiert. Tatsächlich ist dieser „Spin“ aber eine paradoxe quantenmechanische Eigenschaft, die sich einer anschaulichen Deutung entzieht: Vollkommen unabhängig davon, in welcher räumlichen Richtung man das magnetische Moment eines Elektrons zu messen gedenkt: Man erhält immer den gleichen Wert für dessen Stärke und eine von zwei möglichen Ausrichtungen (der Nordpol des Magneten kann relativ zur gemessenen Richtung „nach oben“, oder „nach unten“ zeigen).

[129] Dieses Experiment ist als Stern-Gerlach-Versuch bekannt und wurde im Februar 1922 von den deutschen Physikern Otto Stern und Walther Gerlach durchgeführt.

[130] Heisenberg (1990), S. 18.

$E=h\cdot f$ und $p=h\cdot\lambda$ (mit $\lambda=1/f$) ja nur über die Welleneigenschaften Frequenz (f) und Wellenlänge (λ) überhaupt angeben. Zur Verschärfung dieser Lage trug nun auch die langsam sich durchsetzende Erkenntnis bei, dass das Interferenzverhalten kohärenten Lichts auch nicht durch eine komplexe Wechselwirkung vieler im Strahl befindlicher Quanten erklärt werden kann, wie dies ja die ursprüngliche Hoffnung von Einstein und anderen mit dem Phänomen befassten Physikern gewesen war. Zu Beginn des gleichen Jahres, in dem auf der Salzburger Tagung der *Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte* diese These als einzige Möglichkeit gehandelt wurde, die Interferenz der Lichtquanten im Doppelspalt-Experiment zu erklären, war bereits in England ein offenbar relativ unbekannter Versuch durchgeführt worden, welcher dazu geeignet war, eine Wechselwirkung unter den einzelnen Lichtquanten definitv auszuschließen.

4.2 Taylors Interferenzversuche

Das bereits in der Diskussion des lichtelektrischen Effektes (Fotoeffekt) erwähnte Faktum, dass die Energieübertragung zwischen elektromagnetischer Strahlung und den Elektronen in der Hülle der Atome in Form diskreter Pakete vonstatten geht und dass die Lichtquanten eine stoffspezifische Mindestenergie (d.h. über $E=h \cdot f$ eine Mindestfrequenz) haben müssen, um Ladungsträger vom Atom ablösen zu können, findet ein Analogon in der bereits im 19. Jahrhundert beobachteten Fähigkeit ultravioletten Lichts, bestimmte chemische Reaktionen (z.B. die Dissoziation, das Spalten von Verbindungen) ingangsetzen zu können. Es stellte sich heraus, dass die Wirkung dieser „chemischen Strahlen“ nur ein Sonderfall in einer allgemeinen Gruppe von Reaktionen darstellt, die durch Licht ausgelöst bzw. begünstigt werden können, und diese Entdeckung schuf schließlich die Voraussetzung für die vielbeachtete Entwicklung der Fotografie. Eine Standardreaktion, die in der frühen Schwarz-Weiß-Fotografie zur Anwendung gelangte, bedient sich des sogenannten „inneren Fotoeffektes“: In einem Silberbromidkristall wird ein durch die Absorption eines Lichtquants mobilisiertes Elektron nicht nach außen emittiert, sondern intern zur Reduktion des Silberions zu elementarem Silber verwendet, welches im Zuge der anschließenden „Entwicklung“ den Keim für die Anlagerung weiterer Silberatome bildet, die schließlich als schwarzer Fleck auf dem Fotopapier in Erscheinung treten. Man kann demnach ein mit einem lichtempfindlichen Stoff (wie z.B. Silberbromid) beschichtetes Fotopapier zum Nachweis einzelner Lichtquanten nutzen, was neben der Anwendung in der Fotografie auch im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchung des Lichts eine bedeutende Rolle spielte.

Im Januar 1909 hatte der junge englische Physikstudent Geoffrey Taylor (1886-1975) die erstaunlichen Ergebnisse eines Experiments veröffentlicht, welches er auf Anregung seines Lehrers J.J. Thomson in Cambridge durchgeführt hatte.[131] Taylor fotografierte dabei den Schattenwurf einer Metallnadel mit dem mittels mehrerer Filtergläser extrem verdünnten Licht einer Gasflamme. Wird ein solcher Versuch unter stärkerer kohärenter Beleuchtung durchgeführt, so zeigt sich kein scharf begrenzter Umriss des Objektes, sondern ein Interferenzmuster, das durch die Überlagerung der von den beiden Rändern der Nadel ausgehenden Lichtwellen entsteht und insofern in Erscheinung und Entstehung dem

[131] Vgl. Taylor (1909).

Streifenbild des Youngschen Doppelspaltversuchs analog ist. Im Taylorschen Aufbau war nun aber die Intensität der Strahlung so schwach, dass rein statistisch zu keiner Zeit mehr als die Energie eines einzelnen Lichtquants in der Apparatur angetroffen werden konnte und sich damit prinzipiell die Frage beantworten ließ, wie sich diese Verhältnisse auf die unter „normalen“ Bedingungen zu beobachtende Interferenzeigenschaft des Lichts auswirken würden. Bedingt durch die außerordentliche Schwäche der Strahlung ergab sich eine entsprechend lange Belichtungszeit von fast drei Monaten (2000 Stunden!). Sollten, wie Einstein behauptet hatte, die elektromagnetischen Felder aus einzelnen Lichtkorpuskeln bestehen, so hätte man zumindest eine mögliche Wechselwirkung zwischen den zeitversetzt in den Apparat eindringenden Teilchen ausschließen können. Nachdem Taylor den Versuch mit unterschiedlichen Belichtungszeiten durchgeführt und jeweils den fotografischen Film entwickelt hatte, erschien immer das gleiche, aus einzelnen geschwärzten Punkten zusammengesetzte Interferenzmuster: „In no case was there any diminution in the sharpness of the pattern.“[132]
Auch isolierte Lichtquanten können offenbar interferieren!

[132] Taylor, a.a.O.

4.3 Werner Heisenberg und die Matrizenmechanik

Zu Beginn der 20er Jahre des vorigen Jahrhunderts war es weder in der Theorie der elektromagnetischen Strahlung noch im Bereich der Atomforschung möglich, von anschaulichen Vorgängen in Raum und Zeit zu sprechen, ohne sich dabei in ernsthafte Widersprüche zu verwickeln. Es war immer deutlicher zutage getreten, dass der Riss zwischen den Prozessen, in denen das Plancksche Wirkungsquantum eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielte, und den Beschreibungssystemen der klassischen Mechanik bzw. Elektrodynamik nicht mehr zu kitten sein würde und dass es einer vollkommen neuartigen Betrachtungsweise und neuartiger physikalischer Begriffe bedurfte, um der Naturwissenschaft den Zugang zum Phänomenbereich des Mikrokosmos zu eröffnen. Niels Bohr, der mit seinem Modell der Atomhülle den Grundstein zum Verständnis der Spektren und des chemischen Bindungsverhaltens der Elemente gelegt hatte, war nun auch entscheidend an der Erneuerung der physikalischen Grundlagen beteiligt, tatkräftig unterstützt von einer Generation junger Physiker, denen der Gang unkonventioneller Wege allein schon deshalb leichter fiel, da sie kaum Gelegenheit hatten, die alten richtig kennenzulernen.[133]

Zu dieser Generation zählte auch Werner Heisenberg (1901-1976), der sein Studium bei Arnold Sommerfeld in München begonnen hatte und der von seinem Mentor schon recht früh mit den Problemen und Möglichkeiten der Bohrschen Atomtheorie vertraut gemacht worden war. Im Frühsommer des Jahres 1922 hatte der erst 21jährige Student die Gelegenheit, an einer Vorlesungsreihe Niels Bohrs in Göttingen teilzunehmen, in deren Rahmen die jüngsten Entwicklungen auf dem Gebiet der Atomphysik diskutiert wurden. Im Anschluss an einen Vortrag erregte Heisenberg mit einem scharfsinnigen Einwand die Aufmerksamkeit Bohrs, der ihn im Anschluss zu einem nachmittäglichen Spaziergang über den Göttinger Hainberg einlud, um die aufgeworfenen Fragen ausführlich zu erörtern. „Dieser Spaziergang“, so wird Werner Heisenberg später in seiner Autobiografie bemerken, „hat auf meine spätere wissenschaftliche Entwicklung den größten Einfluß ausgeübt, oder man kann vielleicht besser sagen, daß meine

[133] Bis zu einem gewissen Grade sollte sich hier die vielzitierte Ansicht Max Plancks bewahrheiten, der einmal bemerkte, dass „eine neue wissenschaftliche Wahrheit […] sich nicht in der Weise durchzusetzen [pflegt], daß ihre Gegner überzeugt werden und sich als belehrt erklären, sondern vielmehr dadurch, daß die Gegner allmählich aussterben und daß die heranwachsende Generation von vornherein mit der Wahrheit vertraut gemacht ist.“ Vgl. Planck (1948), S. 22.

eigentliche wissenschaftliche Entwicklung erst mit diesem Spaziergang begonnen hat.“[134]

Während dieses Gespräches, dessen Verlauf Heisenberg aus dem Gedächtnis zu rekonstruieren versucht, wurde auch die Frage berührt, inwiefern die aus der alltäglichen Sprache entlehnten Begriffe und Vorstellungen der klassischen Physik im Bereich der atomaren Phänomene überhaupt noch angemessen erscheinen und durch welche Konzepte sie eventuell zu ersetzen seien. Bohr ist sich offenbar schon zum Zeitpunkt der Entwicklung seines Atommodells der enormen Schwierigkeiten bewusst, die eine anschauliche Behandlung der Gesetze des Mikrokosmos mit sich bringen, und er scheint bereits sehr früh zu der Ansicht gelangt zu sein, dass die Idee der Elektronenbahnen nicht mehr sein kann als eine Metapher, und eigentlich noch nicht einmal dies: „[…] in der bisherigen Physik oder in jeder anderen Naturwissenschaft konnte man, wenn man ein neues Phänomen erklären wollte, unter Benützung der vorhandenen Begriffe und Methoden versuchen, das neue Phänomen auf die schon bekannten Erscheinungen oder Gesetze zurückzuführen. In der Atomphysik wissen wir ja schon, daß die bisherigen Begriffe dazu sicher nicht ausreichen. Wegen der Stabilität der Materie kann die Newtonsche Physik im Inneren des Atoms nicht richtig sein, sie kann bestenfalls gelegentlich einen Anhaltspunkt geben. Und daher wird es auch keine anschauliche Beschreibung der Struktur des Atoms geben können, da eine solche – eben weil sie anschaulich sein sollte – sich der Begriffe der klassischen Physik bedienen müßte, die aber das Geschehen nicht mehr ergreifen.“[135]

Diese Worte Bohrs sollten bei Heisenberg einen bleibenden Eindruck hinterlassen und mögen wohl auch einen gewissen Anteil an der bahnbrechenden Entdeckung gehabt haben, die als die erste mathematische Formulierung der sogenannten „Quantenmechanik“ Eingang die Geschichte der Physik gefunden hat. Die Aufgabe, die sich der erst 24jährige Privatdozent der Göttinger Universität als eines seiner ersten Forschungsprojekte gestellt hatte, war, die mathematischen Regeln zu finden, welche die Intensitäten der Linien des Wasserstoffspektrums bestimmen, deren Frequenzen ja bereits aus der Bohr-Sommerfeldschen Atomtheorie deduziert werden konnten. Führt man den Atomen des Wasserstoffgases von außen Energie zu (z.B. durch eine elektrische Entladung oder starkes Erhitzen), so hat das in deren Hülle befindliche Elektron, welches auf ein sehr „hohes“

---

[134] Vgl. Heisenberg (2001), S. 51.
[135] Niels Bohr, zitiert nach Heisenberg (2001), S. 53.

Energieniveau gelangt ist, viele unterschiedliche Möglichkeiten, um direkt oder indirekt, d.h. über verschiedene nach der Theorie mögliche Zwischenstationen, in den Grundzustand zurückzukehren, und diese Wege sind offenbar nicht gleichberechtigt, was sich empirisch darin zeigt, dass die Linien des spektral zerlegten Lichts unterschiedlich hell erscheinen. Jede weist ihre jeweils eigene Intensität auf, die nach der klassischen Vorstellung proportional zum Amplitudenquadrat der ausgesandten Lichtwelle ist.

Es ging Heisenberg nun darum, diese Amplituden mittels eines geeigneten mathematischen Instrumentariums theoretisch vorherzusagen. Im Sommer des Jahres 1925 zwang ihn ein allergisches Heufieber zu einem Kuraufenthalt auf der Nordseeinsel Helgoland, und in dieser Zeit gelang der entscheidende Durchbruch. Vielleicht mag ihm das Gespräch mit Niels Bohr im Gedächtnis gewesen sein, als er sich dazu entschloss, die genauen Bahnbewegungen eines Elektrons im Atom als prinzipiell unbeobachtbare Vorgänge beiseite zu schieben und sich ganz im Sinne des Machschen Positivismus auf diejenigen Größen zu konzentrieren, die auch tatsächlich gemessen werden können, d.h. im Rahmen seiner Untersuchung letztlich nur die bekannte Frequenz- und Intensitätsverteilung der Linien im Wasserstoffspektrum. Dieser Ansatz führte zu einer Darstellung, in der die Zustandsgrößen wie Energie, Impuls, Ort etc. nicht mehr durch einen einzigen Wert bzw. eine einzige Variable repräsentiert werden, wie dies in der traditionellen Physik üblich war, sondern durch eine sogenannte Matrix, d.h. eine ganze Tabelle möglicher Werte für den betreffenden Parameter. Mit Matrizen können die unterschiedlichsten Rechenoperationen (wie z.B. die Grundrechenarten) durchgeführt werden, und es existieren genaue Regeln, wie dies im Detail zu bewerkstelligen ist. Heisenberg konnte z.B. in einer der klassischen Kinematik analogen Weise „Bewegungsgleichungen“ für ganze Matrizen formulieren, die das zeitliche Verhalten des zugeordneten Parameters beschreiben. Statt der Vorhersage des genauen Wertes, den eine solche Größe bei einer zukünftigen Messung zeigen würde, ist den Matrizen lediglich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu entnehmen, die festlegt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Messung einen bestimmten Wert ergeben wird.[136] Es hat also schon in dieser frühen Formulierung den Anschein, als würde nicht das numerische Verhalten eines Parameters (wie z.B. Ort oder Impuls) selbst einem deterministischen Gesetz unterworfen sein, sondern eher der Ausdruck, der die Wahrscheinlichkeit

[136] Die Interpretation bestimmter Positionen der Matrix als „Wahrscheinlichkeiten“ greift der historischen Entwicklung ein wenig vor. Diese Deutung des Formalismus musste erst noch „erarbeitet“ werden, und hierbei sind vor allem die Beiträge des Göttinger Physikers Max Born von Bedeutung.

repräsentiert, im Falle einer Messung einen bestimmten Wert zu erhalten. Und noch eine weitere Besonderheit ist dieser Form der Berechnung eigen, die später noch weitreichende Konsequenzen haben wird: Matrizen kommutieren nicht. Im Falle einer Multiplikation kommt es auf die Reihenfolge der Faktoren an, d.h. der Ausdruck „x·y“ ergibt nicht den gleichen Wert wie der Term „y·x“.

4.4 De Broglie, Schrödinger und die Wellenmechanik

Die Matrizenmechanik Heisenbergs war aus dem Kreise der Probleme erwachsen, die Aufbau und Verhalten der Atome zum Gegenstand hatten. Sie war, ähnlich der ersten Fassung des Planckschen Strahlungsgesetzes, aus empirischen Daten mehr oder weniger „erraten“ und zunächst nicht mehr als ein reines Recheninstrument zur regelgeleiteten Verknüpfung von Messergebnissen. Für Heisenberg und Bohr, die einerseits dazu neigten, die Anwendung alltäglicher Begriffe und Bilder auf die Vorgänge im inneren der Atome prinzipiell zu beschränken, aber andererseits weit davon entfernt waren, einen reinen Instrumentalismus zu propagieren, war damit erst ein bescheidener Anfang gelungen, dem eine genauere Analyse sowohl der physikalischen als auch der erkenntnistheoretischen Implikationen des Formalismus folgen musste. Dieser Prozess der Klärung und Präzisierung der Bedeutung jener neuen Theorie wurde entscheidend durch die Entwicklung einer Alternative zur Matrizenmechanik befördert, die, wie sich zeigen sollte, zu dieser mathematisch äquivalent war und für eine kurze Zeit sogar die Hoffnung aufkeimen ließ, die Phänomene der Atomlehre möglicherweise doch noch in das begriffliche System der klassischen Physik integrieren zu können. Im Gegensatz zur Arbeit Heisenbergs, der in erster Linie die Gesetze der Atomhülle zu ergünden trachtete, basierte diese sogenannte „Wellenmechanik“ auf den Bemühungen, der Paradoxien der freien elektromagnetischen Strahlung Herr zu werden, die ja bekanntlich die sich widersprechenden Attribute von Wellen und Teilchen gleichermaßen auf sich vereinigte.

Der französische Amateurphysiker Louis de Broglie (1892-1987) hatte sich im Rahmen dreier im Jahre 1923 publizierter Aufsätze dieses Problems angenommen und seine Thesen in der 1924 vollendeten Dissertationsschrift[137] weiterentwickelt und zusammenfassend dargestellt. Diese Gedanken gelten als Geburtsstunde des universellen „Welle-Teilchen-Dualismus“, der die Regeln der Quantentheorie letztlich auf alle mikrophysikalischen Entitäten übertragen wird – und damit auch die bis heute kontrovers diskutierten Probleme ihrer Interpretation.

De Broglie entwickelt in seinen Arbeiten den Gedanken, die im Falle des Lichts offen zutage tretende Dualität zwischen Wellen- und Teilcheneigenschaften als Spezialfall eines viel umfassenderen und grundlegenderen Naturprinzips zu verstehen, das nicht nur die

[137] Vgl. de Broglie (1925).

elektromagnetische Strahlung, sondern vielmehr die Gesamtheit aller materiellen Grundbausteine betrifft und insofern als universeller Charakterzug der mikroskopischen Welt überhaupt gelten kann. In ähnlicher Weise, wie sich herausgestellt hatte, dass das Licht als Musterbeispiel einer klassischen Welle auch korpuskulare Aspekte zeigen kann und diese sogar wesentlich zu dessen physikalischer Modellierung beitragen, sollten nun die Grundbausteine der Materie auch wellenartige Züge aufweisen, die wiederum notwendig zu ihrem Wesen dazugehören und ohne die ihr Verhalten nur unvollständig beschrieben wäre. In vollkommener Analogie zur Vorgehensweise Einsteins, der in seinen Überlegungen zur Lichtquantenhypothese die Verbindung zwischen oszillatorischen und korpuskularen Eigenschaften der elektromagnetischen Energie über die Relationen $E=h\cdot\nu$ und $E=m\cdot c^2$ herstellt und schließlich für den Impuls eines Lichtquants den Ausdruck $p=h\cdot\nu/c$ bzw. $p=h/\lambda$ erhalten hatte, sollte umgekehrt für ein materielles Teilchen mit dem Impuls p die Gleichung $\lambda=h/p$ gelten, d.h. diesem kann eine Welle zugeordnet werden, deren Länge – man spricht von der sogenannten „de Broglie-Länge“ – durch den Quotienten aus Planckschem Wirkungsquantum und (klassischem) Impuls unmittelbar gegeben ist.

Diese Annahmen basierten einzig und allein auf der Überzeugung der fundamentalen Bedeutung der Energiegleichungen Plancks ($E=h\cdot\nu$) und Einsteins ($E=m\cdot c^2$) und hatten im Gegensatz zur zunehmenden experimentellen Evidenz für die Anwesenheit korpuskularer Lichtquanten in elementaren Energieaustauschprozessen bisher keinerlei empirische Grundlage. Obwohl die mathematische Eleganz der Thesen de Broglies und die Absicht zur Vereinheitlichung disparater Phänomenbereiche überzeugend wirkten, waren wellenartige Aspekte materieller Teilchen noch nie beobachtet worden. Paul Langevin, einer der Gutachter der Dissertation, war sich der Kühnheit der dort vertretenen Ideen durchaus bewusst. Er diskutierte den Gegenstand mit Albert Einstein und veranlasste de Broglie, diesem eine Kopie seiner Schrift zukommen zu lassen. Einstein zeigte sich beeindruckt. In der Einschätzung, die er an Langevin zurücksandte, findet sich die häufig zitierte Bemerkung: „Er [de Broglie] hat einen Zipfel des großen Schleiers gelüftet.“[138]

Mit der Übertragung des Dualismus von Welle und Teilchen auf ehemals solide vorgestellte materielle Korpuskeln wurden auch die Probleme der anschaulichen

[138] Zitiert nach Zeilinger (2003), S. 97.

Interpretation solcher Entitäten aus dem Gebiet der Elektrodynamik auf die gesamte Physik der Materie übertragen. Ebensowenig, wie man sich raumerfüllende elektromagnetische Wellen zur gleichen Zeit als räumlich lokalisierte Lichtquanten denken konnte, war es möglich, sich vorzustellen, wie die einem räumlich lokalisierbaren Teilchen korrespondierende Welle beschaffen sein soll. Was waren das für Schwingungen? Woraus bestanden sie? – De Broglie konnte darauf keine befriedigende Antwort geben. Er bezeichnete seine Materiewelle des öfteren als „onde fictive“, die zwar selbst keine Energie zu transportieren vermag, aber dennoch einen Einfluss auf die Trajektorie des zugeordneten Teilchens haben muss. Die Rechtfertigung dieser Annahme musste allerdings durch die Nützlichkeit und Vorhersagekraft der Hypothese untermauert werden, und ein für die physikalische Theorie ungemein wichtiger Beitrag war in dieser Hinsicht die von de Broglie vorgeführte Möglichkeit, die diskreten Bahnen des Bohrschen Atommodells aus den Postulaten seiner Wellentheorie unmittelbar zu deduzieren und darüber hinaus ein schlagfertiges Argument für ihre Stabilität zu liefern. Die Materiewelle eines Elektrons muss sich dergestalt um den Atomkern „herumbiegen“, dass eine ganzzahlige Anzahl von kompletten Perioden durchlaufen werden kann. Die Welle darf gleichsam an der Stelle, an welcher sie auf ihren eigenen Ausgangspunkt trifft, keinen unstetigen Sprung aufweisen, und diese Bedingung beschränkt die möglichen Energiezustände des Elektrons auf ganz bestimmte Bahnen, die sich als die gleichen erweisen, die Bohr mittels seiner Quantenbedingung des Bahndrehimpulses hergeleitet hatte. Aus der Wellenvorstellung ergab sich also die etwas künstlich anmutende Staffelung der Energieniveaus auf halbwegs anschauliche Weise.

Neben dieser Anwendung der Wellenvorstellung auf die stationären Energiezustände der Atomhülle prognostizierte de Broglie auch Auswirkungen der Materiewellen auf die Trajektorien ungebundener Teilchen: Diese sollten wie Lichtwellen miteinander interferieren können (!), d.h. durch eine geeignete Anordnung sollten sich konstruktive und destruktive Überlagerungseffekte nachweisen lassen, eine These, die an Gewagtheit wohl kaum zu überbieten war und von den mit ihr vertrauten Physikern auch nicht ganz ernst genommen wurde: „Un flot d’électrons“, so die Vorhersage de Broglies, „traversant une ouverture assez petite présenterait des phénomènes de diffraction. C’est de ce côté qu’il faudrait chercher des confirmations de nos idées.“[139]

[139] de Broglie (1923a), S. 549.

Aus der klassischen Wellentheorie ist bekannt, dass Beugungs- und Interferenzeffekte erst dann deutlich in Erscheinung treten, wenn die Breite der Öffnung, durch die eine Welle hindurchgesandt wird, in der Größenordnung der Wellenlänge liegt. Schätzt man diesen Wert für Elektronen ab, die wie z.B. im Inneren einer Fernsehbildröhre das elektrische Feld einer Beschleunigungsspannung von 15.000 Volt durchlaufen haben, so erhält man einen Wert von etwa 10 Picometern, was nur dem siebzigtausendsten (!) Teil der Wellenlänge des roten Lichts ($\lambda \approx 700$ Nanometer) entspricht.[140] Mittels einer Doppelspaltanordnung, die für die Dimensionen des sichtbaren Lichts gedacht ist, würde man somit niemals Interferenzeffekte von Elektronen nachweisen können. Hier verhalten diese sich so, wie man es von klassischen Teilchen erwartet, d.h. sie nehmen ihren Weg (fast) geradlinig durch die beiden Schlitze und werfen dahinter einen scharfen Schatten, der exakt den Doppelspalt abbildet. 1927 gelang den amerikanischen Physikern Clinton Davisson und Lester Germer, Interferenzen von Elektronenwellen tatsächlich nachzuweisen, indem sie statt eines Doppelspaltes die regelmäßige Anordnung der Atome in einem Kristallgitter ausnutzten.[141] Wird ein Elektronenstrahl von solch einer Gitterstruktur reflektiert, so treten Beugungs- und Interferenzeffekte auf, die nur durch die Annahme erklärt werden können, dass sich die materiellen Teilchen bei der Wechselwirkung mit dem Kristall nicht wie solide Geschosse, sondern eher wie ausgedehnte Wellenzüge verhalten. Louis de Broglie erhielt für seine revolutionäre Idee den Physik-Nobelpreis des Jahres 1929.

Es waren nun diese Vorarbeiten de Broglies, die den österreichischen Physiker Erwin Schrödinger (1887-1961) in den Stand versetzten, eine mathematische Beschreibung des Wasserstoffatoms aufzufinden, die die Resultate der Matrizenmechanik Heisenbergs scheinbar unter Umgehung der ungeliebten Quantensprünge reproduzieren konnte und die für kurze Zeit sogar die Hoffnung aufkommen ließ, den leidigen Dualismus von Korpuskeln und Wellen zugunsten der letzteren überwinden zu können. Schrödinger ging dabei von der Annahme aus, dass die vermeintlich korpuskularen Verhaltensweisen der Materie allenfalls als grobe Approximation raumzeitlich situierter Schwingungsvorgänge

---

[140] Nach der von de Broglie formulierten Relation ist die Wellenlänge eines materiellen Teilchens von seinem Impuls abhängig, und es gilt: $\lambda = h/p$. Um die Geschwindigkeit (v) der Elektronen (Ruhemasse $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$kg, Ladung $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$C) nach Durchlaufen des Feldes von U=15000V zu ermitteln, kann man (nicht-relativistisch) setzen: $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = E_{pot} = e \cdot U$ und erhält etwa 72.000 km/s. Für den Impuls gilt klassisch: $p = m_e \cdot v$. Der Quotient aus h (mit $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$Js) und p ergibt dann eine Wellenlänge von etwa $10 \cdot 10^{-12}$ Metern (10 Picometer).

[141] Beugungseffekte, die auf die Wellennatur der Elektronen zurückzuführen sind, waren im Rahmen von Kathodenstrahl-experimenten schon vorher beobachtet worden, allerdings ohne deren Ursache zu verstehen.

gelten können und dass diese Materiewellen das eigentliche Substratum der physikalischen Wirklichkeit seien. Es gelang ihm, das Wasserstoffatom als System räumlich geschlossener Wellenzüge zu betrachten, deren Frequenzen den Energieniveaus des Bohrschen Modells korrespondierten und deren Überlagerung diejenigen elektromagnetischen Wellenlängen produzierte, die das Atom beim Übergang zwischen zwei dieser Zustände emittieren bzw. absorbieren kann. Im Frühjahr 1926 glückte ihm darüber hinaus der Beweis, dass seine „Wellenmechanik“ mit dem abstrakten mathematischen Formalismus Heisenbergs äquivalent war und man nun endlich wieder, wie Schrödinger glaubte, eine anschauliche Theorie der Atome zur Verfügung hatte, d.h. eine Theorie, die in seinen Augen den Namen *physikalisch* überhaupt verdiente. Werner Heisenberg, der seit dem ersten Mai dieses Jahres als Dozent für theoretische Physik am Institut Niels Bohrs in Kopenhagen arbeitete, war zwar über den mathematischen Formalismus Schrödingers sehr erfreut, mit dessen Hilfe sich viele Probleme viel einfacher lösen ließen als mit der etwas umständlichen Matrizenrechnung, hegte aber gegenüber der Hoffnung, die Paradoxien der Quantenmechanik seien damit aus der Welt geschafft, erhebliche Zweifel. Gegen Ende des Sommersemesters 1926 war Erwin Schrödinger von Arnold Sommerfeld nach München eingeladen worden, um über seine Wellentheorie zu berichten. Für Heisenberg, der zu dieser Zeit ebenfalls in München weilte, bot sich hier die Gelegenheit zur Diskussion. In seiner Autobiographie wird er sich später lebhaft an diese Veranstaltung erinnern:

„Am Schluß aber sprach Schrödinger auch über seine Deutung der Wellenmechanik, die ich nicht glauben konnte. In der darauf folgenden Diskussion brachte ich meine Einwände vor; insbesondere wies ich darauf hin, daß man mit Schrödingers Auffassung nicht einmal das Plancksche Strahlungsgesetz würde verstehen können. Mit dieser Kritik hatte ich aber gar kein Glück. Wilhelm Wien antwortete recht scharf, daß er zwar mein Bedauern darüber verstünde, daß es nun mit der Quantenmechanik zu Ende sei und daß man von all dem Unsinn wie Quantensprüngen und dergleichen nicht mehr zu reden brauchte; aber die von mir erwähnten Schwierigkeiten würden zweifellos von Schrödinger in kürzester Frist gelöst werden. Schrödinger war sich nicht ganz so sicher in seiner Antwort, aber auch er blieb überzeugt, daß es nur eine Frage der Zeit sei, wann man die von mir aufgeworfenen Probleme in seinem Sinne bereinigen könnte. Mit meinen Argumenten konnte ich auf niemanden mehr Eindruck machen.“[142]

[142] Heisenberg (2001), S. 91.

5. Die Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik

5.1 Werner Heisenberg und die Unbestimmtheitsrelation

Obwohl die Quantenmechanik gerade erst den Kinderschuhen entwachsen war, bestand im Kreise der Physiker kaum ein Zweifel an der prinzipiellen Angemessenheit und mathematischen Konsistenz der Theorie. Bezüglich ihrer Interpretation jedoch gingen die Meinungen weit auseinander. Niels Bohr und Werner Heisenberg, die ja der festen Überzeugung waren, dass sich mit der Einführung der Quantenmechanik ein tiefgreifender und letztlich irreversibler Bruch mit den Prinzipien der klassischen Physik vollzogen hatte, mussten sich von der Schrödingerschen Deutung geradezu herausgefordert fühlen. Das folgende Jahr war am Kopenhagener Institut von den Bemühungen gekennzeichnet, sich in dieser Frage Klarheit zu verschaffen. In endlosen Diskussionen wurden die Konsequenzen des Formalismus analysiert, indem man regen Gebrauch sowohl von neueren empirischen Daten als auch von sogenannten Gedankenexperimenten machte, d.h. prinzipiell für möglich erachteten Laborsituationen, die aber aufgrund verschiedenartigster experimenteller und finanzieller Einschränkungen tatsächlich nicht realisiert werden konnten. Über den erwarteten Ausgang solcher idealisierten Versuche ließ sich meist ein Konsens herstellen, und, wo dies nicht der Fall war, oftmals ein vereinfachtes, tatsächlich durchführbares Experiment ersinnen, dessen Resultate dann zur Klärung der Situation beitrugen. In ihrem Ringen um die Interpretation der Quantenmechanik gingen Heisenberg und der ältere Bohr von unterschiedlichen Ansatzpunkten aus, was schließlich dazu führte, dass jeder einen jeweils eigenen Aspekt als das eigentliche Charakteristikum der Theorie herausarbeitete. Letztlich sollten jedoch beide Ansichten zu den Grundpfeilern der später „Kopenhagener Deutung der Quantentheorie“ genannten Interpretation zählen.

Die Überlegungen Heisenbergs befassen sich vornehmlich mit der Frage nach den Grenzen der Anwendbarkeit raumzeitlicher Begriffe, und es gelingt ihm, mittels geeigneter Gedankenexperimente und durch eine genaue Analyse des vorliegenden Formalismus eine quantitative Beziehung herzuleiten, die für bestimmte Paare beobachtbarer Größen (sogenannter Observablen) die maximale Genauigkeit festlegt, mit der beide zur gleichen Zeit ermittelt werden können oder, genauer, mit der beide im Gültigkeitsbereich der Quantenmechanik überhaupt bekannt sein können. In seiner grundlegenden Arbeit, die im

März 1927 in der deutschen *Zeitschrift für Physik* erschien, versucht Heisenberg anhand des Beispiels der Elektronenbahn im Atom, eines Begriffes, der im Rahmen der traditionellen Physik als sinnvoll und wohldefiniert angesehen werden kann, die Ursache dieser sogenannten Unschärfe- oder Unbestimmtheitsrelation in anschaulicher Form darzulegen.[143] Dabei werden zunächst einmal die Begriffe Ort und Impuls, d.h. räumliche Position und Bewegungsgröße eines Elementarteilchens, in operationalistischer Weise umgedeutet: „Wenn man sich darüber klar werden will, was unter dem Worte ´Ort eines Gegenstandes´, z.B. des Elektrons (relativ zu einem gegebenen Bezugssystem), zu verstehen sei, so muß man bestimmte Experimente angeben, mit deren Hilfe man den ´Ort des Elektrons´ zu messen gedenkt; anders hat dieses Wort keinen Sinn.“[144] Akzeptiert man zunächst einmal diese Umdeutung, welche an dieser Stelle noch keineswegs als hinreichend gut begründet erscheinen mag, so zeigt der genauere Blick auf die näheren Umstände eines solchen Messvorgangs, dass im Bereich atomarer Größenordnungen der Einfluss des jeweiligen Messgerätes auf den zu untersuchenden Gegenstand in keiner Weise mehr vermieden werden kann. Im Falle der räumlichen Lokalisation hat die immer genauere Kenntnis der Position eines Objektes (z.B. eines Elektrons) eine immer größere Unsicherheit bezüglich der Geschwindigkeit[145] desselben zur Folge und umgekehrt, und das Produkt dieser beiden Unsicherheiten, die in der Regel in Form statistischer Standardabweichungen angegeben werden, kann nie unter eine gewisse, wenn auch sehr kleine Grenze herabgedrückt werden.
Es gilt bezüglich der Orts- (Δp) und Impulsunschärfe (Δq) die Beziehung: $\Delta p \cdot \Delta q \geq h$, wobei mit h das Plancksche Wirkungsquantum bezeichnet ist. Heisenberg veranschaulicht diese Situation anhand der Ortsbestimmung eines Elektrons im Wasserstoffatom, welches mittels einer Lichtquelle beleuchtet und damit gleichsam „gesehen“ werden kann. Man könnte sich z.B. eine zwar idealisierte, aber dennoch physikalisch mögliche Lichtquelle denken, die lediglich ein einziges Lichtquant von vorher frei wählbarer Frequenz („Farbe“) emittiert. Über diesen Parameter ist nach den von Einstein formulierten Relationen die Energie (über $E=h\cdot\nu$) und der Impuls (mit $p=h/\lambda$) des Quants festgelegt, und diese Eigenschaften bestimmen die Stärke der Wechselwirkung zwischen Licht und Elektron. Aus der klassischen Theorie des Lichts ist bekannt, dass das Auflösungsvermögen eines

---

[143] Vgl. Heisenberg (1927)
[144] Heisenberg (1927) in Baumann/Sexl (1984), S. 55.
[145] Genauer: des Impulses, der in der nicht-relativistischen Mechanik einfach durch das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit gegeben ist.

optischen Gerätes von der Wellenlänge der verwendeten Strahlung abhängig ist. Je kürzer die Wellenlängen, desto kleinere Objekte können noch scharf abgebildet werden.[146] Um den Ort eines Elementarteilchens ermitteln zu können, muss man entsprechend kurzwellige Strahlung verwenden, die weit jenseits des sichtbaren optischen Bereiches liegt, der mit violettem Licht etwa bei λ=0,4 Mikrometern endet. Das grundlegende und unvermeidliche Problem besteht nun darin, dass die Energie sehr kurzwelliger Strahlung (z.B. Röntgen- oder Gammastrahlung, die bei radioaktiven Atomzerfällen entsteht) groß genug ist, um das Atom, dessen zugehörige Elektronenbahn man zu beobachten gedenkt, zu ionisieren, d.h. das Elektron aus der Hülle ganz herauszuschlagen. Die Richtung des im Zuge dieser Wechselwirkung abgelenkten Lichts gestattet es, die ehemalige Position des Teilchens zu erschließen, doch dieses Wissen erlangt man nur auf Kosten der Zerstörung der ursprünglichen Bewegungsgröße und -richtung (des Impulses); die Bahn „verschwindet" im gleichen Augenblick, in dem man sie beobachtet. Greift man nun, um diesen extremen Einfluss zu vermeiden, zu Strahlung von größerer Wellenlänge, welche zur Ionisation nicht ausreicht, so erhält man zwar eine gewisse Information über die Position des Elektrons, doch diese ist aufgrund der jetzt bedeutender werdenden Beugungseffekte nur sehr ungenau. Es ergibt sich ein sehr verschwommenes Bild von der räumlichen Lage des Teilchens, quantitativ ausgedrückt als statistische Verteilung seiner möglichen Orte.

Interessiert man sich nicht für die räumliche Lokalisation, sondern für den Impuls und damit die Geschwindigkeit eines Elektrons, so kann man diese Messung ebenfalls durch Bestrahlung mit Licht bewerkstelligen. Zu diesem Zweck muss aber die Wellenlänge des verwendeten Lichts, im Gegensatz zum geschilderten Fall der Ortsmessung, möglichst gering sein, denn der Eigenimpuls des einfallenden Lichtquants[147] sollte im Rahmen der Wechselwirkung, die man sich – ohne dieses Bild zu ernst zu

---

[146] Dieser Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Auflösungsvermögen resultiert aus dem Phänomen der Beugung, welches wiederum eine allgemeine Eigenschaft jedweder (d.h. nicht nur optischer) Wellen ist und demnach auch anhand von Wasserwellen einsichtig gemacht werden kann: Setzt man in Ausbreitungsrichtung einer ebenen Wasserwelle ein Hindernis, so stellt sich hinter diesem das Analogon eines optischen Schattens ein, d.h. ein Areal, in dem keine Wellen anzutreffen sind. Die Größe dieses Bereiches ist von dem Verhältnis der Wellenlänge zu den Ausmaßen des Hindernisses abhängig. Je größer das Hindernis in Relation zur Wellenlänge (oder je kleiner die Wellenlänge in Relation zum Hindernis), desto größer und ausgeprägter der Bereich des Schattens. Wird die Barriere relativ zur Wellenlänge vernachlässigbar klein, so stellt sich überhaupt kein nennenswerter „Schatten" mehr ein, d.h. die Welle passiert das Hindernis scheinbar ohne davon beeinflusst zu werden – man denke sich z.B. einen senkrechten Pfahl von 10 cm Durchmesser im Meeresboden verankert und Wellen von einigen Metern Wellenlänge: Es wäre unmöglich, diesen Pfahl durch „Beleuchtung" mit Wasserwellen dieser Größe sichtbar zu machen. Das Auflösungsvermögen optischer Mikroskope erklärt sich ebenfalls aus diesem Umstand, d.h. die Abbildung wird immer unschärfer, je stärker sich die Größe der abzubildenden Objekte der Größenordnung der Wellenlänge des verwendeten Lichts annähert.

[147] Der Impuls des Lichtquants steht bekanntlich in umgekehrt-proportionalem Verhältnis zu seiner Wellenlänge ($p=h/\lambda$).

nehmen – als Kollision vorstellen kann, die zu messende Größe ja möglichst wenig beeinträchtigen. Je länger die Wellen gewählt werden, desto geringer ist ihr Einfluss auf den Impuls des Elektrons und desto exakter lässt sich dieser bestimmen.[148] Gleichzeitig wird aber aufgrund der jetzt immer stärker auftretenden Beugungseffekte die Information über den Ort entsprechend ungenau, d.h. das räumliche Auflösungsvermögen immer schlechter. Da nach der Vorhersage der Quantentheorie das Produkt beider Unsicherheiten größer Null ist ($\Delta p \cdot \Delta q \geq h$), so impliziert im theoretischen Grenzfall die vollkommen exakte Kenntnis des einen Parameters die völlige Unkenntnis bezüglich des jeweils anderen, und diese Begrenzung ist, wie Heisenberg zu verdeutlichen sucht, auf keine denkbare Weise zu umgehen.

Bis zu dieser Stelle der Argumentation enthält die Unbestimmtheitsrelation, abgesehen von der genauen quantitativen Festlegung der maximal möglichen Kenntnis von Ort und Impuls, keine der klassischen Physik prinzipiell fremden Ideen.[149] Auch in deren Rahmen konnte man leicht einsehen, dass die absolute Trennung zwischen Subjekt und Objekt in immer kleineren Dimensionen insofern problematisch werden würde, als der Einfluss von Messgeräten auf den zu messenden Gegenstand eine genaue Bestimmung der mechanischen Zustände desselben *praktisch* unmöglich machen könnte. Diese Grenze der Naturerkenntnis wäre aber eine vom Experimentator aktiv herbeigeführte und keinesfalls eine dem mikroskopischen System selbst anhaftende Eigenschaft. Mit vollem Recht hätte man behaupten können, dass eine eindeutig festgelegte Elektronenbahn im Atom *existiert*, auch dann, wenn niemand in der Lage ist und grundsätzlich nicht in der Lage sein kann, sie zu sehen.

Den genannten Aufsatz Heisenbergs kann man als die erste seiner Schriften zum Deutungsproblem der Quantenphysik ansehen, und die zeitliche Nähe zu den Entstehungsumständen der Matrizenmechanik ist noch deutlich zu spüren. Wie bereits

---

[148] Man nutzt hier die optische Variante des sogenannten „Doppler-Effektes“: Wird eine Welle (z.B. eine Schallwelle) von einem Objekt reflektiert, so haben der ursprüngliche und der reflektierte Wellenzug (das „Echo“) die gleiche Frequenz bzw. die gleiche Wellenlänge. Bewegt sich aber der Reflektor relativ zur Welle, so hat seine Bewegung einen Einfluss auf die Länge der reflektierten Schwingung: Bewegt er sich auf den Emissionsort zu, so verringert sich deren Wellenlänge, entfernt er sich, so vergrößert sich diese in gesetzmäßiger Weise. Man kann also durch die Frequenz- bzw. Wellenlängenänderung des von einem Elektron gestreuten Lichts auf seine Geschwindigkeit schließen, was umso genauer möglich ist, je geringer der Impuls des zugehörigen Lichtquants die zu messende Größe stört, d.h. je größer die Wellenlänge der zu diesem Zweck verwendeten Strahlung gewählt wird.

[149] Dass hier das Plancksche Wirkungsquantum eine Rolle spielt, kann aber bereits als Hinweis auf das grundsätzlich „unklassische“ Fundament der Unbestimmtheitsrelation gewertet werden. Wie sich zeigen wird, ist das eigentliche Wesen jener Beschränkung der Naturerkenntnis durch den Hinweis auf die unvermeidlichen Störungen eines zu messenden Systems durch den Beobachter keinesfalls angemessen und erschöpfend charakterisiert.

geschildert, war der Ausgangspunkt dieses Formalismus eine unumwunden positivistische Abkehr von Vorgängen und physikalischen Größen, die im Zuge der bisherigen Experimente einer Beobachtung schlechterdings unzugänglich gewesen waren und die demnach in der Theorie auch keine Berücksichtigung finden sollten. Diese war lediglich dazu geschaffen, Voraussagen über den Ausgang von empirischen Messungen zu liefern, ohne in dem Sinne anschaulich zu sein, in welchem man noch im Rahmen der klassischen Physik von objektiven und stetigen Vorgängen in Raum und Zeit hatte sprechen können. Heisenberg versucht zu Beginn seiner Abhandlung, der diesbezüglichen Kritik an der Matrizenrechnung, die an prominentester Stelle von Erwin Schrödinger formuliert worden war[150], durch eine gewagte Neudefinition des Begriffs „anschaulich" zu begegnen: „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 gleichzeitg erkannt haben, daß die Anwendung der Theorie niemals innere Widersprüche enthält."[151] Heisenberg scheint sich hier, angesichts des starken Ressentiments vieler Physiker gegenüber der Quantenmechanik, zur sprichwörtlichen „Flucht nach vorne" entschlossen zu haben, ohne jedoch selbst ein derart überzeugter Positivist zu sein. Seine später formulierten Ansichten, in denen er der Schrödingerschen Wellenfunktion als Ausdruck objektiv in der Natur vorhandener Tendenzen oder Potentialitäten gleichsam eine ontologische Dimension verschaffen will, zeigen dies sehr deutlich. Was in dieser frühen Schrift auf keinen Fall zur Disposition steht, ist die Überzeugung, dass der in Form der Matrizenrechnung oder in Gestalt der mathematisch äquivalenten Schrödingerschen Wellenmechanik vorliegende Kalkül prinzipiell richtig, widerspruchsfrei und vor allem vollständig ist. Heisenberg ist im Gegensatz zu seinen Opponenten fest davon überzeugt, dass schlechterdings alles, was es in einem Atomprozess überhaupt zu wissen gibt, in den Gleichungen der Quantenmechanik angemessen zum Ausdruck kommt oder, was dasselbe ist, dass es als aussichtslos gelten muss, von eingehenderen Forschungen mehr Informationen über mikrophysikalische Vorgänge zu erwarten, als bereits jetzt im Formalismus implizit enthalten sind. Die quantitative Formulierung der Unbestimmt-

---

[150] In einer berühmt gewordenen Fußnote der 1926 publizierten Arbeit Schrödingers, in welcher er die Äquivalenz von Matrizen- und Wellenmechanik demonstriert hatte, finden sich bezüglich seiner eigenen Theorie (der Wellenmechanik) die folgenden Worte: „Eines genetischen Zusammenhanges mit Heisenberg bin ich mir durchaus nicht bewußt. Ich hatte von seiner Theorie natürlich Kenntnis, fühlte mich aber durch die mir sehr schwierig scheinenden Methoden der transzendenten Algebra und durch den Mangel an Anschaulichkeit abgeschreckt, um nicht zu sagen abgestoßen." Zitiert nach Cassidy (1992) in Neuser (1996), S. 44.

[151] Heisenberg (1927) in Baumann/Sexl (1984), S. 53.

heitsrelation, die man als den wichtigsten Ertrag dieses frühen Aufsatzes ansehen kann, hängt in ihrer Relevanz nur von dieser Überzeugung ab, denn, die Richtigkeit der vorliegenden Quantenmechanik vorausgesetzt, folgt jene Beziehung auf rein deduktivem Wege unmittelbar aus der Theorie.[152] Es ist dieser Sachverhalt, infolge dessen Heisenberg die durch die Unbestimmtheitsrelation vorgegebenen Grenzen der gleichzeitigen Kenntnis bestimmter physikalischer Parameter als unumgänglich deklariert: „Gäbe es Experimente, die gleichzeitig eine ´schärfere´ Bestimmung von p und q ermöglichten, als es der Gleichung (1) [der Unbestimmtheitsrelation] entspricht, so wäre die Quantenmechanik unmöglich.“[153]

Der Glaube an die prinzipielle Vollständigkeit dieser Theorie ermöglichte nun neben der sicherlich beabsichtigten Provokation eines überzogenen Positivismus auch eine alternative, dem klassischen Selbstverständnis der Physik naheliegendere Interpretation, die bereits schemenhaft und gleichsam zwischen den Zeilen seines Aufsatzes über den *anschaulichen Inhalt der quantenmechanischen Kinematik und Mechanik* hervorscheint. Die starke Betonung des Einflusses, welchen der Experimentator unvermeidlich und teilweise unkontrollierbar auf ein quantenphysikalisches Objekt nehmen muss, um selbiges zu vermessen, verstellt hier noch den Blick auf die tiefere Bedeutung der Gleichungen, die Heisenberg sicherlich schon im Sinne hatte, ohne jedoch jetzt schon die treffenden Worte zu finden.

Für das Denken des Alltagsverstandes scheint z.B. der Sinn des Begriffes der Existenz oder der raumzeitlich genau bestimmten Bewegung eines materiellen Objektes vollkommen unabhängig davon zu sein, ob jemand den betreffenden Gegenstand (direkt oder indirekt) wahrnimmt oder nicht. Die Differentialgleichungen, die es nach der überlieferten Mechanik gestatten, die räumliche Position eines bewegten Gegenstandes zu jedem beliebigen Zeitpunkt vorauszuberechnen, werden gewöhnlich ebenfalls in diesem Sinne aufgefasst, dass sie objektive Vorgänge in Raum und Zeit beschreiben und nicht nur ein bloßes Instrument der Koordination einzelner Beobachtungen darstellen. Richtet man nun den gleichen Anspruch an den Formalismus der Quantenmechanik, so ergibt sich die

---

[152] Bereits kurz nachdem Heisenberg seine Matrizenmechanik vorgestellt hatte, zeigten die Untersuchungen von Max Born, Paul Dirac und Pascual Jordan, dass bestimmte Matrizen nicht „miteinander vertauschen“. Beispielsweise ist das Produkt aus Orts- und Impulskomponete in der Beschreibung eines quantenphysikalischen Teilchens nicht gleich dem Produkt aus Impuls- und Ortskomponente ($p \cdot q \neq q \cdot p$). Der jeweils zweite Wert hängt offenbar auf subtile Weise von der Bestimmung des ersten ab, d.h. Ort und Impuls sind keine prinzipiell unabhängigen Parameter mehr, wie dies in der klassischen Physik noch als selbstverständlich angenommen wurde. Die genaue diesbezügliche „Vertauschungsrelation“ hat die Form: $pq - qp = h/2\pi i$ mit „h“ als Planckschem Wirkungquantum und „i“ als imaginärer Wurzel aus -1.

[153] Heisenberg (1927) in Baumann/Sexl (1984), S. 60f.

etwas seltsam klingende Behauptung, dass die Unschärfe der Größen wie Ort und Impuls unter Umständen eine fundamentale Eigenschaft der Naturprozesse selbst charakterisiert und dass diese innerhalb des mathematisch vorgegebenen Spielraums auch dann besteht, wenn überhaupt keine Wechselwirkung mit einem Messgerät stattfindet. Später wird Heisenberg jene Idee als „Umkehrung der Fragestellung“ bezeichnen: „Statt zu fragen: wie kann man in dem inzwischen bekannten mathematischen Schema eine gegebene experimentelle Situation beschreiben? stellte man die andere Frage: ist es vielleicht wahr, daß nur solche experimentelle Situationen überhaupt in der Natur vorkommen, die in dem mathematischen Formalismus der Quantentheorie auch ausgedrückt werden können?“[154] Dem berechtigten Einwand, wie man sich denn die Unschärfe einer Größe an und für sich, d.h. unabhängig von einer konkreten Messung, vorstellen soll, kann dann mit dem Hinweis darauf begegnet werden, dass eine raumzeitlich anschauliche Beschreibung dessen, was zwischen zwei Messungen geschieht, grundsätzlich ausgeschlossen ist, und zwar im nämlichen Sinne, wie z.B. die unvereinbaren Aspekte von ausgedehnten Wellen und genau lokalisierten Teilchen gleichermaßen herangezogen werden müssen, um das Verhalten von elektromagnetischer Strahlung oder sogar konventioneller Materie vorherzusagen, ohne dass auch nur die geringste Möglichkeit bestünde, sich vorzustellen, was dabei „wirklich“ im Raum geschieht.[155] Ob nun die wechselweise aufeinander bezogene Unbestimmtheit gewisser physikalischer Größenpaare[156] ein lediglich erkenntnistheoretisches oder vielmehr ein ontologisches Problem darstellt, wird später zum Kernthema der kritischen Auseinandersetzung mit der *Kopenhagener Deutung* der Quantentheorie gehören, zumal der endgültige Verzicht auf die im Formalismus nicht enthaltenen Bestimmungsstücke physikalischer Systeme einen schwer zu ertragenden Abschied vom klassischen Ideal des Determinismus bedeutet. Dessen ist sich Heisenberg in vollem Umfang bewusst, wenn auch die im frühen Aufsatz aus dem Jahr 1927 gegebene Erklärung des Sachverhaltes wiederum so klingt, als sei dieses Verhalten nicht der Natur *an und für sich* beizulegen,

---

[154] Heisenberg (1990), S. 25.

[155] Man denke z.B. an die oben bereits erwähnten Interferenzversuche Geoffrey Taylors, die mit derart schwachem Licht durchgeführt wurden, dass eine Wechselwirkung zwischen Lichtquanten, die als mögliche Ursache der klassisch nicht zu erklärenden Trajektorien hätte herangezogen werden können, definitiv ausgeschlossen war. Auf diesen Doppelspalt-Versuch, an dessen Beispiel man die gesamte Tiefe der quantentheoretischen Rätsel veranschaulichen kann, wird später noch einmal detailliert einzugehen sein.

[156] Die Paare, für die jeweils die Beschränkungen der Unbestimmtheitsrelation gelten, nennt man in der Physik „kanonisch konjugierte Variablen“, und diese sind u.a. dadurch gekennzeichnet, dass ihr mathematisches Produkt die Dimension einer Wirkung (Energie · Zeit) hat. Neben Ort/Impuls ist z.B. auch das Paar Zeit/Energie der Unbestimmtheitsrelation unterworfen.

sondern eher eine Folge der unkontrollierbaren Störungen eines jeden Messvorgangs:

„[...] an der scharfen Formulierung des Kausalgesetzes ´Wenn wir die Gegenwart genau kennen, können wir die Zukunft berechnen´, ist nicht der Nachsatz, sondern die Voraussetzung falsch. Wir können die Gegenwart in allen Bestimmungsstücken prinzipiell nicht kennenlernen.“[157]

[157] Heisenberg (1927) in Baumann/Sexl (1984), S. 78.

5.2 Niels Bohr und der Komplementaritätsgedanke

Betrachtet man diesen frühen Aufsatz Heisenbergs, so scheint ihm vor allem daran gelegen zu sein, die empirischen Konsequenzen des mittlerweile in unterschiedlichen Spielarten vorliegenden Kalküls in aller Schärfe herauszuarbeiten.[158] Als hauptsächlichstes Resultat dieser Analyse kann man die Formulierung der Unbestimmtheitsrelation ansehen, welche einen exakten mathematischen Rahmen für die maximal mögliche Kenntnis zweier kanonisch konjugierter Variablen[159] vorgibt und mit der, wie David Cassidy bemerkt, zum ersten Mal seit dem Aufstieg der neuzeitlichen Wissenschaft im frühen 17. Jahrhundert eine prinzipielle Schranke der Naturerkenntnis verkündet wird.[160] Für Niels Bohr, der an den Überlegungen Heisenbergs einen entscheidenden Anteil hatte, war mit dieser bedeutenden Arbeit jedoch nur ein Teil des Weges zu einer zufriedenstellenden Deutung der Quantenmechanik zurückgelegt. Seine eigenen Bemühungen, das Wesen der neuartigen Physik zu erfassen, führen ihn schließlich zur Formulierung des viel fundamentaleren Prinzips der „Komplementarität“, als dessen eine seiner möglichen Manifestationen die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation zu gelten hat.

Für Bohr sind die quälenden Paradoxien, mit denen sich die Naturforscher im Bereich der Mikrophysik konfrontiert sehen, vor allem darin begründet, dass jedwede physikalisch sinnvolle Beschreibung der Welt notgedrungen von alltäglichen Begriffen und Anschauungsformen ausgehen muss, deren Anwendung aber gleichwohl im Geltungsbereich der Quantenmechanik vollkommen zu versagen scheint. Diese Widersprüchlichkeit findet ihren allgemeinsten Ausdruck im offenbar unvermeidlichen Dualismus von Welle und Teilchen, der bereits in der genaueren Analyse des Lichts aufgetreten war und der sich im Zuge der Arbeiten Louis de Broglies auch auf die Grundbestandteile der Materie ausgeweitet hatte. Beide Konzepte sind, wie schon des öfteren ausgeführt, logisch unvereinbar, d.h. auch ohne die nähere Bestimmung ihrer jeweiligen Attribute ist offensichtlich, dass aus rein begrifflichen Gründen ein raumzeitlich lokalisiertes Teilchen keine Welle sein kann und eine gleichsam *per definitionem* ausgedehnte Welle kein scharf begrenztes Teilchen. Die eine Welle bestimmenden Größen

---

[158] Die „erste“ Quantenmechanik, die Matrizenrechnung, stammte von Heisenberg selbst. Auf diese folgten der von Erwin Schrödinger ausgearbeitete wellenmechanische Kalkül und die von Paul Dirac entwickelte „Transformationen-theorie“.
[159] Vgl. Anm.157.
[160] Vgl. Cassidy (1992) in Neuser (1996), S. 42.

wie Wellenlänge und Frequenz können nur in einem sowohl räumlich als auch zeitlich ausgedehnten Schwingungsprozess überhaupt definiert werden und in aller Exaktheit sogar nur dann, wenn der Wellenzug eine tatsächlich unendliche Länge annimmt. Umgekehrt beinhaltet der Begriff der genauen Position einer materiellen Korpuskel deren Idealisierung auf einen unausgedehnten Schwerpunkt, den sogenannten Massenpunkt, der sowohl in der räumlichen als auch der zeitlichen Dimension die Ausdehnung Null besitzt. Der direkte Widerspruch, der durch eine gleichzeitige Anwendung beider Bilder notwendig entstehen muss, wird nach den Überlegungen Bohrs durch die innere Konstruktion der Quantenmechanik insofern vermieden, als jede auch nur denkbare experimentelle Situation in der Deutung ihrer Resultate jeweils nur eines der beiden Modelle zu nutzen vermag, obwohl das Gesamtphänomen durch den jeweils anderen, nicht direkt zu beobachtenden Aspekt unvermeidlich beeinflusst wird und deshalb auch nicht vernachlässigt werden kann. Phänomenbeschreibungen und experimentelle Situationen, die zu ihrer Charakterisierung zweier kontradiktorischer Prinzipien bedürfen, deren direkte „Kollision“ aber durch die Grenzen der Anwendung bestimmter Begriffe oder durch die prinzipiell unüberwindlichen, d.h. in der Natur der Sache begründeten Beschränkungen jedweden empirischen Messvorgangs grundsätzlich ausgeschlossen ist, versieht Bohr mit dem Begriff der *Komplementarität* und sieht in dieser Relation gewissermaßen den Schlüssel zur Auflösung der quantenmechanischen Paradoxien.

Anhand des Doppelspaltversuches, wie er z.B. im relativ einfachen Experimentalaufbau Geoffrey Taylors realisiert ist, kann man die Grundgedanken der Komplementarität auf den Punkt bringen und im übrigen ein weiteres Prinzip aufweisen, welches Bohr anlässlich eines im September 1927 gehaltenen Vortrages[161] als das zweite grundsätzliche Charakteristikum quantenmechanischer Prozesse einführen wird: dass diesen ein der klassischen Physik völlig fremder Zug von Diskontinuität und Individualität innewohnt, angesichts dessen der Versuch einer lückenlosen kausalen Beschreibung der Systeme von vorneherein zum Scheitern verurteilt ist. Diese Eigenschaft wird als sogenanntes *Quantenpostulat*[162] dem bereits erwähnten Begriff der Komplementarität an die Seite

---

[161] Der äußere Rahmen dieses Vortrages war die zu Ehren Alessandro Voltas abgehaltene Physiker-Konferenz im italienischen Como. Die schriftliche Version, die, wie Bohr betont, im wesentlichen dem Wortlaut dieses Vortrages entspricht, wurde 1928 in der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften* veröffentlicht. Vgl. Bohr (1928).

[162] „[…] jeder atomare Prozeß [enthält] einen Zug von Diskontinuität oder vielmehr Individualität […], der den klassischen Theorien vollständig fremd ist und durch das Plancksche Wirkungsquantum gekennzeichnet ist.“ Vgl. Bohr (1928), S. 245.

gestellt und ist für die Beschreibung des Verhaltens der Systeme im Bereich atomarer Größenordnungen in gleicher Weise unerlässlich.

Die einzelnen Teile des optischen Doppelspaltversuchs, der zu Beginn des 19. Jahrhunderts eine langsam einsetzende Reevaluierung der Wellentheorie des Lichts nach sich gezogen hatte, sind aufgrund der für experimentelle Zwecke vergleichsweise großen Wellenlänge fast schon von makroskopischer Dimension.[163] Eine geeignete Anordnung hat z.B. einen Spaltabstand von ca. einem Millimeter und eine Spaltbreite von jeweils 0,3 Millimetern. Bei der Beleuchtung mit entsprechend vorbereitetem Licht[164] stellt sich auf dem Schirm hinter dem Spalt ein regelmäßiges Streifenmuster ein, welches nur durch die Interferenz zweier kreisförmiger Wellenzüge[165] erklärt werden kann, d.h. durch die wechselweise auftretende Verstärkung und Auslöschung sich überlagernder Wellen. Die Intensität einer Welle ist, wie bereits oben erwähnt, proportional zum Quadrat ihrer Amplitude. Auf dem Leuchtschirm hinter dem Doppelspalt erhält man die Intensität an einem beliebigen Punkt, indem man die Amplituden der beiden an dieser Stelle ankommenden Wellenzüge addiert und dann diese Summe quadriert. Ist mit x die Amplitude der ersten und mit y die Amplitude der zweiten Welle bezeichnet, so ergibt sich die Intensität I an einer ausgewählten Stelle des Schirms zu $I=(x+y)^2$.

Bis hierher bedarf es zur Erklärung des Phänomens nur der klassischen Wellentheorie des Lichts und keiner quantenmechanischen Betrachtung. Diese ist aber dann vonnöten, wenn man wie im Taylorschen Versuch als Detektor einen lichtempflindlichen Film verwendet und die Intensität der Strahlung, die den Spalt beleuchtet, so weit reduziert, dass sich zu jedem beliebigen Zeitpunkt maximal die Energie eines einzelnen Lichtquants in der Apparatur befinden kann. Auf diesem Film wird man bei ensprechend kurzer Dauer des

---

[163] Hier dienen als Vergleichsmaßstab natürlich diejenigen Wellenlängen, die über die de-Broglie-Beziehung $\lambda=h/p$ anderen mikrophysikalischen „Objekten“ zugeordnet werden können und die selbst im Fall der sehr leichten Elektronen (mit entsprechend geringen Impulswerten) mehr als den Faktor 10.000 kleiner sind als die des Lichts.

[164] Das verwendete Licht muss „kohärent“ sein, d.h. eine einheitliche Wellenfront bilden. Dies ist bei einer realen Lichtquelle, wie z.B. einer Glühlampe natürlich nicht der Fall, da diese auf der gesamten Länge des Glühfadens Licht aussendet, dessen Wellen nicht synchronisiert (genauer: „in Phase“) sind. Durch eine vorgeschaltete Optik wird im Experiment nur dasjenige Licht auf den Doppelspalt projiziert, welches von einem quasi punktförmigen Areal des Glühfadens stammt und demnach als idealisierte Quelle einer kohärenten Kugelwelle angesehen werden kann. Man kann vermuten, dass das Erfordernis dieser sogenannten Kohärenzbedingung die Entdeckung der Interferenzfähigkeit des Lichts sehr lange verhindert hatte.

[165] Dies ist natürlich nur in der auf eine vertikale Ebene projizierten schematischen Darstellung der Fall. Tatsächlich ist die dritte räumliche Dimension ebenfalls beteiligt, d.h. die Wellen breiten sich von einem Punkt in Form einer Kugeloberfläche in alle Richtungen aus, sie sind im Falle des Lichts keine Kreis-, sondern eher Kugelwellen. Im Falle des Doppelspalt-Experiments überlagern sich alle von der vertikalen Linie eines Spaltes ausgehenden Kugelwellen zu einer zylinderförmigen Wellenfront. Schneidet man diese in einer Ebene, deren Normale parallel zum Spalt liegt, so erhält man wieder die Gestalt einer Kreiswelle. Im nachfolgenden Text wird von dieser durchaus zulässigen räumlichen Vereinfachung Gebrauch gemacht.

Experiments z.B. nur einen einzigen geschwärzten Fleck vorfinden, der aus der Wechselwirkung eines einzelnen und vollständigen Lichtquants mit der lichtempfindlichen Beschichtung des Films resultiert. Wäre das Licht auch bei sehr starker Intensitätsreduktion immer noch eine vollständige Welle, deren Energie mehr oder weniger gleichmäßig in der Apparatur verteilt ist, so müsste ein komplettes, wenn auch sehr schwaches Streifenmuster auf dem Film erscheinen. Der diskrete Fleck deutet hingegen auf die quantenhafte bzw. korpuskulare Natur des Lichts hin, die bereits bei der Analyse des Fotoeffektes zum Vorschein gekommen war und die Einstein zur Postulierung seiner Lichtquantenhypothese bewogen hatte. Die Entstehung dieses geschwärzten Punktes könnte man sich durch die Trajektorie eines klassischen Teilchens entstanden denken, welches, nachdem es von der Lichtquelle ausgesandt wurde, durch einen der beiden Spalten hindurchfliegt und auf dem Film „einschlägt“, wie ein Geschoss. Dass diese Deutung unzulässig ist, bemerkt man spätestens dann, wenn man den Versuch über eine längere Zeit durchführt, nach der sich schließlich aus jeweils einzelnen schwarzen Flecken auf dem Film nach und nach das gleiche streifenförmiger Interferenzmuster herausbildet, wie es infolge der Interferenz von Wellen zu erwarten gewesen wäre. Auf irgend eine seltsame Weise muss ein einzelnes Lichtquant, welches aufgrund der Versuchsbedingungen immer nur „alleine“ und „ungeteilt“ in der Apparatur sein kann, wie eine Welle durch beide Spalten laufen, mit „sich selbst“ interferieren und an einer beliebigen Stelle, die nicht durch destruktive Interferenz „verboten“ ist, mit dem Film in Wechselwirkung treten, d.h. seine gesamte Energie an einer genau lokalisierten Stelle abgeben wie ein klassisches Teilchen. Man könnte nun vermuten, dass trotz des extrem abgeschwächten Lichts vielleicht auf unverstandene Weise mehrere Lichtquanten gleichzeitig in der Apparatur akkumuliert werden, die durch eine komplexe Wechselwirkung untereinander auf Trajektorien gelenkt werden, die genau zu den aus der Wellentheorie bekannten Interferenzstreifen führen. Doch auch dieser Ausweg einer anschaulichen Erklärung des Phänomens scheint ausgeschlossen: Führt man viele Versuche unabhängig voneinander und jeweils nur solange durch, bis ein einzelner schwarzer Fleck auf dem Film entstanden ist, und legt alle diese Filme übereinander, so ergibt die Addition sämtlicher Punkte wieder das aus der Wellentheorie bekannte Interferenzmuster! Was dabei „wirklich“ im Doppelspaltexperiment geschieht, lässt sich weder durch die Annahme einer klassischen Welle noch durch die Vorstellung der

Trajektorie eines zu jeder Zeit exakt lokalisierten Teilchens beschreiben. Es lässt sich aufgrund der Widersprüchlichkeit von Wellen- und Teilchenaspekten eigentlich überhaupt nicht mehr anschaulich vorstellen. Beide Betrachtungen sind zur Erklärung des Phänomens (einer bestimmten Verteilung schwarzer Punkte auf einem fotographischen Film) unbedingt zur Anwendung zu bringen, obwohl beide zusammengenommen die Chimäre eines hölzernen Eisens oder besser: eines wellenartigen Teilchens ergeben – eine *contradictio in adjecto*.

Es ist nun genau an dieser Stelle, an welcher Bohr auf das Vorliegen zweier komplementärer Beschreibungsysteme hinweist, die den Sinn dieses Attributes auf das Deutlichste vor Augen führen. Fragt man nach der raumzeitlichen Beschreibung des Lichts, so muss man sich der Wellenvorstellung bedienen und erhält eine ebene Front, welche sich hinter den beiden Spalten in zwei eigenständige Gebilde aufteilt. Diese beiden Wellen nehmen, da sie jeweils von einem begrenzten räumlichen Areal (dem Spalt) ihren Ausgang nehmen, die Form eines Kreises bzw. eines Kreissektors an und wandern in Richtung des Schirmes, wobei sie sich in den gemeinsam okkupierten Gebieten störungsfrei überlagern, d.h. interferieren. Das sich einstellende Streifenmuster in der senkrecht zur Wellenfront stehenden Ebene des Beobachtungsschirmes ist die beeindruckende Folge dieser Interferenz. Fragt man aber nach einer kausalen Deutung des Vorgangs, d.h. nach einem Prozess, in welchem die Gesetze der Energie- und Impulserhaltung gelten, so ist aufgrund der experimentellen Fakten offensichtlich, dass jedwede Wirkung des Lichts quasi korpuskular konstituiert ist und auch nur korpuskular, d.h. ganz oder gar nicht, übertragen wird (Einsteins Lichtquantenhypothese). Bei extrem schwachem Licht wird von der Lichtquelle in einem vorgegebenen Zeitintervall (z.B. pro Stunde) statistisch nur die Energie eines einzelnen Lichtquants in den experimentellen Aufbau abgestrahlt, und diese Energie kommt auch vollständig auf dem als Detektor dienenden fotographischen Film an. Über den Weg, den diese Wirkung innerhalb der Apparatur zurückgelegt hat, lässt sich keine Aussage treffen[166]; es lässt sich nur sagen, dass im individuellen Einzelprozess (Schwärzung des Films an einem Punkt) der Energieerhaltungssatz uneingeschränkte Gültigkeit besitzt, d.h. hier genauso viel Energie frei bzw. übertragen wird, wie von Seiten der Lichtquelle emittiert wurde. Diese Kausalität

[166] Auf die Möglichkeit, an den Spalten selbst Detektoren aufzustellen, die es gestatten, definitiv zu entscheiden, welchen Weg die Lichtquanten im Experiment eingeschlagen haben, wird weiter unten noch einzugehen sein.

(wenn man hier überhaupt von einer solchen sprechen will) ist durch die strenge Energieerhaltung charakterisiert, muss aber auf eine raumzeitlich genaue Verfolgung des Weges dieser Wirkung verzichten. Es lässt sich nicht genau angeben, an welcher Stelle die gesamte Energie auf den Film auftreffen wird, nur nach der Durchführung des Versuches feststellen, *dass* sie in Gänze angekommen ist. Die beiden Aspekte des empirischen Phänomens, die raumzeitliche Beschreibung einerseits und die kausale, den Erhaltungssätzen genügende andererseits, sind niemals gleichzeitig zur Anwendung zu bringen, obwohl es ihrer beider ausdrücklich bedarf. Sie bilden komplementäre Bilder im Bohrschen Sinne des Wortes.

In der Regel korrespondieren nun komplementären experimentellen Situationen jeweils zugeordnete physikalische Größen, deren gleichzeitige und vollkommen exakte Kenntnis durch eben dieses Komplementaritätsverhältnis in bezug auf ihre möglichen Messumstände gänzlich ausgeschlossen ist. Die Unbestimmtheitsrelation Heisenbergs, die zuerst für Orts- und Impulskoordinaten formuliert worden war, kann aus dieser Sicht als eine unmittelbare Folge des Komplementaritätsprinzips angesehen werden: Es ist unmöglich, mittels ein und desselben experimentellen Aufbaus gleichzeitig Ort und Impuls eines Elektrons beliebig genau zu messen. Man muss sich gewissermaßen entscheiden, welche der beiden Größen man exakt zu vermessen gedenkt, und diese Entscheidung führt zur Wahl bestimmter Mittel, die es im Grenzfall einer vollkommen präzisen Messung des einen Parameters nicht mehr gestatten, irgendwelche Informationen über die jeweils komplementäre Größe zu erlangen. Im Zuge der allseitig zu vernehmenden Vorbehalte gegen dieses Prinzip gelang es Bohr immer wieder, und zwar anhand unterschiedlichster realer oder auch nur theoretisch analysierter Experimente, zu zeigen, dass diese Beschränkung letztlich nicht zu umgehen ist.

Ein weiteres Paar komplementärer Größen ist mit der Unschärfebeziehung zwischen Energie und Zeit gegeben, die insofern eine gewisse Sonderstellung einnimmt, als man die Zeit nicht unmittelbar *am* quantenmechanischen System misst, sondern mittels einer extern definierten Zeit bestimmt, *wann* eine Messung stattfindet. Die Zeit ist somit keine Observable des Formalismus, sondern geht in diesen als Parameter ein; der Wert der Schrödinger-Funktion $\Psi_{(t)}$ ist selbst zeitabhängig. Abgesehen von dieser Besonderheit ist mit der bekannten Relation aus Einsteins Lichtquantenhypothese $E=h\cdot f$ bereits der wichtigste Gedanke gegeben: Die Energie eines Lichtquants ist gleich dem Produkt aus

einer Konstante (Plancksches Wirkungsquantum h) und der Frequenz der zugeordneten Welle. Die Frequenz f ist definiert als die Anzahl der kompletten Schwingungen n pro Sekunde, und die Periodendauer einer einzelnen Schwingung, die mit dem Buchstaben T symbolisiert wird, ist der Kehrwert der Frequenz: $f = n/t$ und $T = 1/f$. Um die vollkommen exakte Energie eines Lichtquants bestimmen zu können, müsste man entweder einen unendlichen langen Wellenzug durch die Anzahl seiner kompletten Oszillationen teilen oder an einer bestimmten räumlichen Position verharrend die „vorbeiziehende“ Welle unendlich lange vermessen, d.h. eine unendlich lange Zeitspanne die abgeschlossenen Zyklen zählen und diese Zeit t durch die Anzahl der Zyklen n teilen. Hat man z.B. in einer quantenmechanischen Messung nur eine begrenzte Zeit zur Verfügung, in welcher das Messgerät mit dem Gegenstand wechselwirken kann (oder soll), so ist damit auch die maximale Genauigkeit des zu erwartenden Energiewertes spezifiziert. Je exakter z.B. in einem atomaren Vorgang die Energiebilanz des Systems betrachtet werden soll, desto stärker muss man auf eine raumzeitlich-kausale Beschreibung desselben verzichten und umgekehrt.

5.3. Das Quantenpostulat und die statistische Interpretation der Quantenmechanik

Man vergegenwärtige sich noch einmal die experimentellen Befunde, die sich im Rahmen derjenigen Interferenzexperimente zeigen, die mit extrem geringen Lichtintensitäten durchgeführt werden, so dass zu jedem Zeitpunkt im statistischen Mittel nicht mehr als die Energie eines einzelnen Quants im Experimentalaufbau angetroffen werden kann. Wird als Detektor, wie in den Versuchsreihen Geoffrey Taylors, ein fotographischer Film verwendet, so werden immer nur diskrete Bildpunkte belichtet, wobei die Energie eines Lichtquants gerade ausreicht, um ein einzelnes Molekül des lichtempfindlichen Silberbromids in elementares Silber und das flüchtige Bromgas zu zerlegen. Im anschließenden Entwicklungsprozess lässt man diesen winzigen und zunächst noch unsichtbaren „Silberkeim“ durch Anlagerung weiteren elementaren Silbers so weit anwachsen, dass ein sichtbarer schwarzer Fleck entsteht, der die Stelle markiert, an welcher die Wechselwirkung zwischen Lichtquant und Silberbromid stattgefunden hat.

Wie bereits dargestellt, orientiert sich die Orts-Statistik dieser elementaren und diskontinuierlichen Einzelprozesse an dem Verhalten einer Welle, die gleichzeitig beide Spalten durchlaufen muss, um die entsprechende Verteilung determinieren zu können. Diese Welle legt also im weitesten Sinne diejenigen Punkte fest, an denen Lichtquanten auf den Film auftreffen können und bestimmt andere, an denen das Auftreffen gleichsam verboten ist. Nach längerer Belichtungszeit, oder sogar nach vielen unabhängig voneinander durchgeführten Versuchen, addieren sich alle Punkte zu einem deutlich sichtbaren Interferenzmuster. Doch was geschieht, so könnte man fragen, mit einem Lichtquant im jeweils isolierten Einzelprozess? Die sich überlagernde Welle gibt die möglichen und unmöglichen Orte einer Wechselwirkung vor, doch welcher der möglichen Punkte auf dem Film wird im individuellen Vorgang tatsächlich „gewählt“? Was verursacht, dass ein Lichtquant im Rahmen eines singulären Experiments an *dieser* bestimmten Stelle auftrifft und nicht an einer anderen, ebenfalls möglichen? Und schließlich: Warum addieren sich alle voneinander unabhängigen Vorkommnisse zu einem globalen Interferenzmuster? Wissen die einzelnen Quanten etwa voneinander und koordinieren auf geisterhafte Weise ihre Aktionen zu einem Gesamtphänomen, dem streifenförmigen Interferenzmuster? – Die naheliegendste Anwort kann nur lauten, dass

jedes einzelne Quant, unabhängig von allen anderen, seinen Weg nach derselben statistischen Wahrscheinlichkeitsfunktion „auswählt“, wobei die Wahrscheinlichkeit, einen bestimmten Ort auf dem Beobachtungsschirm zu treffen, von der Amplitudensumme der beiden dort interferierenden Wellen bestimmt wird oder, genauer, vom Quadrat derselben. Die Wahrscheinlichkeit korreliert mit der (klassischen) Intensität der Wellen. In den Gebieten konstruktiver Interferenz ist diese Wahrscheinlichkeit am größten, in denjenigen mit vollständig destruktiver Interferenz ist sie gleich Null, d.h. an dieser Stelle wird niemals ein Lichtquant gemessen werden können, was in vollkommener Übereinstimmung mit den experimentellen Befunden steht.

Dass sich für die im Rahmen der Lichtquantenhypothese postulierten singulären Prozesse der Energie- und Impulsübertragung die Anwendung statistischer Methoden als fruchtbar erweisen könnte, hatte zu einem relativ frühen Zeitpunkt bereits Albert Einstein in Erwägung gezogen. In seinem im September 1909 auf der Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte in Salzburg gehaltenen Vortrag findet sich diesbezüglich ein häufig zitiertes Gedankenexperiment, in welchem in einem mit vollkommen reflektierenden Wänden versehenen Hohlraum ein kleiner, doppelseitig versilberter und in einer Raumrichtung frei beweglicher Spiegel aufgehangen ist.[167] Durch Kollisionen mit den umliegenden Gasmolekülen wird dieser nun im Bereich des zugelassenen Freiheitsgrades in unregelmäßige Schwingungen versetzt, die der oben bereits erwähnten Brownschen Molekularbewegung entsprechen und welche insofern als zufällig aufgefasst werden müssen, als aufgrund der enorm großen Anzahl von Stoßprozessen eine deterministische Behandlung des Systems *praktisch* ausgeschlossen ist. Dennoch erlaubt bekanntlich die statistische Betrachtung der Anordnung, Aussagen über den zeitlichen Mittelwert der kinetischen Energie der Elemente zu treffen, d.h. über eine Größe, die bekanntlich in direkter Verbindung zur absoluten Temperatur des Hohlraumes steht. Überlässt man diese Konstellation sich selbst, so wird sich im Laufe der Zeit zwischen der Bewegung des Spiegels und den Bewegungen der Gasmoleküle ein energetisches bzw. thermisches Gleichgewicht einstellen, welches auf die Realisation der maximal möglichen Entropie des Systems hinausläuft. Neben dem Gas und dem Spiegel wird sich im betrachteten Raum zusätzlich die zu seiner absoluten Temperatur gehörige Plancksche

[167] Vgl. Einstein (1909) in Stachel (1989), Bd. 2, S. 578f.

Hohlkörperstrahlung einstellen, die ebenfalls mit den restlichen Bestandteilen des Systems im thermischen Gleichgewicht steht.

Mittels eines scharfsinnigen Argumentes will Einstein nun beweisen, dass die auch empirisch zu erwartende Gleichverteilung der Energie im Hohlraum sich nur dann einstellen wird, wenn auch die in ihm befindliche elektromagnetische Strahlung als korpuskular aufgefasst wird und sich bezüglich ihrer Impuls- und Energieübertragungen auf den Spiegel genauso verhält, wie die materiellen Moleküle des Gases.

Zum Zwecke dieses Beweisganges wird zunächst die Situation analysiert, in welcher die Strahlungsenergie, wie von der klassischen Theorie verlangt, homogen über das gesamte Volumen des Raumes verteilt ist. In diesem Fall steht zu erwarten, dass ein in Ruhe befindlicher Spiegel auf beiden seiner Seiten jeweils den gleichen Strahlungsdruck erfährt und sich bezüglich dieser Kräfte im statischen Gleichgewicht befindet. Beginnt der Reflektor jedoch, infolge der Wechselwirkung mit den Molekülen des umliegenden Gases, sich in unregelmäßiger Weise zu bewegen, so wird er auf der jeweils in Bewegungsrichtung liegenden Fläche mehr Strahlung zurückwerfen als auf der rückwärtig gewandten Seite und eine der mechanischen Reibung analoge bremsende Kraft erfahren. Über diesen Prozess verliert der Spiegel, unter der Annahme vollkommen homogen verteilter elektromagnetischer Strahlung, beständig an Bewegungsenergie, die aus den Kollisionen mit den umliegenden Gasmolekülen stammt und die solange in Strahlungsenergie transformiert wird, bis schließlich alle kinetische Energie der Teilchen aufgebraucht bzw. umgewandelt ist. Aus dem urspünglichen thermischen Gleichgewicht wäre auf diese Weise ohne äußeres Zutun ein extremes Ungleichgewicht entstanden, was nicht nur offensichtlich der Empirie, sondern vor allem dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik widerspäche.

Nimmt man aber demgegenüber an, dass auch die Wirkungen der elektromagnetischen Strahlung quasi korpuskular und in ähnlicher Weise unregelmäßig übertragen werden wie die Stöße der Gasmoleküle, so würde im statistischen Mittel genausoviel Energie von den Molekülen zur Strahlung wandern wie umgekehrt und das System könnte insgesamt und ungehindert den Zustand der größtmöglichen Entropie annehmen, was man vernünftigerweise auch erwarten sollte. Elektromagnetische Strahlung, so das Argument Einsteins, muss sich energetisch so verhalten, als bestünde sie aus diskreten Quanten, deren

Wechselwirkungen aufgrund der großen Anzahl der beteiligten Elementarprozesse nur mit den Methoden der statistischen Thermodynamik behandelt werden können.

Die Idee, zur mathematischen Beschreibung diskreter Quantenereignisse auf Verfahren der Wahrscheinlichkeitsrechnung zurückzugreifen, wurde 1924 von Niels Bohr, Hendrik A. Kramers und John C. Slater weiterentwickelt.[168] Obwohl ihre Interpretation der Energieerhaltung als einer nur im statistischen Mittel gültigen Bedingung sich letztlich als falsch herausstellen sollte, enthielt die Arbeit dennoch als bahnbrechende Neuerung die Konzeption eines „virtuellen Strahlungsfeldes". Dieses war, ähnlich wie ein reales Wellenfeld, mit der Fähigkeit zur Interferenz versehen, doch seine an einem gewählten Raumpunkt vorfindliche Stärke korrespondierte keiner dort unmittelbar auftretenden Kraftwirkung. Vielmehr bestimmte dieses abstrakte Gebilde lediglich die objektive Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich an besagter Stelle ein diskontinuierlicher Quantenprozess ereignet.

Der späteren Terminologie Heisenbergs folgend, kann man jenes virtuelle Feld auch als „Wahrscheinlichkeitswelle" bezeichnen. Mit dieser war eine vollkommen neuartige theoretische Entität eingeführt worden, welche in der klassischen Physik ihresgleichen sucht. In der Thermodynamik wurde z.B. mit dem Begriff der „Wahrscheinlichkeit" weniger eine objektive Eigenschaft des betrachteten Systems als vielmehr die Situation unzureichender Kenntnis all seiner jeweiligen Bestimmungsstücke zum Ausdruck gebracht. Tatsächlich sollten ja die Trajektorien aller Partikel eines Gases in absolut determinierter Weise den Bewegungsgesetzen der Mechanik Folge leisten und zu jedem Zeitpunkt eindeutig bestimmt sein. Die Wahrscheinlichkeitswelle von Bohr, Kramers und Slater war hingegen, wie Heisenberg später feststellen wird, viel mehr als nur Ausdruck einer subjektiven Verlegenheit: „Sie bedeutete die quantitative Fassung des alten Begriffs der ´δυναμις´ oder ´potentia´ in der Philosophie des Aristoteles. Sie führte eine merkwürdige Art von physikalischer Realität ein, die etwa in der Mitte zwischen Möglichkeit und Wirklichkeit steht."[169]

Auch dann, wenn man die ontologische Dimension dieser Interpretation beiseite lassen will, hat die Idee einer *objektiven* Wahrscheinlichkeit den Verzicht auf die Vorstellung eines vollständig determinierten Weltverlaufs zur Folge, denn jene objektiv vorhandene

---

[168] Vgl. Bohr/Kramers/Slater (1924).
[169] Heisenberg (1990), S. 23.

Unsicherheit bezüglich der elementaren Quantenprozesse ist gleichsam durch die Natur selbst hervorgebracht, und nicht eine Folge der begrenzten Möglichkeiten des erkennenden Subjekts. Dass dieser Verlust eines der größten Ideale der Naturforschung nicht ohne Widerspruch hingenommen werden konnte, bedarf kaum einer Erwähnung. Statt von tatsächlich in der Natur vorhandenen Potentialitäten zu sprechen, wurde immer wieder versucht nachzuweisen, dass gleichsam „verborgene Parameter“ existieren müssten, die auch dann, wenn niemand faktisch in der Lage sein sollte, sie zu bestimmen, dennoch den Verlauf der Naturprozesse in deterministischer Weise festlegten. Bezogen auf die von Heisenberg formulierten Unschärfebeziehungen gälte dasselbe: Auch wenn niemand imstande wäre, z.B. gleichzeitig Impuls und räumliche Position eines Elementarteilchens zu messen, existierten diese Werte dennoch zu jeder Zeit in vollkommen bestimmter Weise. Viele der späterhin vorgebrachten Kritikpunkte zielten auf die Bloßlegung dieser verborgenen Variablen und auf die damit einhergehende mögliche Wiederherstellung des Kausalitätsideals. Auf diese Auseinandersetzung, in deren Frühphase bezeichnenderweise einer der Wegbereiter der Quantentheorie, Albert Einstein, die Rolle des vehementesten Kritikers einnehmen sollte, wird später noch einzugehen sein.

Auf dem weiteren Weg zur Klärung des rätselhaften Wesens der Wahrscheinlichkeitswellen wurden 1926 von dem Göttinger Physiker Max Born quantenmechanische Methoden auf Systeme zur Anwendung gebracht, die zunächst aus mehreren unabhängigen Komponenten bestehen und die dann auf komplexe Weise miteinander in Wechselwirkung treten.[170] Ein solches Szenario wäre z.B. ein Stoßvorgang, in dem ein aus dem Unendlichen kommendes Elektron mit einem Atom kollidiert bzw. an selbigem gestreut wird und anschließend wieder im Unendlichen verschwindet. Die Verwendung des Extrembegriffes „unendlich“ soll dabei lediglich die Situation andeuten, dass vor und nach dem Stoßprozess das Elektron als frei und ungestört angesehen werden kann. Im Zuge der Analysen Borns stellte sich nun immer klarer heraus, dass eine wie auch immer geartete raumzeitlich-reale Interpretation der beteiligten Materiewellen kaum mehr zu vertreten ist.

Sowohl im optischen Doppelspalt-Experiment als auch in der von de Broglie vorgeschlagenen Wellentheorie der Materie, die dann zur Ausbildung der Schrödingerschen Version der Quantenmechanik geführt hatte, lag die Idee noch nahe, die beteiligten Wellen müssten tatsächlich im dreidimensionalen Raume anwesend sein und

[170] Vgl. Born (1926).

diese Anwesenheit könnte mittels geeigneter Methoden an jedem beliebigen Punkt direkt oder indirekt auch nachgewiesen werden. Die gesamte klassische Optik gründete, wie bereits dargestellt, auf dem Fundament realer Ätherwellen, und sämtliche ihrer auf dieser Basis erstellten Vorhersagen standen in vollkommenem Einklang mit der empirischen Erfahrung. Im Falle ausreichend starken Lichts bzw. ausreichend starker elektromagnetischer Strahlung[171] fällt es auch heute noch schwer, nicht an die wirkliche, d.h. raumzeitliche Existenz dieser Entitäten zu glauben. Was die neuartigen Materiewellen betraf, so ging auch Schrödinger im Rahmen ihrer Anwendung auf das Problem der Energiestufen des Wasserstoffatoms von dreidimensionalen Wellenzügen aus und hoffte sogar, mittels dieser Vorstellung die Paradoxien der bisherigen Quantenmechanik, welche vor allem die Emissions- und Absorptionsvorgänge von elektromagnetischer Energie betrafen, gänzlich zugunsten einer klassischen, d.h. kontinuierlichen Wellentheorie des Atoms auflösen zu können. Doch sprach bereits bei diesem Stand der Dinge die mathematische Form seiner Wellenfunktion, die er mit dem griechischen Symbol Ψ versehen hatte, gegen eine allzu einfache Übertragung derselben auf anschauliche Vorgänge in Raum und Zeit. Die Ψ-Funktion bediente sich wie der Matrizenkalkül Heisenbergs des Systems der komplexen Zahlen, d.h. abstrakter mathematischer Gebilde, die auf dem herkömmlichen eindimensionalen Zahlenstrahl nicht verortet werden können.[172] Dieses später als „Konfigurationsraum“ bezeichnete Behältnis der Schrödingerschen Wellen gestattet, wie sich herausstellen sollte, nur im Falle sehr einfacher quantenmechanischer Systeme, wie z.B. dem eines isolierten Elektrons, die komplexe Darstellung mit den drei Dimensionen des euklidischen Raumes der Mechanik in Verbindung zu bringen. Liegt aber eine Wechselwirkung mehrerer, z.B. von n Komponenten vor, so muss zu deren Behandlung ein 3n-dimensionaler komplexer Konfigurationsraum herangezogen werden, was bereits bei einfachen Stoßprozessen zu vollkommen unanschaulichen mathematischen Symbolmanipulationen führt.

Doch wie ist eine Wechselwirkung, die Max Born einer genaueren Analyse unterziehen will, allgemein zu beschreiben? Jede der beteiligten Komponenten wird zunächst in Form

---

[171] Mit „ausreichend stark“ ist hier ein Energiefluss gemeint, der groß ist gegenüber dem Planckschen Wirkungsquantum – eine Bedingung, die angesichts der extremen Kleinheit dieses Wertes für alle praktischen Anwendungsfälle der klassischen Elektrodynamik mehr als erfüllt ist.

[172] Komplexe Zahlen bestehen aus einem „Realteil“ und einem „imaginären Teil“, welcher durch die normalerweise undefinierte Wurzel aus Minus Eins dargestellt wird. Ohne einen numerischen Wert für $\sqrt{-1}$ angeben zu können, kann man dennoch mit diesen Zahlen nach bestimmten Regeln rechnen und diese z.B. durch Quadrierung wieder in „vertraute“ Größen zurückverwandeln.

einer eigenen Ψ-Funktion dargestellt, d.h. in Gestalt einer Wellengleichung, die vorbehaltlich der Existenz verborgener Parameter die gesamte physikalisch mögliche Kenntnis des Objekts auf sich vereinigt. Diese Funktion ist stetig und trägt als Argument den Parameter der Zeit, d.h. sie verhält sich in dieser Hinsicht wie eine vollkommen determinierte Differentialgleichung. Sie ermöglicht in analoger Weise wie eine klassische Wellenfunktion den Betrag der (allerdings komplexwertigen) Amplitude Ψ(t) zu jedem beliebigen Zeitpunkt t eindeutig zu berechnen. Eine Wechselwirkung zweier mittels einer Ψ-Funktion definierten Systeme (z.B. Elektronen) führt zu einer Überlagerung oder auch „Superposition" der beteiligten Wellenfunktionen, wobei der Konfigurationsraum, in dem die aus der Superposition hervorgegangene neue Ψ-Funktion angesiedelt ist, soviele Dimensionen besitzt wie beide Teilkomponenten zusammen. Prekärerweise lässt sich dieses Gemenge physikalisch nur durch einen diskontinuierlichen Messprozess wieder in seine ursprünglichen Komponenten zerlegen, so dass nach einer erfolgten Wechselwirkung wieder voneinander unabhängige Systeme entstehen. Das Problem dieses Messprozesses wird später noch einer gesonderten Betrachtung unterzogen werden. Ohne diese Reduktion der aus einer Überlagerung hervorgegangenen Summenfunktion lassen sich mit dieser, wenn überhaupt, nur in idealisierten Grenzfällen (z.B. nach „unendlich" langen Zeiträumen) Situationen herbeiführen, in denen die mathematische Verschränkung[173] der Teile hinreichend schwach geworden ist, um diese annähernd wieder als eigenständige Entitäten behandeln zu können. Max Born verwendet nun ein derartiges Verfahren zur Behandlung des Stoßprozesses zwischen einem Atom und einem von außen sich nähernden Elektron: „Die Aufgabe ist also: man soll die Schrödingersche Wellengleichung für die Kombination Atom-Elektron lösen unter der Randbedingung, daß die Lösung in einer bestimmten Richtung des Elektronenraumes asymptotisch übergeht in eine ebene Welle eben dieser Fortschreitungsrichtung (das ankommende Elektron). Von der so gekennzeichneten Lösung interessiert uns nun wieder hauptsächlich das Verhalten der ´gestreuten´ Welle im Unendlichen; denn diese beschreibt das Verhalten des Systems nach dem Stoß."[174]

Nach einer entsprechenden Berechnung der fraglichen Superposition ergibt sich als Ψ-Funktion des Gesamtsystems nach der Wechselwirkung eine neue Wellenfunktion, die

---

[173] Der Begriff „Verschränkung" wurde gleichsam als *terminus technicus* für die Superposition quantenmechanischer Wellenfunktionen von Erwin Schrödinger eingeführt – vgl. Schrödinger (1935) in Baumann/Sexl (1984), S. 116. Er wird im Englischen in der Regel mit „entanglement" übersetzt.
[174] Born (1926) in Baumann/Sexl (1984), S. 48.

dann, wenn man nach der Messung der korpuskularen Eigenschaften des gestreuten Elektrons fragt, als Ausdruck der Wahrscheinlichkeit interpretiert werden muss, dieses Teilchen an einem bestimmten Ort des physikalischen Raumes tatsächlich nachzuweisen.[175] Genau genommen muss wiederum das Quadrat des Betrages dieser Funktion ($|\Psi|^2$) gebildet werden, durch welches sich der komplexe Zahlenwert Ψ in eine reelle Zahl zwischen Null und Eins verwandelt.[176] Über die Bestimmung dieser Wahrscheinlichkeit hinaus, enthält die von Born ermittelte Funktion keine weitere Information. Die genaue Richtung des Teilchens nach der Kollision mit dem Atom ist mit anderen Worten nicht eindeutig aus den Anfangsbedingungen zu berechnen, und Born glaubt auch nicht daran, dass ein solches Wissen prinzipiell zu erlangen sein wird: „Die Schrödingersche Quantenmechanik gibt also auf die Frage nach dem Effekt eines Zusammenstoßes eine ganz bestimmte Antwort; aber es handelt sich um keine Kausalbeziehung. Man bekommt keine Antwort auf die Frage ´wie ist der Zustand nach dem Zusammenstoße´, sondern nur auf die Frage, ´wie wahrscheinlich ist ein vorgegebener Effekt des Zusammenstoßes´ (wobei natürlich der quantenmechanische Energiesatz gewahrt sein muß).
Hier erhebt sich die ganze Problematik des Determinismus. Vom Standpunkt unserer Quantenmechanik gibt es keine Größe, die im Einzelfalle den Effekt eines Stoßes kausal festlegt; aber auch in der Erfahrung haben wir bisher keinen Anhaltspunkt dafür, daß es innere Eigenschaften der Atome gibt, die einen bestimmten Stoßerfolg bedingen. Sollen wir hoffen, später solche Eigenschaften (etwa Phasen der inneren Atombewegungen) zu entdecken und im Einzelfalle zu bestimmen? Oder sollen wir glauben, daß die Übereinstimmung von Theorie und Erfahrung in der Unfähigkeit, Bedingungen für den kausalen Ablauf anzugeben, eine prästabilierte Harmonie ist, die auf der Nichtexistenz solcher Bedingungen beruht? Ich selber neige dazu, die Determiniertheit in der atomaren Welt aufzugeben. Aber das ist eine philosophische Frage, für die physikalische Argumente nicht allein maßgebend sind.
Praktisch besteht jedenfalls sowohl für den experimentellen als auch den theoretischen Physiker der Indeterminismus.“[177]

Die in diesem Aufsatz von Max Born gegebene Deutung der quantenmechanischen Ψ-Funktion hat sich allgemein durchgesetzt und konnte trotz der massiven und durchaus

---

[175] Unter dem „Nachweis“ ist selbstverständlich nur ein Experiment zu verstehen, welches den Begrenzungen der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation unterworfen ist.
[176] Durch Quadrieren einer komplexen Zahl entfällt die unanschauliche Wurzel aus Minus Eins und es entsteht eine „gewöhnliche“ reelle Zahl.
[177] Vgl. Born (1926) in Baumann/Sexl (1984), S. 51. Hervorhebungen, die im Original durch vergrößerte Laufweite des Textes bewerkstelligt sind, wurden im hiesigen Zitat aufgrund der besseren Lesbarkeit durch Unterstreichung kenntlich gemacht.

nachvollziehbaren Kritik bis heute nicht durch eine andere, d.h. wieder deterministische Interpretation ersetzt werden. Die Wellenfunktion enthält implizit alle Informationen, die über die jeweiligen Bestimmungsstücke einer physikalischen Entität (z.B. eines Elementarteilchens) unter der zusätzlichen Bedingung der Heisenbergschen Unschärferelation zu erlangen sind. Um allerdings eine konkrete Frage nach der Wahrscheinlichkeit, dass ein vorgegebener Parameter (z.B. „Ort“) im Rahmen eines Experiments einen bestimmten Wert annehmen wird, beantworten zu können, muss die im vieldimensionalen Konfigurationsraum angesiedelte Ψ-Funktion auf geeignete Weise mathematisch transformiert werden, d.h. jedem quantenmechanisch modellierbaren Attribut korrespondiert eine bestimmte Regel, die angibt, wie mit der Gesamtfunktion zu verfahren ist, um die speziell diesem Attribut zugeordnete Wahrscheinlichkeitsverteilung zu erhalten. Die Unbestimmtheitsrelation ist nun die unmittelbare Folge des intrinsischen Zusammenhanges all dieser Verteilungen, der über die gemeinsame Ψ-Funktion vermittelt ist.

5.4 Exkurs: Konkretes Beispiel der Unschärfe von Ort und Impuls.

Die Behauptung, dass die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation eine unmittelbare Folge der quantenmechanischen Mathematik ist und nicht, wie man vielleicht glauben könnte, als das eigentliche Geschehen überlagernder Störeffekt erst sekundär hervorgebracht wird, soll hier anhand des intrinsischen Zusammenhangs zwischen Orts und Impulsunschärfe eines freien Elektrons verdeutlicht werden. Nach der de Broglie-Relation muss dieses Teilchen als harmonische, d.h. sinus-förmige Materiewelle[178] beschrieben werden, zwischen deren Wellenlänge λ und deren Impuls p die Beziehung $\lambda = h/p$ gilt bzw. $p = h/\lambda$. Einem genau bestimmten Impuls p ist demnach eine Welle mit einer ebenso exakt vorgegebenen Wellenlänge λ zugeordnet. Der Ort x, an dem ein Elektron im Rahmen eines Experiments mit Sicherheit zu finden sein wird, ist ebenfalls durch eine Welle charakterisiert, die nur an dem betreffenden Punkt x eine Amplitude von Eins hat und an allen anderen Punkten, an denen sich das Teilchen eben nicht befindet, den Wert Null. Dieses geometrische Objekt ähnelt eigentlich gar keiner Welle, sondern besteht nur aus einem unendlich schmalen, scharfen Zacken, der sich mit der räumlichen Bewegung des Elektrons ebenfalls durch den zugehörigen Konfigurationsraum „bewegt“.

Um den inneren Zusammenhang zwischen diesen beiden extrem gegensätzlichen Typen von Wellen quantitativ zu erfassen, bedient man sich der verallgemeinerten Version eines Theorems, welches der französische Mathematiker Joseph Fourier (1768-1830) in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts formuliert hatte. Sein spezielles Theorem besagt, dass sich jedwede Wellenform darstellen lässt als eine Überlagerung von harmonischen Sinuswellen unterschiedlicher Frequenz, Amplitude und Phasenlage. Oder anders ausgedrückt: Zu jeder noch so extravaganten Linienführung einer Wellenkurve existiert ein Satz harmonischer Sinusschwingungen, deren mathematische Addition der vorgegebenen Welle beliebig nahe kommt bzw. im Grenzfall mit dieser zusammenfällt. Diesen Satz von Komponenten nennt man auch „Spektrum“ der Welle, in Anlehnung an den Newtonschen Begriff des Lichtspektrums, dessen Darstellung mittels eines Prismas in analoger Weise als die Zerlegung einer Mischung unterschiedlicher

---

[178] Im Falle eines einzelnen Teilchens ist diese Materiewelle (Ψ) noch als raumzeitliches Gebilde vorstellbar. Treten mehrere Komponenten in Wechselwirkung, ist ihre gemeinsame Ψ-Funktion in höherdimensionalen Räumen angesiedelt und entzieht sich vollends einer anschaulichen Deutung. Man trifft das Wesen der quantenmechanischen Ψ-Funktionen am ehesten, wenn man sie als rein abstrakte, d.h. nicht im gewöhnlichen Raum anzutreffende Gebilde auffasst. Bezeichnenderweise transportieren sie im Gegensatz zu allen anderen Formen klassischer Wellen auch keine Energie.

Frequenzen (weißes Licht) in ihre jeweiligen Teile (die einzelnen Farben) aufgefasst werden kann. Dieses Fouriersche Theorem lässt sich nun als ein Sonderfall einer noch viel allgemeineren und erst später bewiesenen mathematischen Regel begreifen, nach welcher die harmonischen Sinusschwingungen innerhalb des „Reiches der Wellen“ noch nicht einmal in dem Sinne besonders ausgezeichnet sind, wie Fourier ursprünglich angenommen hatte. In seinen Überlegungen trugen die Sinuswellen gleichsam die Funktion eines universellen Alphabetes, aus dem sich jede beliebige andere Form zusammensetzen ließ. Später sollte sich herausstellen, dass nicht nur diese harmonischen Schwingungen als generatives Alphabet dienen können, sondern dass jede beliebige Wellenform ihrerseits als ein solches dienen kann. Auch eine harmonische Sinuswelle lässt sich als Überlagerung vieler (im Grenzfall unendlich vieler) Wellen eines anderen Typs darstellen, deren jeweilige Amplitude, Frequenz und Phasenlage entsprechend gewählt werden muss. Keine Form ist hierbei besonders ausgezeichnet, wobei allerdings auch ohne mathematische Beweisführung einzusehen ist, dass die Darstellung einer vorgegebenen Welle mittels eines Alphabetes, dessen Grundform der darzustellenden Welle im weitesten Sinne ähnlich ist, mit weniger Komponenten auskommt. Im einfachsten Falle wird eine reine Sinuswelle durch das Sinus-Alphabet dargestellt, und man benötigt nur ein einziges Element dieser generativen Gruppe, um die vorgegebene Schwingung darzustellen, nämlich diejenige, die mit der zu generierenden Welle schlechterdings identisch ist: Das Sinus-Spektrum einer Sinus-Welle enthält nur ein Element. Umgekehrt existiert eine Form, von deren unterschiedlichen Variationen man unendlich viele Komponenten benötigt, um eine harmonische Sinuswelle zu erzeugen. Diese Form ist der zu generierenden Gestalt gewissermaßen am unähnlichsten, und sie ist durch die oben bereits erwähnte singuläre Zacke gegeben, die nur an einer scharf bestimmten Stelle einen von Null verschiedenen Wert annimmt. Unendlich viele dieser Zacken, die an verschiedenen Orten (Phase) bestimmte Werte (Amplituden) annehmen, ergeben zusammen das Bild einer harmonischen Sinuswelle. Sinus- und Zackenwelle[179] sind insofern absolute Gegensätze, als man jeweils unendlich viele Schwingungen des einen Typs verwenden muss, um ein einziges Exemplar des jeweils anderen zu generieren. Man braucht demnach auch

[179] Der Begriff „Zackenwelle“ wurde in bewusster Abweichung zum eigentlich geläufigeren Terminus der „Impulswelle“ gewählt, um die naheliegende Verbindung derselben mit dem mechanischen Impuls-Begriff zu verhindern. Die Impulsform einer Welle (Zackenwelle) ist gerade *nicht* als Repräsentation des mechanischen Impulses anzusehen, sondern als diejenige des räumlichen Ortes. Dem mechanischen Impuls ist in der Tat die harmonische Sinuswelle zugeordnet.

unendlich viele Sinuswellen, um eine Zackenwelle zu erzeugen, d.h. das Sinusspektrum der Zackenwelle ist ebenfalls unendlich groß.

Ausgestattet mit diesem Rüstzeug lässt sich die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation bezüglich der Orts- und Impulswerte eines Teilchens unmittelbar aus den mathematischen Beziehungen zwischen den jeweils zugeordneten Wellentypen einsichtig machen. Ist der Impuls vollkommen exakt definiert, so ergibt sich über $\lambda = h/p$ eine dem Teilchen zugeordnete harmonische Sinuswelle von konstanter Wellenlänge und Frequenz. Damit diese beiden Eigenschaften ganz genau bestimmt sind, muss der Wellenzug unendlich lang sein, d.h. an keiner denkbaren Stelle von seiner Idealform abweichen.

Andererseits ist dem Ort x einer solchen Korpuskel ein singulärer, genau lokalisierter Zacken zugeordnet, dessen Position im Konfigurationsraum der Position des Teilchens im mechanischen Raum korrespondiert. Ist der Impuls genau gegeben, so braucht man unendlich viele Zacken an unendlich vielen Orten, um die über den Impulswert präzise bestimmte harmonische Sinuswelle zu generieren, d.h. das Teilchen ist gewissermaßen an allen Orten gleichzeitig oder die Wahrscheinlichkeit, im Zuge einer Messung selbiges zu detektieren, ist an allen Stellen gleich groß! Vollkommen genau bestimmter Impuls zieht eine vollständige Unkenntnis bezüglich seiner räumlichen Position nach sich.

Nimmt man die räumliche Position als genau vorgegeben an, so dass die zugeordnete Ψ-Funktion nur eine singuläre Zacke aufweist, so ist der Impuls absolut unbekannt und kann alle denkbaren Werte mit gleicher Wahrscheinlichkeit annehmen. Man braucht unendlich viele Sinuswellen, um eine Zacke zu erzeugen, und unendlich viele Sinuswellen unterschiedlicher Frequenz, Amplitude und Phasenlage entsprechen über $p = h/\lambda$ ebenfalls unbegrenzt vielen Impulswerten. Ist der Ort genau bekannt, so ist der Impulswert vollkommen unbestimmt.

In sämtlichen gemischen Fällen, d.h. in denjenigen Situation, in welchen sowohl Impuls- als auch Ortswerte nur mit einer gewissen Unsicherheit bekannt sind, lässt sich mathematisch zeigen, dass das Produkt dieser Ungenauigkeiten niemals kleiner werden kann als durch die Heisenbergsche Unbestimmtheitsbeziehung vorgegeben. Diese ist eine direkte Folge der quantenmechanischen Modellierung klassischer mechanischer Größen und nicht etwa ein Artefakt experimenteller Intervention. Will man die mimimal mögliche Unschärfe in der gemeinsamen Kenntnis zweier konjugierter Größen wie Ort und Impuls eines Elektrons auf beide Parameter gleichmäßig verteilen, so ist die zugehörige Ψ-

Funktion keine unendlich ausgedehnte Welle und auch kein singulärer und scharf lokalisierter Zacken, sondern kann als ein sogenanntes Wellenpaket visualisiert werden. Ein solches Paket ist ein harmonischer Wellenzug von endlicher Länge, dessen Amplitude ausgehend vom Wert Null langsam bis zu einem Maximalwert zunimmt und anschließend wieder, wie bei der gedämpften Schwingung eines Pendels, bis auf Null zurückgeht. Er kann gleichermaßen durch eine Überlagerung endlich vieler Sinusschwingungen (Impulswerte) oder durch eine Addition endlich vieler scharf begrenzter Zacken (Ortswerte) dargestellt werden. Bewegt sich eine solche Wellengruppe durch den Konfigurationsraum, so kann man im mechanischen Raum angenähert von einer Bewegung eines materiellen Teilchens sprechen. In diesen von der Unbestimmheitsrelation vorgegebenen Grenzen ist also auch der Gebrauch klassischer Begriffe im Rahmen der Quantenmechanik durchaus möglich.

Es war diese Erkenntnis, die in den frühen Jahren der Quantenmechanik keineswegs vorhanden war und sozusagen erst mühsam erarbeitet werden musste. Die Tatsache, dass man man in bestimmten Experimentalsituationen[180] die Spur eines Elektrons oder die eines durch radioaktive Zerfallsprozesses entstanden Alphateilchens gewissermaßen unmittelbar sehen konnte, schien doch unmissverständlich darauf hinzudeuten, dass es dort auch ein klassisches Teilchen geben musste, welches die Ursache dieser scheinbar stetig zusammenhängenden Trajektorie war. Wie kann eine solche Bahn zustandekommen, obwohl sie nach der gängigen Interpretation der quantenmechanischen Größen eigentlich gar nicht in dieser Form existieren darf? Heisenberg wird sich später an seine diesbezüglichen Gedanken erinnern und an die plötzliche Wendung, die letztlich den Schlüssel zur Durchtrennung des Knotens darbot: „Wir hatten ja immer leichthin gesagt: die Bahn des Elektrons in der Nebelkammer kann man beobachten. Aber vielleicht war das, was man wirklich beobachtet, weniger. Vielleicht konnte man nur eine diskrete Folge von ungenau bestimmten Orten des Elektrons wahrnehmen. Tatsächlich sieht man ja nur einzelne Wassertröpfchen in der Kammer, die sicher sehr viel ausgedehnter sind als ein Elektron. Die richtige Frage mußte also lauten: Kann man in der

[180] Hier ist vor allem die von dem schottischen Physiker Charles Wilson (1869-1959) erfundene Nebelkammer zu nennen, in welcher die Trajektorie eines schnellen geladenen Teilchens als Spur feinster Wassertröpfchen in Erscheinung tritt. Diese Nebelkammer besteht aus einer relativ einfachen Anordnung, in welcher durch permanente Druckschwankungen immer wieder übersättigter Wasserdampf erzeugt wird, d.h. ein Zustand, der bei Anwesenheit geeigneter Kondensationskeime (z.B. Staubteilchen o.ä.) zur Bildung von Nebel führen würde. Ein schnelles (d.h. energiereiches) geladenes Teilchen erzeugt während seiner Durchquerung eine ganze Kette von ionisierten Luftmolekülen, welche die Rolle solcher Keime übernehmen und an welche sich Wassermoleküle aus der übersättigten Atmosphäre schlagartig anlagern. Es entsteht eine deutlich sichtbare Spur feiner Wassertröpfchen.

Quantenmechanik eine Situation darstellen, in der sich ein Elektron ungefähr – das heißt mit einer gewissen Ungenauigkeit – an einem gegebenen Ort befindet und dabei ungefähr – das heißt wieder mit einer gewissen Ungenauigkeit – eine vorgegebene Geschwindigkeit besitzt, und kann man diese Ungenauigkeiten so gering machen, daß man nicht in Schwierigkeiten mit dem Experiment gerät? Eine kurze Rechnung nach der Rückkehr ins Institut bestätigte, daß man solche Situationen mathematisch darstellen kann und daß für die Ungenauigkeiten jene Beziehungen gelten, die später als Unbestimmtheitsrelationen der Quantenmechanik bezeichnet worden sind.“[181]

Was die Bedeutung der Unbestimmtheitsrelation für die physikalische Beschreibung des Verhaltens makroskopischer Objekte betrifft, so bewegt sich die von der winzigen Größe des Planckschen Wirkungsquantums abhängige Beschränkung der gleichzeitigen Kenntnis kanonisch konjugierter Variablen wie z.B. Ort und Impuls in der Regel weit unterhalb der praktisch möglichen Messgenauigkeiten. In diesem Sinne kann man davon sprechen, dass sich alltägliche Objekte als Gegenstände mit hinreichend genau definierbaren Orten und Geschwindigkeiten auffassen lassen, obwohl streng genommen auch hier die Unbestimmtheitsrelation nicht umgangen werden kann.

[181] Vgl. Heisenberg (2001), S. 97.

6. Probleme der Interpretation

6.1 Die Bohr-Einstein-Debatte und die Entdeckung der Nichtlokalität

Im Oktober des Jahres 1927 hatten sich die führenden Physiker der Welt anlässlich der fünften Solvay-Konferenz in Brüssel eingefunden.[182] Niels Bohr und Werner Heisenberg präsentierten auf dieser Veranstaltung ihre mittlerweile unter dem Namen „Kopenhagener Deutung“ bekannte Interpretation der Quantenmechanik, welche sie als widerspruchsfreie, prinzipiell vollständige und letztlich sogar „unwiderrufliche“ Beschreibung der physikalischen Realität und unseres Verhältnisses zu dieser ansahen. Es entspann sich um die Möglichkeiten und Grenzen dieser Deutung der Theorie eine lebhafte Diskussion, die mit großem Einfallsreichtum und Scharfsinn vor allem von Niels Bohr und Albert Einstein geführt wurde und die als „Bohr-Einstein-Debatte“ in die Geschichte der neueren Physik eingegangen ist.

Die Haltung Einsteins gegenüber den methodologischen Grundlagen der Physik und dem Stellenwert naturwissenschaftlicher Modellbildung hatte im Laufe der Jahre eine grundlegende Wandlung erfahren. Die noch in den Entstehungsumständen der Speziellen Relativitätstheorie so einflussreichen Ideen des Machschen Positivismus waren mehr und mehr der Überzeugung gewichen, dass das oberste Ziel physikalischer Theorien die Abbildung der Strukturen der Realität selbst sei und dass diese als geometrisch-mathematische Idealgestalt aufgefasste Wirklichkeit eine kausal determinierte und vollkommen objektive Struktur aufweise, in welcher die kontingente und vorübergehende Existenz wahrnehmender Subjekte keinerlei besondere Berücksichtigung finden müsse. Werner Heisenberg gibt in seiner Autobiographie den Wortlaut eines Gespräches mit Einstein wieder, in welchem diese Wandlung, die für den jungen Heisenberg sehr überraschend gewirkt haben musste, eindringlich zum Ausdruck kommt: „Vielleicht habe ich diese Art von Philosophie [gemeint ist der Machsche Positivismus] benützt, aber sie ist trotzdem Unsinn. Oder ich kann vorsichtiger sagen, es mag heuristisch von Wert sein, sich daran zu erinnern, was man wirklich beobachtet. Aber vom prinzipiellen Standpunkt aus ist es ganz falsch, eine Theorie nur auf beobachtbare Größen gründen zu wollen. Denn es ist ja in

[182] Die Solvay Konferenzen tragen den Namen des belgischen Großindustriellen Ernest Solvay (1838-1922), der diese Zusammenkunft internationaler Physiker zum ersten Mal im Jahr 1911 ausgerichtet hatte.

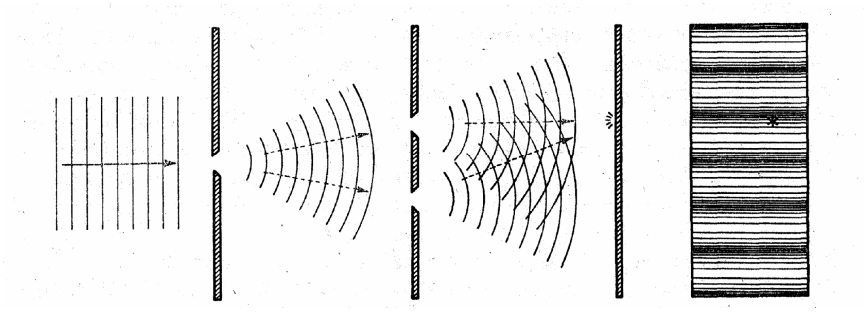
Wirklichkeit genau umgekehrt. Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann.“[183]

Wie bereits oben ausgeführt, kann Albert Einstein als einer der Gründerväter der Quantentheorie angesehen werden, der mit jugendlicher Unbekümmertheit die vor dem Hintergrund der klassischen Elektrodynamik geradezu wahnwitzig anmutende Idee der Lichtquanten bereits zu einer Zeit formuliert hatte, als noch nicht einmal Max Planck sich imstande sah, ihm hierin auch nur auf das geringste zu folgen. Es war ebenfalls Einstein, der als erster auf die Unabdingbarkeit statistischer Methoden zur Behandlung der elementaren Energieaustauschprozesse hingewiesen hatte und bis zu diesem Punkt sicherlich auch bereit war, den Determinismus physikalischer Systeme insofern zu relativieren, als in der Quantentheorie ähnlich wie in der klassischen Thermodynamik eine lückenlose kausale Beschreibung aller Komponenten eines Systems unter *praktischen* Gesichtspunkten unmöglich sein könnte. Doch spätestens mit dem Auftreten des dann in unterschiedlicher Gestalt ausgearbeiteten Formalismus der Quantenmechanik und seiner vor allem von Niels Bohr, Werner Heisenberg und Max Born entwickelten Deutung wurde Einstein zu einem der schärfsten Kritiker der neuen Theorie. Hierbei richteten sich seine Bedenken vor allem auf die Einführung objektiver Wahrscheinlichkeiten oder Potentialitäten, die nicht, wie in der Thermodynamik aufgefasst, die Folge rein experimenteller Beschränkungen, sondern vielmehr eine intrinsische Eigenschaft der mikrophysikalischen Prozesse selbst sein sollten. Sein häufig zitierter Ausspruch, nach welchem er nicht bereit sei zu glauben, dass Gott würfele[184], ist nur der aphoristische Ausdruck eines tiefen Misstrauens gegenüber der von Bohr und anderen reklamierten Vollständigkeit des vorliegenden Kalküls und der für unrevidierbar erklärten Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik. „Ich kann nicht umhin zu bekennen“, so heißt es bei Einstein an anderer Stelle „daß ich dieser Interpretation nur eine vorübergehende Bedeutung beimesse. Ich glaube noch an die Möglichkeit eines Modells der Wirklichkeit, d.h. einer Theorie, die die Dinge selbst und nicht nur die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens darstellt.“[185] Gemäß dieser Position liegt das Augenmerk der Kritik Einsteins zunächst auf dem möglichen Nachweis, dass die Natur in bestimmten experimentellen Situationen dazu gebracht werden kann, Informationen preiszugeben, die im Rahmen der Theorie

[183] Zitiert nach Heisenberg (2001), S. 80.
[184] Vgl. z.B. Bohr (1958), S. 47 oder Heisenberg (2001), S. 99.
[185] Einstein (1934), S. 186.

keine Entsprechung haben und welche es aufgrund ihrer inneren Struktur eigentlich gar nicht geben dürfte. In der mit Niels Bohr auf dem 5. Solvay-Kongress begonnenen Debatte werden demnach zunächst alle möglichen Gedankenexperimente analysiert, mit deren Hilfe die von Bohr als unumgänglich dargestellte Komplementarität bestimmter Experimentalsituationen oder diejenige die Kenntnis von Paaren kanonisch konjugierter Variablen betreffend *de facto* unterlaufen werden könnte. Im Doppelspaltexperiment besteht beispielsweise diese Komplementarität in der Unmöglichkeit, im gleichen Versuchsaufbau sowohl den genauen Weg eines Lichtquants, d.h. sein raumzeitlich-kausales Verhalten, als auch die von der zugeordneten Wellenfunktion verursachte Interferenzerscheinung zu beobachten. Ließe sich diese Beschränkung umgehen, so wäre es möglich, einen genaueren Aufschluss darüber zu erlangen, was zwischen der Emission eines Lichtquants und seiner Wechselwirkung mit dem als Detektor dienenden fotographischen Film „wirklich“ in Raum und Zeit geschieht, und es könnte ein Modell der Realität konstruiert werden, welches dem Objektivitätsideal der klassischen Physik wieder sehr nahe käme. In der Tat ist der naheliegendste Einwand auf die scheinbaren Paradoxien des Doppelspaltversuches derjenige, dass man doch versuchen könnte zu messen, durch welches der beiden Löcher ein Lichtquant hindurchgeht, bevor es auf dem lichtempfindlichen Schirm an einer bestimmten Stelle seine Spur hinterlässt. Man könnte nicht nur dies messen, sondern sogar nach und nach an beliebigen Punkten des Raumes zwischen Emissions- und Absorptionspunkt immer wieder den Ort dieser Teilchen bestimmen, so dass es möglich würde nachzuvollziehen, wie das Interferenzmuster unter der Annahme raumzeitlich lokalisierter Korpuskeln tatsächlich, d.h. ohne die Annahme interferierender Wellen zustande kommt. Man hätte die Trajektorien der Teilchen *und* die Interferenzverteilung auf dem Detektor, was nach der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik eigentlich vollkommen ausgeschlossen sein müsste.

In seiner Diskussion mit Niels Bohr beruft sich Einstein zunächst auf die prinzipielle Möglichkeit, in der nachfolgend skizzierten Apparatur den Weg eines Quants, d.h. den Spalt der Doppelblende, durch welchen es letztlich hindurchgeht, durch die Messung des Impulses zu erschließen, welcher beim Passieren der ersten Einfachblende auf die Flanken derselben übertragen wird.



– Abbildung nach Bohr (1958), S. 46 –

Das von links in die Apparatur eintretende Lichtquant[186] muss, um zum oberen Spalt zu gelangen, an der unteren Kante der ersten Blende reflektiert werden. Entsprechend umgekehrt liegen die Verhältnisse im Fall, dass der untere Spalt erreicht werden soll. Durch eine Impulsmessung an der als beweglich aufgehängt gedachten Blende könnte man demnach ermitteln, welche der beiden möglichen Reflexionen stattgefunden hat, und die Trajektorie des Lichtteilchens durch die Apparatur verfolgen, zumindest hinsichtlich der Frage, welche der beiden möglichen Spalten der Doppelblende passiert worden ist.

Bohr konnte nun mittels einer einfachen Argumentation beweisen, dass dies nur dann möglich ist, wenn man den Impuls der Blende vor der Durchführung des eigentlichen Experiments hinreichend genau kennt, so dass die zu erwartende Impulsänderung Δp, die im Falle von Licht natürlich einen winzigen Betrag annehmen würde, auch tatsächlich konstatiert werden kann.[187] Ist dies vorausgesetzt, so ergibt die Anwendung der Unbestimmtheitsrelation auf die Blende selbst, dass ihr Ort noch vor der Wechselwirkung mit dem Lichtquant mit einer Unschärfe Δq versehen ist, die mindestens so groß ist, dass das Interferenzmuster auf dem Schirm vollkommen verschwindet. Die Welle eines jeden Lichtquants, dessen Weg durch eine derartige Impulsmessung an der Einfachblende nachvollzogen werden kann, wird aufgrund der prinzipiell unkontrollierbaren Ortslage dieser Blende aus einer geringfügig anderen Richtung auf den Doppelspalt treffen, was ebenfalls zu unterschiedlichen Lagen der jeweiligen Wahrscheinlichkeitsverteilung führt. Auf einem fotographischen Film würde die Summe aller Punkte, die von

---

[186] Analoges würde natürlich auch für ein Elektron gelten, wobei die geometrischen Maße aufgrund der viel kleineren de Broglie-Wellenlänge entsprechend verringert werden müssten. Die prinzipielle Argumentation würde davon natürlich nicht berührt werden.

[187] Dieses Experiment ist natürlich ein Gedankenexperiment und könnte aufgrund des extrem kleinen Impulses in dieser Form niemals durchgeführt werden. Es existieren jedoch andere mögliche Anordnungen, die empirisch untersucht werden können und die bisher in allen Fällen die Gültigkeit der Unbestimmtheitsbeziehung bestätigt haben.

Quanten stammen, deren Weg man auf die soeben dargestellte Art in Erfahrung bringen konnte, keinerlei Interferenzstreifen mehr erzeugen.[188]

Für Bohr ist dieser Befund von besonderer Wichtigkeit, „denn nur der Umstand, daß wir vor der Wahl stehen, *entweder* den Weg eines Teilchens zu verfolgen, *oder* Inteferenzwirkungen zu beobachten, gestattet es uns, dem paradoxen Schluß zu entgehen, daß das Verhalten eines Elektrons oder Photons von dem Vorhandensein eines Schlitzes im Schirm abhängen sollte, durch den es nachweisbar nicht hindurchgegangen ist. Wir haben hier ein typisches Beispiel dafür, wie die komplementären Phänomene unter sich gegenseitig ausschließenden Versuchsanordnungen [...] auftreten, und wir stehen bei der Analyse der Quanteneffekte vor der Unmöglichkeit, eine scharfe Trennungslinie zwischen einem unabhängigen Verhalten atomarer Objekte und ihrer Wechselwirkung mit den Meßgeräten zu ziehen, die zur Definition der Bedingungen für das Auftreten der Phänomene dienen."[189]

Der Physiker Richard Feynman diskutiert im dritten Band seiner *Vorlesungen über Physik* ein ähnliches Experiment mit Elektronen, bei dem durch Beleuchtung des Doppelspaltes mit Licht herausgefunden werden soll, durch welche der beiden Öffnungen ein in der Apparatur befindliches Elektron hindurchgegangen ist, bevor es auf dem Schirm einen Ort erreicht, dessen absolute Wahrscheinlichkeit im unbeobachteten Fall nur durch die Interferenz beider möglichen Wege erklärt werden kann.[190] Um das Elektron durch diese Lichtstreuung möglichst wenig zu beeinflussen, wird sehr schwache Strahlung verwendet, die man im Grenzfall sogar so weit reduzieren kann, dass nur ein einzelnes Lichtquant mit dem Elektron kollidieren kann.[191] Nun zeigt sich, wie Feynman quantitativ herleitet, auch in diesem Fall eine nicht zu hintergehende Komplementarität der experimentellen Situationen. Da das räumliche Auflösungsvermögen des Lichts von seiner Wellenlänge abhängt, ist man gezwungen, dieses so kurzwellig zu wählen, dass der Elektronenort

---

[188] Die Figur verschiebt sich in ähnlicher Weise wie der Schatten einer scharfen Kante, welche man aus jeweils unterschiedlichen Richtungen beleuchtet. Wenn der Versuch immer nur mit einzelnen Lichtquanten durchgeführt wird, kann man die Verschiebung der Interferenzfigur natürlich nicht unmittelbar beobachten, da auf dem Film immer nur ein einzelner Fleck erscheint. Summiert man jedoch die Ergebnisse vieler derartiger Experimente, so zeigt sich eine Überlagerung unterschiedlicher (virtueller) Interferenzmuster, die eben selbst keines mehr ist, d.h. die derjenigen Verteilung gleichkäme, die man erhielte, wenn man mit „klassischen" Korpuskeln, die *per definitionem* keine Welleneigenschaften besitzen, auf die beiden Spalte schießen würde. Auf die exakte quantitative Analyse des Falles, die sich relativ einfach gestaltet, soll in diesem Rahmen verzichtet werden. Der interessierte Leser findet diese in Bohr (1958), S. 46.

[189] Bohr (1958), S. 46f. Kursive Hervorhebungen im Original. – Der hier von Bohr verwendete Begriff „Photon" ist synonym mit Einsteins Begriff „Lichtquant" und heute allgemein verbreitet. Er wurde 1926 von dem amerikanischen Chemiker Gilbert Lewis (1875-1946) eingeführt.

[190] Vgl. Feynman (1988), S. 25ff.

[191] Hier handelt es sich ebenfalls um ein Gedankenexperiment, dessen tatsächliche Durchführung auf entsprechend empfindliche Detektoren angewiesen wäre.

zumindest *derart* genau ermittelt werden kann, dass er sich einem der beiden möglichen Wege eindeutig zuordnen lässt. Ist diese Bedingung erfüllt, so ist aber der zugeordnete Impuls des Lichtquants gerade so groß, dass das Elektron duch diese Wechselwirkung so weit in seiner Bahnbewegung gestört wird, dass die Interferenzfigur nicht mehr in Erscheinung treten kann.[192] Verlängert man hingegen die Wellenlänge des zur Beleuchtung dienenden Lichts, so sind zwar die Interferenzstreifen wieder wahrnehmbar, aber der aus der Streuung dieses Lichts erschlossene Elektronenort wird dermaßen unscharf, dass er sich nicht mehr eindeutig einem bestimmten Spalt zuordnen lässt. Die genaue quantitative Betrachtung auch dieses Experiments zeigt wiederum, dass die Unschärfebeziehung nicht umgangen werden kann und die komplementären Situationen, wie von Bohr gefordert, auf keinen Fall in direkten Widerspruch miteinander geraten können: „Wenn ein Apparat in der Lage ist festzustellen, durch welches Loch das Elektron geht, dann kann er *nicht* so feinfühlig sein, daß er das Beugungsbild nicht wesentlich stört. Niemand hat jemals einen Weg gefunden (oder erdacht), der um das Unbestimmtheitsprinzip herumführt. Daher müssen wir annehmen, daß es eine grundsätzliche Eigenschaft der Natur beschreibt.“[193]

In der auf der 5. Solvay-Konferenz begonnenen und über viele Jahre fortgesetzten Debatte zwischen Niels Bohr und Albert Einstein wurden die unterschiedlichsten Varianten dieser Experimente analysiert, und anhand der von Einstein zur Widerlegung des Komplementaritätsprinzips ersonnenen Versuchsaufbauten vermochte Bohr immer wieder zu zeigen, dass letzteres nicht unterlaufen werden kann und die darauf fußende Quantenmechanik stets zu adäquaten und widerspruchsfreien Vorhersagen führt. Auch andere Paare kanonisch konjugierter Variablen, wie z.B. die komplementären Größen von Zeit und Energie, wurden in diesem Sinne untersucht.[194] Auf der sechsten Solvay-Konferenz, die im Jahre 1930 stattfand, präsentierte Einstein diesbezüglich eine äußerst scharfsinnige Apparatur, mittels deren er behauptete in der Lage zu sein, gleichzeitig den Zeitpunkt der Emission eines Teilchens *und* dessen Energie mit beliebiger Genauigkeit zu ermitteln, d.h. die Unbestimmtheitsrelation hinsichtlich dieser Werte *de facto* zu umgehen. Er bediente sich dabei der berühmten Beziehung zwischen Energie und Masse $E=mc^2$, die

---

[192] Ähnlich dem oben diskutierten Beispiel entspricht hier die leicht versetzte Bahn des Elektrons einem verschobenen Emissionsort der zugeordneten de Broglie-Wellen, deren Interferenzmuster dann auf analoge Weise verschwindet wie dasjenige der Lichtwellen im Falle „unscharfer“ bzw. unbestimmter Blendenpositionen.

[193] Feynman (1988), S. 28. Kursive Hervorhebung im Original.

[194] Entsprechend der Unschärfebeziehung gilt auch hier, dass das Produkt der Unkenntnis einer Energiegröße ΔE und der Länge des Zeitintervalls ΔT, während dessen man diese Energie zu messen gedenkt, nicht kleiner als das Plancksche Wirkungsquantum werden kann: $\Delta E \cdot \Delta T \geq h$.

im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie formuliert worden war, um Energiebeträge indirekt über den Prozess der Gewichtsbestimmung erschließen zu können. Die nachfolgende Skizze Bohrs zeigt den entsprechenden Versuchsaufbau, der, wie in all diesen Fällen, als Gedankenexperiment zu verstehen ist:

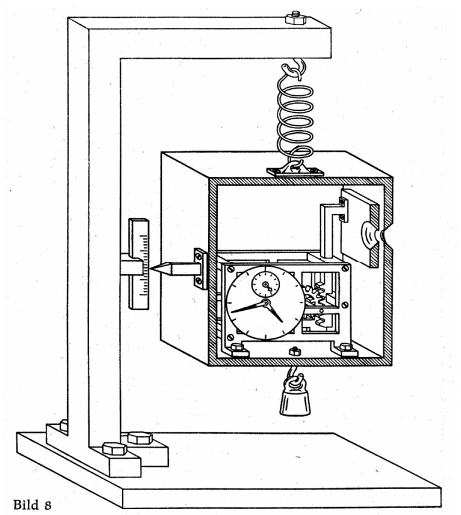


Bild 8 Abbildung nach Bohr (1958), S. 55

Einstein nimmt an, dass sich in einem hermetisch abgeschlossenen Kasten eine gewisse Menge elektromagnetischer Strahlung befinde. Darüber hinaus enthält der Kasten eine präzise Uhr, welche mittels eines angekoppelten Schiebers in der Lage sein soll, zu einem genau bestimmten Zeitpunkt und für einen sehr kurzen Augenblick eine Öffnung freizugeben, durch welche im gelingenden Fall nur ein einzelnes Lichtquant nach außen entweichen kann. Die nach der Unbestimmtheitsrelation geforderte Beziehung zwischen der Genauigkeit einer Energiemessung ΔE und der Länge des zur Messung benötigten Zeitintervalls ΔT, welche in der Ungleichung $\Delta E \cdot \Delta T \geq h$ zum Ausdruck kommt, könnte nun, so die Argumentation Einsteins, durch die beliebig genaue Ermittlung des Zeitraumes, in welchem ein Lichtquant die Apparatur verlässt *und* die anschließende Wägung des gesamten Kastens, welcher um den der Energie korrespondierenden Betrag $\Delta m = \Delta E/c^2$ leichter geworden sein muss, gleichsam außer Kraft gesetzt werden. Der Wert von ΔT *und* die konjugierte Größe ΔE wären in direktem Widerspruch zu den Prognosen der Quantenmechanik *zusammen* mit beliebiger Genauigkeit zu ermitteln.

Angesichts dieser einfallsreichen Anwendung der Gesetze der Speziellen Relativitätstheorie und der damit einhergehenden Bedrohung des quantenmechanischen Formalismus musste Bohr seinen gesamten Scharfsinn aufbieten, denn auf den ersten Blick schien dieses Gedankenexperiment physikalisch korrekt analysiert und vollkommen

unangreifbar zu sein. Man kann gleichwohl darin eine gewisse Ironie der Geschichte erblicken, dass die rettende Idee, mit deren Hilfe es schließlich doch noch gelang, das infrage stehende Argument zu entkräften, der Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins entstammte, so dass dieser letztlich mit den eigenen Waffen geschlagen werden konnte. Gemäß dieser Theorie ändert sich die Ganggeschwindigkeit einer Uhr in Abhängigkeit von der Stärke der lokalen Gravitationsbeschleunigung, was dazu führt, dass im radialsymmetrischen Feld der Erde die physikalisch messbare Zeit umso langsamer verläuft, je mehr man sich ihrer Oberfläche nähert: Erdnah angesiedelte Uhren „ticken" um einen in der Regel vernachlässigbaren Betrag langsamer als erdferne Zeitmesser. Bohr konnte nun quantitativ zeigen, dass die winzige Ortsveränderung, die der ursprünglich im Kräftegleichgewicht befindliche Kasten nach dem Entweichen eines Lichtquants bzw. der entsprechenden Verringerung seines Gewichts erfährt, zu einer Unsicherheit bezüglich der zeitlichen Einordnung der Energieabstrahlung führt, die in vollkommenem Einklang mit den Vorhersagen der Unbestimmtheitsrelation bezüglich Zeit und Energie ($\Delta E \cdot \Delta T \geq h$) steht.[195]

Der physikalische Laie ist in der Regel darauf angewiesen, die mathematische und sachliche Folgerichtigkeit der Argumente, die im Rahmen der Auseinandersetzung um die Konsistenz der Quantentheorie ausgetauscht wurden, auf guten Glauben hinzunehmen. Dass die von Bohr vorgenommenen quantitativen Analysen der diskutierten Gedanken-experimente prinzipiell richtig seien, mussten ihm schließlich auch die in der Theorie bewanderten Kritiker, und allen voran Albert Einstein, zugestehen. Es ließ sich kaum noch bestreiten, dass der Kalkül in seiner konkreten Anwendung offenbar widerspruchsfrei

---

[195] Stellvertretend für die quantitative Analyse dieser und ähnlicher Gedankenexperimente sei hier das Bohr´sche Argument im Detail vorgeführt: Noch vor dem Entweichen eines Lichtquants muss die Gleichgewichtslage des Kastens (Nullpunkt der „Waage") möglichst exakt vermessen werden, um die durch das Entweichen hervorgerufene Gewichtsdifferenz später bestimmen zu können. Bei dieser Messung gilt die Unbestimmtheitsbeziehung zwischen Ort und Impuls:
(1) $\Delta p \cdot \Delta q \approx h$ oder umgestellt (2) $\Delta p \approx h / \Delta q$.
Ändert sich plötzlich das Gewicht des Kastens um Δm, so beginnt sich dieser nach „oben" zu bewegen und sein hierdurch entstehender Impuls ist gegeben durch: $p = \Delta m \cdot v$ und mit $v = g \cdot T$ folgt: (3) $p = \Delta m \cdot g \cdot T$. Mit v ist die Geschwindigkeit, mit g die Erdbeschleunigung und mit T die Zeit bezeichnet. Die durch die genaue Ortsbestimmung des Kastens hervorgerufene Impulsunschärfe (2) muss nun stets kleiner sein als der durch die Massenabnahme des Kastens hervorgerufene Impuls (3), denn sonst ließe sich die tatsächliche Gewichtsdifferenz gar nicht mehr ermitteln. Es muss also nach (2) und (3) gelten:
$h / \Delta q < \Delta m \cdot g \cdot T$ oder nach T aufgelöst (4) $h / \Delta q \cdot g \cdot \Delta m < T$.
Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie gilt für den Betrag ΔT, um den eine um Δq im Gravitationsfeld g verschobene Uhr im zeitlichen Intervall T vom „ursprünglichen" Gang abweicht, folgende Beziehung: $\Delta T/T = 1/c^2 \cdot g \cdot \Delta q$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet. Nach ΔT aufgelöst ergibt sich: (5) $\Delta T = 1/c^2 \cdot g \cdot \Delta q \cdot T$. Dabei ist T nach (4) mindestens so groß wie $h / \Delta q \cdot g \cdot \Delta m$, d.h. aus (5) und (4) folgt (6) $\Delta T > h / c^2 \cdot \Delta m$. Da nach der Speziellen Relativitätstheorie $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ ist, ergibt sich zusammen mit (6) die Gleichung (7) $\Delta T > h / \Delta E$ oder umgestellt die Unbestimmtheitsbeziehung: $\Delta T \cdot \Delta E > h$.

funktionierte und ebenso in der Lage war, den Ausgang möglicher Experimente erfolgreich vorherzusagen; doch davon, dass diesem darüber hinaus, wie von Bohr und Heisenberg immer wieder betont, der Charakter einer physikalischen Fundamentaltheorie beizulegen sei, ließ sich Einstein letztlich nicht überzeugen. Für ihn spielte die Quantenmechanik weiterhin nur die Rolle eines Provisoriums, welches so bald als möglich durch eine vom Ideal des klassischen Determinismus geleitete Alternative zu ersetzen sei.

6.2 Das Einstein-Podolsky-Rosen (EPR-) Paradoxon

Nach Ansicht vieler Beobachter der Solvay-Konferenzen war Einstein mit seinen bisherigen Bemühungen, die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie mittels äußerst scharfsinniger Gedankenexperimente anzugreifen, mehr oder weniger gescheitert. Der Physiker Paul Ehrenfest sah in der Situation sogar eine unmittelbare Parallele zur bisweilen polemisch geführten Debatte um die relativistische Neuinterpretation der physikalischen Begriffe von Zeit und Raum: „Einstein, ich schäme mich für dich; denn du argumentierst gegen die neue Quantentheorie jetzt genauso, wie deine Gegner gegen die Relativitätstheorie.“[196]

Nachdem die sich zuspitzenden politischen Verhältnisse in Deutschland Einstein schließlich zur Emigration in die USA bewogen hatten, unternahm er zusammen mit seinen Assistenten Boris Podolsky und Nathan Rosen einen erneuten Anlauf, der Quantentheorie eine grundsätzliche Unvollständigkeit nachzuweisen und darüber hinaus zu zeigen, dass auch weiterhin die begründete Hoffnung auf ein Modell der physikalischen Wirklichkeit bestehe, welches von derartigen Zumutungen wie dem Bohrschen Komplementaritätsprinzip oder der mit dem Quantenpostulat einhergehenden Relativierung des Kausalitätsideals nicht betroffen sei. Wie schon so oft wurde zu diesem Zweck ein weiteres Gedankenexperiment entworfen, in dem, bezeichnenderweise unter Zugrundelegung der Quantentheorie selbst, demonstriert werden sollte, dass gewisse experimentelle Situationen es, entgegen den Beschränkungen der Unbestimmtheitsrelation, dennoch erlauben müssten, auf indirektem Wege die objektive und numerisch genau bestimmte Existenz derjenigen konjugierten Größen zu erschließen, welchen der Kopenhagener Deutung zufolge bis zum Akt einer möglichen Messung überhaupt keine Realität zugebilligt werden kann.

Einstein, Podolsky und Rosen entwickeln ihre Argumente anhand eines vereinfachten quantenmechanischen Modellsystems, das aus der Wechselwirkung zweier ehemals unabhängiger Teile (z.B. zweier Elektronen) hervorgegangen ist und welches gemäß den Regeln der Theorie *nach* dieser Interaktion (z.B. einem Stoßprozess) durch eine einheitliche und beiden gemeinsame Ψ-Funktion beschrieben werden muss. Die betreffende Wellengleichung ergibt sich unmittelbar aus einer Überlagerung bzw.

[196] Zitiert nach Heisenberg (2001), S. 100.

Superposition der ursprünglich eigenständigen Ψ-Funktionen der Komponenten und ist der mathematische Ausdruck eines Zustandes, den Schrödinger mit dem Begriff der „Verschränkung“ versehen hat.[197] Aus dieser gemeinsamen Darstellung lassen sich nun mittels geeigneter Transformationen nicht mehr Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Ergebnisse möglicher Messungen an einem einzelnen Teil berechnen, sondern vielmehr Verteilungen für relationale Attribute, die das Verhältnis beider betreffen, wie z.B. der räumliche Abstand. Die verschränkte Wellenfunktion des *Gesamtsystems* ist vollständig (d.h. sie enthält alle über das System verfügbaren und möglichen Informationen), und man kann aus ihr keine zwei separaten und ihrerseits vollständigen Funktionen für die ursprünglichen Komponenten berechnen. Sie lässt sich tatsächlich nur durch einen konkreten Messakt auflösen.

Als Beispiel für die Entstehung einer solchen Konstellation kann man sich die symmetrische Wechselwirkung zweier Elektronen vorstellen, die in einem bestimmten räumlichen Gebiet einen elastischen Stoß vollführen und sich anschließend wieder beliebig weit voneinander entfernen.[198] Die Beschränkung des betrachteten Falles auf *einen* räumlichen Freiheitsgrad trägt zur weiteren Vereinfachung bei, ohne die prinzipielle Argumentation zu beeinflussen. Das zugehörige Koordinatensystem besteht somit nur aus einem eindimensionalen unendlichen Zahlenstrahl bzw. einer Achse.

Es liegt zunächst nahe, sich diese Kollision und das anschließende Auseinanderfliegen der Teilchen anschaulich vorzustellen, d.h. im gleichen Sinne zu visualisieren wie ein System der klassischen Mechanik. Dies ist jedoch nur mit der gebotenen Vorsicht möglich, die dem Umstande zu schulden ist, dass jedwedes quantenmechanische Objekt der Unbestimmheitsrelation Heisenbergs unterworfen ist und somit grundsätzlich nicht als raumzeitlich exakt lokalisierter Gegenstand aufgefasst werden kann. Nach dieser Interpretation tritt ein „reales“ Elementarteilchen immer nur im Rahmen eines Messaktes in Erscheinung, so dass sich mit gewissem Recht die These vertreten lässt, dass dieses ohne Messung gar nicht als solches existiert. Übertragen auf das zuvor beschriebene

---

[197] Vgl. Schrödinger (1935) in Baumann/Sexl (1984), S. 116.

[198] Ein elastischer Stoß ist ein solcher, bei dem Impuls- und Energieerhaltungssatz in Strenge gültig sind. Die Abstoßung zweier Elektronen geschieht infolge ihrer jeweils negativen elektrischen Ladung. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab und die Kraft ihrer Abstoßung wird umso größer, je näher sich die Zentren dieser radialsymmetrischen Felder kommen. Wenn zwei klassische Objekte (z.B. zwei Billardkugeln) kollidieren, geschieht dies streng genommen auch infolge der elektrostatischen Abstoßung der Elektronen in den Atomhüllen ihrer Konstituenten. Ihre vermeintliche Solidität bzw. Undurchdringlichkeit ist die Folge elektrostatischer Kräfte. Partikel, die keiner elektromagnetischen Wechselwirkung fähig sind (wie z.B. Neutronen), durchdringen die Atomhüllen, deren Volumen das des Atomkerns um den Faktor 10^{14} (Einhundertbillionen!) übersteigt, vollkommen unbeeinflusst.

eindimensionale Modellsystem, kann auch hier von einer stetigen Bewegung zweier kompakter und unabhängig vom Akt einer möglichen Beobachtung existierender Korpuskeln keine Rede sein. Die Schrödingersche Ψ-Funktion, die alle verfügbaren Informationen enthält, beschreibt in ihrer zeitlichen Evolution weniger reale Vorgänge im Raum als vielmehr die Veränderung der Wahrscheinlichkeitsverteilung möglicher Aufenthaltsorte, d.h. gewissermaßen den Erwartungskatalog der Resultate möglicher Experimente zu einem beliebigen zukünftigen Zeitpunkt. Die genauen Resultate eines Versuches sind nicht vorhersehbar, lediglich die zeitliche Entwicklung der Wellenfunktion $\Psi_{(t)}$ selbst ist stetig und streng deterministisch. Nach der Kopenhagener Interpretation der Theorie ereignet sich dann, wenn eine Messung tatsächlich erfolgt, der sprichwörtliche „Quantensprung", der aus den jeweils verschiedenen möglichen Werten einer dynamischen Variablen[199] einen ganz konkreten Wert „auswählt". Die vormals objektiv vorhandene Wahrscheinlichkeit für andere Werte bricht mit diesem Eingriff augenblicklich zusammen. Sie nimmt für den tatsächlich gemessenen Wert die Wahrscheinlichkeit Eins (Sicherheit) an und wird für alle Alternativen Null (Unmöglichkeit), was im Jargon der Physiker als „Reduktion" oder „Kollaps" der Wellenfunktion bezeichnet wird. Heisenberg spricht auch von einem Übergang vom Möglichen (der aristotelischen „Potentia") zum Wirklichen.

Werden im Falle eines ungestörten (d.h. ungemessenen) quantenmechanischen Objektes die Impuls- und Ortsunschärfen als gleich groß und kleinstmöglich[200] angenommen, so kann annähernd von der „Trajektorie" eines räumlichen Bereiches mit von Null verschiedener Aufenthaltswahrscheinlichkeit gesprochen werden, welche in der zugehörigen Gleichung durch ein sogenanntes Wellenpaket repräsentiert wird, d.h. eine sich bewegende Wellengruppe von endlicher Länge.[201] In der experimentellen Praxis, wie z.B. innerhalb einer Wilsonschen Nebelkammer[202], entsteht der Eindruck einer realen Teilchenbahn durch eine Serie vieler hinreichend unscharfer Messungen der Ortskoordinate, die infolge ihrer Unschärfe keinen allzugroßen Einfluss auf die konjugierten Impulswerte ausüben. Es resultiert eine scheinbar zusammenhängende

---

[199] Zu den dynamischen Variablen zählen alle prinzipiell veränderlichen Parameter. Im Gegensatz zu diesen existieren sogenannte statische Größen wie z.B. Ruhemasse oder elektrische Ladung, deren Messung in allen Koordinatensystemen stets dieselben Werte liefert.

[200] Bekanntlich kann das Produkt der Unschärfen der dynamischen Attribute von Ort und Impuls geringstenfalls h (d.h. das Plancksche Wirkungsquantum) erreichen: $\Delta p \cdot \Delta q \geq h$.

[201] Das Quadrat des Absolutwertes der Amplitude dieser Wellengruppe an einem bestimmten Ort x ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, im Zuge einer Messung das zugehörige Teilchen dort nachzuweisen.

[202] Vgl. Anm. 181.

Linie, die allerdings streng genommen unstetig ist, d.h. aus einer Folge von ungefähren Ortsmessungen zusammengesetzt ist.[203] Ohne unmittelbare Messung, darauf hat Heisenberg an unterschiedlichsten Stellen immer wieder hingewiesen, sind weder der Ort noch der Impuls eines Teilchens objektive Elemente der physikalischen Realität: „Ich glaube, daß man die Entstehung der klassischen ´Bahn´ prägnant so formulieren kann: Die ´Bahn´ entsteht erst dadurch, daß wir sie beobachten.“[204]

Einstein, Podolsky und Rosen versuchen nun anhand ihres zweiteiligen verschränkten Modellsystems zu zeigen, dass aus einer geschickten Anwendung der Regeln des Formalismus und einem nicht explizit formulierten, aber offensichtlich stillschweigend vorausgesetzten Lokalitätspostulat zwingend hervorgeht, dass die dynamischen Attribute Ort und Impuls nicht erst in Erscheinung treten, wenn eine konkrete Messung durchgeführt wird, sondern vollkommen unabhängig von einer solchen stets genau definierte Werte haben, d.h. mitsamt dem Teilchen, als dessen vollständige klassische Bestimmungsstücke sie gelten können, objektiv in Raum und Zeit existieren. Was hier mit dem Terminus „Lokalitätspostulat“ bezeichnet wurde, ist eine aus der Alltagserfahrung unmittelbar übernommene und in der klassischen Physik explizit unterstellte These, welche besagt, dass lokale Wirkungen auch lokale Ursachen haben müssen, oder anders ausgedrückt: Es kann keine unvermittelten und augenblicklichen, d.h. ohne zeitlichen Verzug eintretenden Fernwirkungen geben.[205]

---

[203] Die Größenordnung des Wortes „ungefähr“ bezieht sich auf die Unbestimmtheitsrelation und damit indirekt auf den Wert des Planckschen Wirkungsquantums. Dessen enorme Kleinheit von $6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js führt zu einer entsprechend kleinen und in der Regel vernachlässigbaren Unschärfe der dynamischen Variablen Δq und Δp, die aber *prinzipiell* nicht vermieden werden kann. Was in einer Wilsonschen Blasenkammer (Vgl. Anm. 181) als Spur eines Elementarteilchens in Form kleiner Wassertropfen unmittelbar „sichtbar“ wird, ist verglichen mit den tatsächlichen Unschärfen der Aufenthaltsorte des Teilchens von geradezu gigantischem Ausmaß.

[204] Heisenberg (1927) in Baumann/Sexl (1984), S. 66.

[205] Das Gravitationsgesetz Newtons hat z.B. die mathematische Form einer Fernwirkung. Es beschreibt bekanntlich die Kraft, mit welcher sich zwei Körper von gegebener Masse und ebenfalls gegebenem Abstand anziehen, wobei keine Aussage darüber gemacht wird, welche Rolle Raum und Zeit bei der Etablierung dieser Kraft spielen. Würde z.B. die Sonne durch eine Kollision mit einem anderen Objekt aus ihrem gegenwärtigen Bewegungszustand gebracht, so müsste dies auf der Erde ohne Zeitverzug, d.h. instantan, zu spüren sein, obwohl die mittlere Entfernung beider Himmeskörper immerhin 150 Millionen Kilometer beträgt. Bereits für Newton war diese Vorstellung augenblicklicher Fernwirkungen eine physikalische Unmöglichkeit, ohne dass er jedoch in der Lage gewesen wäre, eine quantitativ ausgearbeitete Nahwirkungstheorie der Gravitation zu entwerfen. Nachdem von Michael Faraday die Idee eines Feldes in die Physik eingeführt worden war und es schließlich Maxwell gelang, diese Felder und die jeweils zugehörigen Kräfte mittels zeitabhängiger Differentialgleichungen zu modellieren, war offensichtlich, dass weder elektrische noch magnetische Wirkungen instantan beliebige Distanzen des Raumes überwinden können, sondern dies maximal mit der Geschwindigkeit des Lichts erfolgen kann. In Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie wird dies auch für die Gravitationskraft geleistet, d.h. auch diese Wirkung kann sich hier nicht schneller ausbreiten, als das Licht. Könnte sich die Sonne „in Nichts auflösen“, so würden ca. 8 Minuten vergehen, bis dies auf der Erde zu spüren wäre.

Der Aufsatz aus dem Jahr 1935 beginnt zunächst mit einer nach Ansicht der Autoren vernünftig erscheinenden Explikation der Begriffe „Vollständigkeit“ – hinsichtlich einer physikalischen Theorie – und „Realität“ – in bezug auf physikalische Attribute bzw. Größen:

„Welche Bedeutung man auch immer dem Ausdruck *vollständig* beimißt, folgende Forderung an eine vollständige Theorie scheint unumgänglich zu sein: *jedes Element der physikalischen Realität muß seine Entsprechung in der physikalischen Theorie haben.*“[206]

Und weiter ist die Rede von einem „Kriterium [...], das wir für vernünftig halten. *Wenn wir, ohne auf irgendeine Weise ein System zu stören, den Wert einer physikalischen Größe mit Sicherheit (d.h. mit der Wahrscheinlichkeit gleich eins) vorhersagen können, dann gibt es ein Element der physikalischen Realität, das dieser physikalischen Größe entspricht.*“[207]

Dieses letztere Kriterium ist sicherlich keine notwendige Bedingung der Realität einer physikalischen Größe, aber nach Ansicht der Verfasser sicherlich eine hinreichende. Sie lässt sich auch als Konditionalsatz formulieren: Wenn sich aus einer Theorie für einen gegebenen Parameter mit Sicherheit vorhersagen lässt, welchen Wert dieser im Falle einer Messung annehmen würde, dann existiert eine von der Theorie angemessen repräsentierte physikalische Struktur oder Entität, die als objektive Ursache dieses Messergebnisses angesehen werden kann.

Es sind nun solche Fälle der „sicheren“ Vorhersage, die anhand des verschränkten Systems diskutiert werden sollen. Die Autoren machen sich den Umstand zunutze, dass die Ψ-Funktion bestimmte, zwischen beiden Elementen bestehende Korrelationen spezifiziert, die es erlauben, von der Kenntnis ausgewählter Attribute des einen auf diejenigen des jeweils anderen zu schließen. Genau genommen erlaubt es die Schrödingerfunktion des verschränkten Systems, gleichzeitig die *Differenz* der Ortskoordinaten, d.h. den räumlichen Abstand der Korpuskeln, und die *Summe* ihrer Impulse zu kennen. Durch die Wahl eines geeigneten Bezugssystems, dessen Ursprung (Nullpunkt) mit der Zone der Wechselwirkung (d.h. der vorherigen Kollision) zusammenfällt, lässt sich aus der Ortsmessung des ersten Teilchens die genaue Position des zweiten ermitteln, indem einfach das Vorzeichen des Resultates vertauscht wird: Ist der Ort des ersten z.B. mit dem Ergebnis +5cm gemessen worden, so ist sicher, dass eine gleichzeitige Messung am

[206] Einstein/Podolsky/Rosen (1935) in Baumann/Sexl (1984), S. 81. Kursivierung im Original.
[207] Ebd., S. 81. Kursivierung im Original.

zweiten den Wert -5cm ergeben würde. Dies gilt nach der Kopenhagener Interpretation wohlgemerkt nur im Falle einer tatsächlich durchgeführten Messung. Vor einer solchen unterliegt die Differenz beider Orte den Erfordernissen der Unbestimmtheitsrelation und ist nur durch eine entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung repräsentiert. Aber: *Wenn* der Ort einer der Komponenten gemessen wurde, *dann* ist auch der Ortswert der jeweils anderen bestimmt. Würde man auch diesen gleichzeitig ermitteln, so unterschieden sich beide nur durch ihr Vorzeichen.

Eine analoge Situation liegt im Falle der Impulswerte vor. Im obigen Bezugssystem ist die Summe beider Impulse stets Null; diese sind von gleichem Betrag und in entgegengesetzte Richtungen orientiert. Wird jenes Attribut an einem Teilchen gemessen, so lässt sich das Resultat einer gleichzeitig am jeweils anderen durchgeführten Impulsbestimmung mit Sicherheit vorhersagen: Man erhielte den gleichen numerischen Wert mit negativem Vorzeichen. Doch wiederum gilt dies nur, wenn auch tatsächlich gemessen wurde. Geschieht dies nicht, so sind die genauen Impulse beider Teilchen keine objektiven Elemente der physikalischen Realität. Sie existieren solange nicht, bis sie im Rahmen eines Experiments gleichsam dazu „gezwungen“ werden, sich festzulegen.

Es ist nun dieser aus der Mathematik des verschränkten Systems selbst sich ergebende Sachverhalt, der zusammen mit dem oben zitierten Realitätskriterium und der ebenso nachvollziehbaren Lokalitätsbedingung berechtigte Zweifel an der Vollständigkeit der Quantenmechanik aufkommen lässt. Der Umstand, dass nach einer Messung von Ort oder Impuls des einen Teilchens die korrespondierende Größe am jeweils anderen mit Sicherheit, d.h. mit einer Wahrscheinlichkeit gleich Eins vorhergesagt werden kann, ist vernünftigerweise nur dadurch zu erklären, dass dieser Wert auch *vor* einer Messung und eigentlich *zu jeder Zeit* genau festgelegt ist. Beide Komponenten des verschränkten Systems können sich ja beliebig weit voneinander distanzieren, und eine Messung an dem einen Teil sollte nur von den lokalen Bedingungen am Messpunkt abhängen und nicht von den Experimenten, die mit einem eventuell viele Lichtjahre[208] entfernten „Partnerteilchen“ angestellt werden. Es muss mit anderen Worten ausgeschlossen sein, dass eine konkrete Messung nicht nur den Ort des ersten Elementes aus einem objektiv unbestimmten in einen wohldefinierten Zustand versetzt, sondern gleichzeitig auch noch die Position des zweiten

[208] Ein „Lichtjahr“ ist eine astronomische Entfernungseinheit und ist gegeben durch die Strecke, die Licht in einem Jahr zurücklegt. Ein Lichtjahr entspricht etwa 9,4 Billionen Kilometern.

Teiles, und das ohne zeitlichen Verzug und über eine räumliche Distanz vieler Billionen Kilometer hinweg. Wenn der von der Quantenmechanik modellierte Zustand der Verschränkung eine adäquate Beschreibung des Systems ist und hier die Möglichkeit besteht, von der Kenntnis des Ortes bzw. Impulses des einen Elementes auf die korrespondierenden Größen des jeweils anderen zu schließen, so können diese Attribute im ungemessenen Zustand nicht wirklich unbestimmt sein, sondern lediglich unbekannt. Anders wären unter der Annahme der Lokalität die starken Korrelationen zwischen den Resultaten räumlich vollkommen voneinander getrennter Experimente nicht zu erklären.

Durch eine geschickte Ausnutzung der Symmetrie der behandelten Situation kann darüber hinaus der fundamentale Charakter der Unbestimmtheitsrelation Heisenbergs in Zweifel gezogen werden, denn diese ließe sich durch eine Ortsmessung am ersten und eine gleichzeitige Impulsmessung am zweiten Teil des Systems indirekt außer Kraft setzen. Infolge der Übertragbarkeit dieser Werte auf die jeweils andere Komponente wären beide Attribute an beiden Teilen genau bekannt, obwohl die Quantenmechanik eine solche Kenntnis prinzipiell ausschließt, ja sogar die objektive Existenz der nicht unmittelbar gemessenen Parameter grundsätzlich in Abrede stellt. Erwin Schrödinger hat explizit auf diese Möglichkeit hingewiesen[209], obwohl hier natürlich zwischen der Frage nach der Angemessenheit einer Theorie hinsichtlich der Vorhersage möglicher Messergebnisse und dem viel grundlegenderen Problem der Vollständigkeit einer solchen unterschieden werden muss. Einstein, Podolsky und Rosen zweifeln nicht daran, dass infolge der Unbestimmtheitsrelation jeder lokale Beobachter, der eines der Teilchen des verschränkten Systems zu messen beabsichtigt, an diesem immer nur *einen* Parameter (Impuls *oder* Ort) tatsächlich ermitteln kann. Ebenso unstrittig ist die von der Unbestimmtheitsrelation vorhergesagte Wahrscheinlichkeitsverteilung für die jeweils konjugierte Variable, aufgrund deren z.B. im Rahmen einer idealisierten, d.h. unendlich präzisen Messung des Impulses eine vollkommen unbekannte Ortskoordinate in Kauf genommen werden muss. Dieses Verhalten ließe sich ja als unvermeidliche und erst durch die Messgeräte verursachte Störung des Teilchens interpretieren, die jedoch nichts mit der Tatsache zu schaffen hat, dass dieses an und für sich, d.h. im ungestörten Zustand sowohl für Ort als auch Impuls, zu jeder Zeit scharf definierte Werte besitzt. Mit anderen Worten: Einstein behauptet nicht, dass die Quantentheorie hinsichtlich der Vorhersage von Messergebnissen

[209] Vgl. Schrödinger (1935) in Baumann/Sexl (1984), S. 121.

falsch ist, sondern lediglich, dass sie unvollständig ist in dem Sinne, dass Elemente der physikalischen Wirklichkeit existieren, die in dieser nicht vorkommen. Dies könnte z.B. daran liegen, dass sie nur eine vorläufige Beschreibung der Phänomene ist und keine Theorie der objektiven Realität. Wird jedoch andererseits angenommen, dass sie eine solche ist oder dass es über ihre Vorhersage experimenteller Resultate hinaus gar keine Realität an und für sich gibt – eine These, der Niels Bohr geneigt zu sein scheint –, so kommt man nicht umhin zuzugestehen, dass mit der Messung eines Parameters an einem der Korpuskeln eines verschränkten Systems nicht nur dieser konkrete Wert aus einem unbestimmten in einen wohldefinierten Zustand wechselt, sondern auch die korrespondierende Variable am unter Umständen Lichtjahre weit entfernten Partnerteilchen. Dies wird jedoch von Einstein explizit abgelehnt, denn „dadurch wird der Realitätsanspruch von P und Q [d.h. der Orts- und Impulswerte des zweiten Teiles] vom Vorgang der Messung abhängig, die am ersten System ausgeführt wird und die auf keine Weise das zweite System beeinflusst. Man darf nicht erwarten, daß dies irgendeine vernünftige Definition der Realität zuläßt.“[210]

Auch für Erwin Schrödinger, der in einer eigenen Abhandlung das von Einstein entwickelte Argument wieder aufgreift, scheint die Quantenmechanik aus denselben Gründen unvollständig zu sein. Die Möglichkeit, aus dem Zustand eines verschränkten Systems sichere und eindeutige Konditionalsätze abzuleiten, kann unter der Annahme des Lokalitätspostulates nur bedeuten, dass bestimmte physikalische Attribute mit zu jeder Zeit definierten Werten an beiden Teilen real existieren, für die der Formalismus offensichtlich keine Entsprechung enthält, denn „direkt beeinflussen können einander Messungen an getrennten Systemen nicht, das wäre Magie.“[211]

In der unmittelbar folgenden Ausgabe der Zeitschrift *Physical Review*, in welcher der Artikel von Einstein, Podolsky und Rosen veröffentlicht worden war, antwortete Bohr in einem gleichnamigen Aufsatz auf die vorgebrachten Einwände.[212] Bohr weist im wesentlichen darauf hin, dass die von Einstein als „störungsfrei“ bezeichnete Bestimmung einer physikalischen Größe insofern einer unzulässigen Idealisierung unterliegt, als einer

---

[210] Einstein/Podolsky/Rosen (1935) in Baumann/Sexl (1984), S. 86. Hier ist zudem anzumerken, dass die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit (maximal Lichtgeschwindigkeit) jedweder physikalischen Wirkung zu den Grundpfeilern der Relativitätstheorie Einsteins gehört und „überlichtschnelle“ Beeinflussungen unter Umständen die Logik der Ursache-Wirkungs Verhältnisse bedrohen könnten. Es wären kausal herbeigeführte Ereignisse denkbar, deren Ursache in der Zukunft liegt usw. Auf dieses Problem wird später noch eingegangen werden.
[211] Schrödinger (1935) in Baumann/Sexl (1984), S. 121.
[212] Vgl. Bohr (1935) in Baumann/Sexl (1984), S. 87-97.

solchen immer nur hinsichtlich eines genau spezifizierten Bezugssystems Realität zukommen kann und eben dieses Bezugssystem wesentlich in die Definition besagter Größe mit eingehen muss. Im diskutierten Gedankenexperiment wird unausgesprochen unterstellt, dass sich für die verschränkten Teilchen ein absolutes Koordinatensystem angeben lässt, in welchem alle Angaben von Orts- und Impulswerten beider Komponenten stets adäquat ausgedrückt werden können und welches gegenüber tatsächlich durchgeführten Messungen vollkommen unempfindlich ist. Es sind nun aber diese Rahmenbedingungen möglicher Messungen selbst, welche durch jedweden experimentellen Eingriff notwendig und unvorhersehbar beeinflusst werden, so dass, wie Bohr betont, die Unzulässigkeit des Einsteinschen Argumentes „im wesentlichen durch die Unmöglichkeit begründet [ist], auf dem Gebiet der Quantentheorie die Rückwirkung des Objektes auf die Meßinstrumente, d.h. die Impulsübertragung im Falle von Ortsbestimmungen und die örtliche Verschiebung im Falle von Impulsbestimmungen, zu kontrollieren.“[213]

Wird etwa bei Gelegenheit des oben geschilderten Falles der Ort eines Teilchens – man nenne es „Elektron A“ – gemessen, so bedeutet dieser Begriff „messen“, dessen augenblickliche Lage relativ zu einem frei wählbaren Bezugsrahmen festzustellen; sinnvoll wäre etwa ein Koordinatensystem, in welchem das Messgerät ruht – z.B. der Experimentiertisch des physikalischen Labors. Nun ist eine Ortsmessung von Elektron A immer mit einem unberechenbaren Impulsaustausch zwischen diesem und dem Messgerät verbunden, der dazu führt, dass dieses Teilchen *nach* einer exakten Lokalisierung einen vollkommen unbestimmten Impulswert annimmt. Nachdem die Wechselwirkung mit dem Messgerät stattgefunden hat, kann seine Geschwindigkeit die unterschiedlichsten Werte haben, und eine Berechnung des zukünftigen Verhaltens ist nicht mehr möglich.[214]

Die Quantentheorie des von Einstein diskutierten verschränkten Systems erlaubt nun für den Fall einer Ortsmessung an Elektron A eine Prognose bezüglich des Ortes von Elektron B, so dass *zum gleichen Zeitpunkt*, in welchem A lokalisiert wurde, auch die Position von

---

[213] Bohr (1935) in Baumann/Sexl (1984), S. 91.

[214] Dieses Problem würde man auch nicht dadurch umgehen können, dass man sich beliebig „leichte“ Messgeräte vorstellte, die z.B. eine viel geringere Masse hätten als das zu messende Elektron. In diesem Falle würde zwar nicht der Impuls des Elektrons, dafür aber derjenige des Messgerätes entsprechend stark beeinflusst werden und mit diesem der Zustand des gesamten Bezugssystems. Die Situation wäre wiederum die gleiche: Die Geschwindigkeit des Elektrons relativ zum Bezugsrahmen ist nach einer Messung seines Ortes vollkommen unbekannt.

B genau festgelegt ist.[215] Ein an diesem Ort befindliches Messgerät würde mit Sicherheit, d.h. mit einer Wahrscheinlichkeit gleich Eins, das Elektron B registrieren.[216] Mit einem tatsächlich durchgeführten Messakt (Ortsmessung von A, B oder gleichzeitig A und B) ist jene Verschränkung der Teilchen aber augenblicklich aufgehoben, denn über das weitere Verhalten lässt sich infolge der unvermeidlichen Beeinflussung keine Aussage mehr machen.

Eine analoge Situation ergäbe die Ermittlung des Impulses. Ist dieser für Elektron A gemessen worden, so folgt der entsprechende Wert für B, auch ohne dass dieser tatsächlich bestimmt würde. Über den Ort von A lässt sich aber nach einer präzisen Impulsmessung keine Aussage mehr machen. Eine Prognose über die zukünftige Entwicklung des Systems ist damit ausgeschlossen und der Zustand der Verschränkung aufgehoben.

Eine gleichzeitige Messung des Ortes von A und des Impulses von B, würde nun, statt eine vollständige Information über beide Teile zu liefern, im Gegenteil dazu führen, dass keinerlei Übertragbarkeit von lokalen Messungen mehr zulässig ist. Mit der Ortsmessung an Elektron A ist dessen Impuls unbestimmt und mit der Impulsmessung an Elektron B dessen Ort. Keiner der Werte des einen Teilchens ließe sich mehr auf das jeweils andere extrapolieren.

Einstein, Podolsky und Rosen sind sich offenbar der empirischen Unmöglichkeit, ihre These von der Unvollständigkeit der Quantenmechanik unmittelbar in *einem* Experiment zu testen, durchaus bewusst. Dies hält sie jedoch nicht davon ab, die objektive Existenz der vielleicht prinzipiell unmessbaren Parameter dennoch zu erschließen: *Könnte* man sie störungsfrei messen, so würde sich zeigen, dass die zu jeder Zeit genau definierte Werte haben. Die Quantenmechanik selbst führt zusammen mit der vernünftigen Annahme des Lokalitätspostulates zwingend zu diesem Schluss.

Für Bohr hingegen ist die Rede von der Störung eines Teilchens, welches an und für sich zu jeder Zeit genau bestimmte Orts- und Impulswerte besitzt, eine grobe Vereinfachung der tatsächlichen Situation. Er glaubt nicht daran, dass etwas Präexistierendes gestört würde, sondern ist sich dessen sicher, dass jedweder experimentelle Aufbau ganzheitlich in

---

[215] Um dem relativistischen Begriff der Gleichzeitigkeit genüge zu tun, müssten die Uhren der Messgeräte von einem Lichtsignal synchronisiert werden, welches aus dem Zentrum der Wechselwirkungszone der beiden verschränkten Teilchen stammt.

[216] „Sicherheit“ ist hier natürlich ein theoretischer Wert, der von keiner realen Apparatur erreicht wird. Diese Teilchendetektoren sind in der Regel unvollkommen, und deren Fehlerrate muss aus den Versuchsergebnissen mittels statistischer Methoden „herausgerechnet“ werden.

die Definition des jeweils infrage stehenden Phänomens mit eingehen muss. Der Ort eines Teilchens wird somit gar nicht „gemessen“, sondern vielmehr durch das gesamte Experiment erst hervorgebracht und hat nur unter der Angabe des benutzten Verfahrens überhaupt einen physikalischen Sinn. Die Quantenmechanik beschreibt damit auch nicht das Ausmaß der vielleicht unvermeidlichen Störungen unabhängiger Elemente der Wirklichkeit. Sie macht vielmehr Voraussagen über mögliche und unmögliche Arten, von diesen Elementen überhaupt erst sinnvoll sprechen zu können. Insofern beeinflusst die Bestimmung eines lokalen Attributes des verschränkten Systems automatisch die Bedingungen und die Aussagekraft bezüglich möglicher Messungen am anderen Teil:

„Natürlich ist in einem Fall wie dem soeben betrachteten nicht die Rede von einer mechanischen Störung des zu untersuchenden Systems während der letzten kritischen Phase des Messverfahrens. Aber selbst in dieser Phase handelt es sich wesentlich um *einen Einfluss auf die tatsächlichen Bedingungen, welche die möglichen Arten von Voraussagen über das zukünftige Verhalten des Systems definieren.*“[217]

Genau genommen offenbart das verschränkte System eine neue Situation der Komplementarität, die ein wenig verwickelter ist als diejenige zwischen Impuls und Ort in bezug auf ein einzelnes Teilchen. Es ist hier entweder 1.) die gleichzeitige Kenntnis der *Differenz* der Impulse und die der *Summe* der Ortskoordinaten oder 2.) die Kenntnis der *Differenz* der Ortskoordinaten und die der *Summe* der Impulse möglich. Es lässt sich zeigen, dass eine vollständige Festlegung aller klassisch-mechanischen Bestimmungsstücke (d.h. Impuls und Ort) beider Teile nur durch eine Auswertung derjenigen Informationen zu erlangen ist, die aus den komplementären Situationen 1.) *und* 2.) *zusammen* extrahiert werden können. Dies ist aber, wie Bohr betont, sowohl praktisch als auch theoretisch niemals möglich, da die Quantenmechanik sich letztlich auf einen

„kohärenten mathematischen Formalismus stützt, der automatisch für jeden Meßvorgang [...] aufkommt.“[218]

Es ist nun diese von Bohr reklamierte Kohärenz des Formalismus, die eine unmittelbare experimentelle Widerlegung desselben schier aussichtslos erscheinen lässt, obwohl immer noch mit vernünftigen Argumenten behauptet werden kann, dass er, wenn schon nicht widerspruchsvoll, so doch zumindest unvollständig sein muss. Sowohl die Thesen

---

[217] Bohr (1935) in Baumann/Sexl (1984), S. 93.
[218] Ebd., S. 88.

Einsteins als auch die Auffassungen Bohrs widersprechen sich nur hinsichtlich der philosophischen Frage nach dem eigentlichen Wesen der Realität und des Verhältnisses des erkennenden bzw. experimentierenden Subjektes und seiner physikalischen Theorien zu eben dieser Wirklichkeit. Bohr kann Einstein nicht unmittelbar nachweisen, dass sein Glaube an die Existenz verborgener Parameter, die in der Quantenmechanik schlechterdings keine Berücksichtigung finden, aus logischen Gründen unhaltbar ist, zumal diese Konsequenz scheinbar aus der Theorie selbst deduziert werden kann, wenn man, wie bereits erläutert, die externe Annahme der Lokalität physikalischer Wirkungen mit hinzunimmt. Umgekehrt hat Einstein keine Möglichkeit, der Quantentheorie innere Widerspüche nachzuweisen, und es besteht scheinbar noch nicht einmal die Möglichkeit, die verborgenen Parameter in irgendeiner denkbaren Weise sichtbar zu machen bzw. unmittelbar zu messen.

Schon Werner Heisenberg hatte, wie oben bereits erwähnt, in einem frühen Aufsatz darauf aufmerksam gemacht, dass eine Ergänzung der Quantenmechanik um diejenigen konjugierten Größen eines Parameters, dessen genauer Wert durch eine Messung bestimmt worden ist, mit der Mathematik der Theorie in Konflikt geraten würde: „Gäbe es Experimente, die gleichzeitig eine ´schärfere´ Bestimmung von p und q ermöglichten, als es der Gleichung (1) [der Unbestimmtheitsrelation] entspricht, so wäre die Quantenmechanik unmöglich.“[219] Auch andere, wie z.B. der Mathematiker John von Neumann, haben explizit darauf hingewiesen, dass den Gleichungen der Theorie keine zusätzlichen Informationen hinzugefügt werden können, ohne dass das gesamte System vollkommen inkonsistent und logisch widerspruchsvoll zu werden droht.[220] Doch direkt widerlegen, und das ist der Kern des sogenannten EPR-Paradoxons, ließen sich damit die Spekulationen um eventuell trotzdem vorhandene verborgene Parameter letztlich nicht. Über eine Zeit von fast 30 Jahren nach Veröffentlichung des Aufsatzes von Einstein, Podolsky und Rosen war es den Physikern weder möglich, das dort vorgetragene Argument eindeutig zu entkräften, noch wollte es gelingen, die verborgenen „Elemente der Realität“, deren Vorhandensein von Einstein indirekt erschlossen worden war, tatsächlich aufzufinden, d.h. empirisch messbare Effekte zu generieren, die nur unter der Annahme der Existenz zusätzlicher Informationen in den physikalischen Systemen erklärt werden können, die im Formalismus der Quantenmechanik keine Berücksichtigung finden. Die

[219] Heisenberg (1927) in Baumann/Sexl (1984), S. 60f.
[220] Vgl. von Neumann (1996) [Original 1932], Kap. IV, S. 170ff.

Protagonisten der ursprünglichen Debatte, Albert Einstein und Niels Bohr, blieben sich bis zu ihrem Tode freundschaftlich verbunden, waren aber nicht bereit, in der Sachfrage um die Vollständigkeit bzw. Unvollständigkeit der Quantentheorie von ihrer jeweiligen Position abzurücken. Einstein bringt seinen nach wie vor unveränderten Standpunkt noch im Jahr 1949 zum Ausdruck, anlässlich der Abfassung seiner intellektuellen Autobiographie: „Die Physik ist eine Bemühung das Seiende als etwas begrifflich zu erfassen, was unabhängig vom Wahrgenommen-Werden gedacht wird. In diesem Sinne spricht man vom ´Physikalisch-Realen´.“[221] Und bezogen auf das Argument aus dem Jahr 1935 wiederholt er erneut seine damalige Auffassung: „[…] an *einer* Annahme sollten wir nach meiner Ansicht unbedingt festhalten: Der reale Sachverhalt (Zustand) des Systems S_2 ist unabhängig davon, was mit dem von ihm räumlich getrennten System S_1 vorgenommen wird.“[222]

Von dieser Auseinandersetzung um die Frage nach der physikalischen Realität mehr oder weniger unbeeindruckt, entwickelte sich die Quantenmechanik beständig weiter, ohne dass es einer Revision ihrer Grundlagen bedurft hätte. Es gelang im Gegenteil, immer mehr Phänomenbereiche, und dabei vor allem die Atomkerne, quantentheoretisch zu modellieren und zu verstehen. Was zunächst nur im Kreise der Physiker für Aufsehen sorgte, drang spätestens mit dem tragischen Abwurf der ersten Atombombe in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung: Die Quantentheorie „funktionierte“, und sie versorgte die Menschheit zum ersten Mal in der Geschichte der Naturforschung mit dem nötigen Wissen, binnen kürzester Frist die ganze Welt in Schutt und Asche zu legen. Der militärischen Anwendung folgte die friedliche zivile Nutzung, und kaum ein mikroelektronisches Gerät des heutigen Alltags profitierte nicht direkt oder indirekt von den Erfolgen der Quantenmechanik. Die ursprüngliche Debatte um ontologische und erkenntnistheoretische Fragen geriet angesichts dieser Fortschritte zur Nebensache. Die meisten Forscher interessierten sich nicht für diese Probleme und waren erst recht nicht bereit, sich die Köpfe über eventuell verborgene Elemente der Realität zu zerbrechen, die, und die weitere Entwicklung und Anwendung der Theorie schien dies aufs Neue zu bestätigen, letztlich keinerlei empirische Konsequenzen nach sich ziehen. Vor dem Hintergrund dieser frappierenden Leistungsfähigkeit stellte sich bei vielen eine mehr oder

---

[221] Einstein in Schilpp (1970), S. 80.
[222] Einstein, a.a.O., S. 84. Kursive Hervorhebung im Original.

weniger instrumentalistische Grundhaltung ein, die der Physiker Nick Herbert in seiner Monographie über das Realitätsproblem in der Quantenmechanik in etwas salopper Diktion auf den Punkt bringt: "Some attempted to see beneath the symbols to a deeper reality, but most physicists used quantum theory like a pack of teenagers with a powerful new car, driving it recklessly at top speed till something falls apart. But quantum theory is a tough machine; wherever we want to steer it, this theory takes us there."[223]

Wurde dennoch eine philosophische Interpretation gebraucht, so bediente man sich meist freimütig der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik, mit der eine ganze Generation junger Physiker bereits in ihrem Studium vertraut gemacht wurde. Viele erblickten in den Auffassungen Bohrs und Heisenbergs fälschlicherweise die Legitimation für die Abkehr von philosophischen Spekulationen um das eigentliche Wesen der Wirklichkeit und die erkenntnistheoretische Frage nach dem Verhältnis von Subjekt und Objekt, dessen Brisanz sich bis heute in dem mangelnden Verständnis desjenigen Vorgangs dokumentiert, der den Übergang vom Möglichen zum Wirklichen bzw. den ominösen Kollaps der Wellenfunktion letztlich zuwege bringt. Auf diese Schwierigkeit wird später noch einzugehen sein. Neben der enormen Leistungsfähigkeit war es aber auch die mathematische Gestalt der Quantenmechanik, ihre Eleganz und innere Widerspruchsfreiheit, die viele zu der Überzeugung brachte, dass sie eine wahrhaft fundamentale Theorie sein müsse, vielleicht noch grundlegender als die Relativitätstheorie Einsteins, die prekärerweise mit bestimmten Aussagen der Quantentheorie in unmittelbaren Konflikt gerät.[224]

Niels Bohr und Albert Einstein sollten es nicht mehr erleben, dass ihre ursprüngliche Auseinandersetzung um die Vollständigkeit der Quantentheorie nochmals eine völlig unerwartete Wendung nehmen würde. Es schien bis zur Mitte der 60er Jahre des 20. Jahrhunderts keinerlei Möglichkeit zu geben, ihren Streit mittels empirischer Messungen

---

[223] Herbert (1987), S. 44.

[224] Heisenberg beschreibt diesen Sachverhalt in einer Vorlesung aus dem Wintersemester 1956/57: „Die Struktur von Raum und Zeit, die in der Speziellen Relativitätstheorie ausgedrückt wird, [erzeugt] eine völlig scharfe Grenze zwischen dem Gebiet der Gleichzeitigkeit, in dem keine Wirkung übertragen werden kann, und den anderen Gebieten, in denen eine unmittelbare Wirkung von einem Vorgang zu einem anderen stattfinden kann.
Andererseits setzen die Unbestimmtheitsrelationen der Quantentheorie eine feste Grenze für die Genauigkeit, mit der man Lagen und Bewegungsgrößen oder Zeit und Energie gleichzeitig messen kann. Da eine völlig scharfe Grenze eine unendliche Genauigkeit hinsichtlich der Lage in Raum und Zeit bedeutet, so müssen die zugehörigen Bewegungsgrößen und Energien vollständig unbestimmt sein, d.h. es müssen sogar beliebig hohe Bewegungsgrößen und Energien mit einer weit überwiegenden Wahrscheinlichkeit vorkommen. Daher scheint jede Theorie, die die Forderungen der Speziellen Relativitätstheorie und der Quantentheorie gleichzeitig erfüllen will, zu mathematischen Widersprüchen zu führen, nämlich zu Divergenzen im Gebiet sehr hoher Energien und Bewegungsgrößen." Vgl. Heisenberg (1990), S. 153.

zu entscheiden, d.h. im Experiment zu zeigen, ob die physikalischen Attribute unbeobachteter Teilchen tatsächlich *unbestimmt* bzw. *inexistent* sind, wie nach den Kopenhagener Deutung behauptet, oder vielmehr nur *unbekannt*, aber an und für sich genau festgelegt, worauf Einstein immer wieder insistiert hatte. Und es galt bis zu dieser Zeit als ebenso aussichtslos, die Angemessenheit des Lokalitätspostulates für die Diskussion verschränkter quantenmechanischer Systeme experimentell zu beurteilen, d.h. festzustellen, ob die fixierende Messung eines Parameters an einem der Teile des verschränkten Systems instantan und unvermittelt den jeweils anderen Teil beeinflussen kann oder nicht.

6.2.1 Das Bellsche Theorem

Im Jahr 1964 sollte sich diese Situation grundlegend verändern. Der irische Physiker John Bell beschäftigte sich erneut mit dem letztlich immer noch unverstandenen EPR-Paradoxon und machte fast 30 Jahre nach seiner Publikation eine bahnbrechende Entdeckung, mit der eigentlich keiner mehr gerechnet hatte. Bell war von der ursprünglichen Argumentation Einsteins fasziniert und teilte intuitiv dessen Ansicht, dass die Quantenmechanik zwar eine widerspruchsfreie Beschreibung der Phänomene sein mag, dass sie aber aus wohlüberlegten Gründen nicht vollständig sein kann und bestimmte objektiv vorhandene Elemente der physikalischen Wirklichkeit nicht adäquat berücksichtigt. Anhand einer leicht modifizierten Version des EPR-Gedankenexperiments konnte Bell nun überraschenderweise zeigen, dass diese beiden Postulate ihr Dasein nicht, wie bisher angenommen, in logischer Unabhängigkeit voneinander fristen, sondern dass vielmehr, unter der Annahme der Korrektheit des quantenmechanischen Kalküls, eine dem Lokalitätsprinzip verpflichtete Konzeption der physikalischen Realität schlechterdings ausgeschlossen ist. Entgegen seiner ursprünglichen Intention, weitere Argumente zugunsten der Position Einsteins beizubringen, schien sich jetzt geradezu das Gegenteil abzuzeichen: Wenn die Prognosen der Quantentheorie für einen bestimmten, im Prinzip auch praktisch realisierbaren experimentellen Aufbau richtig sind, dann sind diese Resultate, so die erstaunliche Schlussfolgerung Bells, mit keiner Realitätsauffassung zu vereinbaren, die die von Einstein geforderten Kriterien erfüllt. Oder anders ausgedrückt: In der physikalischen Wirklichkeit muss es nicht-lokale Beeinflussungen geben, oder die Quantenmechanik macht an einer entscheidenden Stelle signifikant falsche Vorhersagen. In einem Brief an Nick Herbert schildert er seine Entdeckung mit folgenden Worten:

„I had for long been fascinated by EPR. Was there a paradox or not? I was deeply impressed by Einstein´s reservations about quantum mechanics and his views of it as an incomplete theory. For several reasons the time was ripe for me to tackle the problem head on. The result was the reverse of what I had hoped. But I was delighted – in a region of wooliness and obscurity to have come upon something hard and clear."[225]

John Bell betrachtete, wie bereits angedeutet, in seinen Berechnungen nicht das ursprünglich von Einstein, Podolsky und Rosen vorgeschlagene Experiment, sondern eine

[225] Zitiert nach Herbert (1987), S. 212.

leicht veränderte Version desselben, bei dem sich nach wie vor zwei Teile eines quantenmechanisch verschränkten Systems in entgegengesetzte Richtungen bewegen und in beliebiger Entfernung voneinander jeweils einer lokalen Messung unterzogen werden können. Das dabei infrage stehende Attribut war dabei nicht die Orts- bzw. Impulskomponente eines Teilchens, sondern eine Eigenschaft, die sich in gewisser Hinsicht ähnlich verhält wie ein klassischer Drehimpuls und daher den Namen „Spin“ erhalten hatte. Anhand dieses Attributes ließe sich an einem geeigneten verschränkten System im Prinzip empirisch ermitteln, ob die Messergebnisse dem von Einstein favorisierten Modell der Wirklichkeit genügen oder nicht. Aufgrund der leichteren experimentellen Durchführbarkeit wurden die entsprechenden Versuche jedoch nicht mit Elementarteilchen wie z.B. Elektronen angestellt, deren Spin-Attribut gemessen werden sollte, sondern mit Lichtquanten und deren Merkmal der „Polarisation“. An der Aussagekraft der Verfahrens änderte sich dadurch nichts, lediglich die Berechnungen der einerseins quantenmechanisch und andererseits klassisch zu erwartenden Verteilungen der Messergebnisse mussten der jeweiligen Situation angepasst werden. Bevor auf die Details der Berechnungen und der daraufhin durchgeführten Experimente eingegangen werden kann, ist es erforderlich, zunächst den aus der traditionellen Wellentheorie des Lichts stammenden Begriff der Polarisation zu erläutern.

6.2.2 Klassische und quantenmechanische Polarisation

Nach der Maxwellschen Elektrodynamik ist Licht eine sogenannte Transversalwelle, d.h. eine periodische Oszillation in der Stärke zweier orthogonal zueinander und orthogonal zur Ausbreitungsrichtung der Welle stehender Felder, eines elektrischen und eines magnetischen, welche gegeneinander um 180 Grad phasenverschoben sind. Zur mathematischen Modellierung eines solchen Gebildes kann man sich beispielsweise des elektrischen Feldvektors bedienen, d.h. eines „Pfeiles“, welcher an jeder Stelle des von der Welle okkupierten Raumes die Stärke und Richtung des dortigen elektrischen Feldes angibt; die magnetische Komponente ist dann mit dieser Angabe ebenfalls fixiert.

Ist nun vorausgesetzt, dass dieser elektrische Vektor immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle steht, so sind aus geometrischen Gründen trotzdem noch beliebige Winkel zwischen diesem und der Ebene eines frei gewählten Bezugssystems möglich. Beispielsweise kann der elektrische Feldvektor eines parallel zu Erde verlaufenden kohärenten Lichtstrahls (z.B. eines Laserstrahls) senkrecht zur Ebene des irdischen Bezugssystems stehen; man spricht dann von einer – relativ zu diesem – „vertikal polarisierten“ Welle. Ist er etwa parallel dazu angeordnet, handelt es sich um einen horizontal polarisierten Lichtstrahl, wobei die Begriffe „vertikal“ und „horizontal“ natürlich vom jeweiligen Bezugsrahmen abhängen. Existiert irgendeine beliebige, aber dennoch stabile räumliche Richtung des elektrischen Feldes, so spricht man generell von polarisiertem Licht. Natürliche Strahlung wie z.B. das Sonnenlicht ist in der Regel nicht polarisiert. Dieses besteht aus einer Mischung vieler unterschiedlicher Wellen und Wellenlängen mit jeweils eigenen Polarisationsrichtungen.

Bestimmte durchsichtige Materialien besitzen eine sogenannte „optische Achse“ und haben die Eigenschaft, nur dasjenige Licht hindurchzulassen, dessen Polarisationsrichtung mit dieser Achse zusammenfällt; sie fungieren gewissermaßen als Filterelement. Trifft unpolarisiertes Licht auf ein solches Material, so kann nur die parallel zur optischen Achse liegende Komponente des elektrischen Feldvektors passieren. Das Resultat ist eine vollkommen polarisierte Welle, die nur noch die Hälfte der Intensität des ursprünglichen Lichts hat. Ein zweiter Filter, der in den Strahlengang des auf diese Weise polarisierten Lichts gesetzt wird, lässt dieses ungehindert passieren, sofern seine optische Achse parallel zu derjenigen des ersten Filters liegt. Wird dieses zweite Element jedoch langsam verdreht,

so nimmt die Menge des insgesamt durchgelassenen Lichts langsam ab und erreicht bei einer Winkeldifferenz von 90 Grad den Wert Null. Zwei senkrecht aufeinander stehende Polarisatoren lassen verständlicherweise gar kein Licht mehr passieren, denn der zweite Filter lässt nur dasjenige Licht durch, welches vom ersten Filter bereits vollständig abgeblockt wurde.

Wie wird nun diese Eigenschaft des Lichts, eine bestimmte Polarisation annehmen zu können, im Rahmen der Quantenmechanik behandelt, d.h. wie manifestiert sich dieses wellen-spezifische Attribut an den einzelnen Lichtquanten? Sind auch diese polarisiert und welchen Sinn hat in diesem Fall die Rede von einer solchen Eigenschaft? Bekanntlich existieren Lichtquanten immer nur als ganze Energiepakete und treten nur vollständig oder eben gar nicht mit anderer Materie in Wechselwirkung. Gesetzt den Fall, ein einzelnes Quant hätte eine Polarisation und diese wäre z.B. relativ zum Laborsystem „horizontal“: Dass dieses einen horizontalen Filter ungehindert passieren würde, ist unmittelbar einsichtig; ebenso naheliegend ist die Annahme, dass ein vertikaler Filter für dieses Teilchen unüberwindlich wäre. – Aber was geschieht, so könnte man berechtigterweise fragen, mit diesem Lichtquant, wenn es z.B. auf einen diagonalen, d.h. einen um 45 Grad geneigten Filter trifft? Wird es in zwei kleinere Teile aufgespalten, von denen nur ein vollkommen horizontal polarisierter passieren kann?

Die Quantenmechanik gibt auf diese Fragen eine verblüffende Antwort: Aus dem Winkel zwischen der Polarisationsrichtung des Lichtquants und der optischen Achse des Filters lässt sich ein Maß für die Wahrscheinlichkeit gewinnen, dass dieses den Filter ungehindert passieren kann. Ob z.B. ein konkret vorliegendes horizontales Quant einen diagonalen Filter tatsächlich überwinden wird oder nicht, kann nicht vorhergesagt werden. Lediglich die Wahrscheinlichkeit für diesen Prozess ist aus der zugeordneten Ψ-Funktion zu erhalten. Erwartungsgemäß hat ein horizontal polarisiertes Lichtquant nun eine Wahrscheinlichkeit von 50%, den um 45 Grad geneigten Filter zu passieren. Ist dieses geschehen, so ist seine neue Polarisationsrichtung eindeutig „diagonal“. Für einen vertikalen, d.h. einen um 90 Grad geneigten Filter ist die Wahrscheinlichkeit für den Durchtritt eines horizontalen Quants theoretisch Null. Mit einer Messung der Polarisation in einer Richtung ist automatisch der Zustand in der im rechten Winkel dazu stehenden Lage fixiert. Ein Quant, das horizontal polarisiert ist, d.h. welches einen horizontalen Filter passiert hat, wird niemals den vertikalen Filter überwinden können. Horizontal polarisiert zu sein bedeutet

also mit Sicherheit, *nicht* vertikal polarisiert zu sein und umgekehrt. Im Gegensatz zu anderen quantenmechanischen Variablen wie z.B. Ort oder Impuls ist Polarisation ein lediglich zweiwertiges Attribut. Auf die Frage nach der Polarisation in einer gewählten Richtung gibt es nur zwei Antworten: „Ja“ oder „Nein“. Die im rechten Winkel dazu stehende Lage ist damit ebenfalls fixiert: „Nein“ oder „Ja“.

Mit diesem Vorwissen ist es nun auch möglich, ein interessantes Experiment zu erklären, welches unter dem Begriff „Polarisator-Paradox“ bekannt ist. Wird, wie oben bereits beschrieben, ein unpolarisierter Lichtstrahl nacheinander durch einen horizontalen und einen vertikalen Filter geschickt, so kommt aus dieser Anordnung kein Licht mehr heraus. Kurioserweise lässt sich dies ändern, indem man zwischen die beiden Filter einen dritten einschiebt, der z.B. diagonal ausgerichtet ist. Plötzlich kann wieder ein Teil des Lichts den gesamten Aufbau passieren, was in der Tat paradox anmutet. Es ist so, als würden zwei in ihrer Kombination unüberwindliche Zäune eines Raubtiergeheges durch das Einschieben einer dritten Barriere teilweise wieder durchlässig.

Die quantenmechanische Analyse dieses Falles ergibt nun für einen Lichtstrahl, der aus Lichtquanten mit jeweils unterschiedlichen Polarisationsrichtungen besteht, dass davon die Hälfte den ersten Filter passieren kann und danach horizontal ausgerichtet ist. Den diagonalen Filter können wiederum die Hälfte der horizontalen und den vertikalen die Hälfte der diagonalen Quanten passieren, so dass insgesamt ein Achtel der Intensität des unpolarisierten Lichts die Anordnung dreier Filter durchdringen kann.

Hier wurde nun in klassischer Manier einfach unterstellt, dass ein unpolarisierter Strahl Quanten enthält, deren Polarisationsrichtungen gleichmäßig über alle möglichen Lagen verteilt sind, die man aber im Einzelfall nicht kennt. Dies würde dazu ausreichen, um zu erklären, dass im Falle eines extrem abgeschwächten Lichtstrahls dessen Quanten, die ja nur noch vereinzelt vorkommen, einen beliebig ausgerichteten Polarisationsfilter mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% passieren können. Eine genauere Analyse des Verhaltens definitiv polarisierter Lichtquanten, d.h. derjenigen, die einen vorgegebenen Filter bereits passiert haben, lässt an dieser Deutung jedoch gewisse Zweifel aufkommen.

Man nehme z.B. an, dass eine Messung in einer beliebigen Richtung, z.B. der vertikalen, tatsächlich vorgenommen wurde. Lichtquanten, die diese Apparatur passiert haben, sind also eindeutig vertikal polarisiert. Man kann sich sogar dessen vergewissern, indem man weitere vertikale Filter zur Anwendung bringt: Alle Quanten werden auch diese

ungehindert überwinden. Was geschieht nun, wenn man diese eindeutig vertikalen Teilchen auf einen diagonalen, d.h. im Winkel von 45 Grad angeordneten Filter fallen lässt? Da alle im gleichen Zustand sind (vertikal polarisiert), so müssten nun alle das gleiche Verhalten zeigen, d.h. entweder *alle* passieren oder *alle* abgeblockt werden. Dies ist jedoch seltsamerweise nicht der Fall. Lediglich die Hälfte der Quanten wird diesen diagonalen Filter überwinden können, doch welches Verhalten ein solches Teilchen im *Einzelfall* an den Tag legt, ist vollkommen unvorhersehbar. Es existiert zu jeder beliebigen Polarisationsrichtung, die die Lichtquanten im Zuge eines Experiments scheinbar eindeutig angenommen haben, eine jeweils konjugierte Richtung, die um 45 Grad zur ursprünglichen geneigt ist und deren Polarisation vollkommen unbestimmt wird, wobei „vollkommen unbestimmt“ in bezug auf ein zweiwertiges Attribut bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, den zweiten Filter zu passieren, genau 50% beträgt. Ob dieser tatsächlich überwunden wird oder nicht, lässt sich im Einzelfall nicht vorhersagen. Wenn man nun annimmt, dass der zweite Filter seinerseits passiert wurde und das Quant jetzt eindeutig im Zustand der diagonalen Polarisation ist, hat man wiederum sämliche Information über den ursprünglichen vertikalen Zustand verloren. Nun ist *dieser* vollkommen unbestimmt geworden und eine entsprechende Messung würde nur noch mit 50% Wahrscheinlichkeit eine vertikale Polarisation feststellen.

Auch für die messbare Größe der Polarisation existiert somit eine eigene Variante der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation, die dafür verantwortlich ist, dass die exakte Kenntnis der Polarisation in einer gewählten Richtung zu einer völligen Unkenntnis dieses Attributes in bezug auf eine um 45 Grad geneigte Lage führt. Eindeutig „horizontal“ zu sein, würde im Kontext der klassischen Mechanik bedeuten, dass auch über alle anderen Lagen eine definitive Aussage möglich ist. Dies scheint aber hinsichtlich der Polarisations-Eigenschaft schlechterdings unzulässig zu sein. Es ist mit anderen Worten schwer vorstellbar, wie ein anschauliches Bild von jenem horizontal festgelegten und gleichfalls diagonal vollkommen unbestimmten Zustand aussehen könnte.

Im Falle eines unpolarisierten Lichtstrahles ist die Situation ähnlich. Statt davon zu sprechen, dass diese Teilchen jeweils eine bestimmte Ausrichtung *haben*, die man bis zu einer Messung nicht *kennt*, kann man in Analogie zu anderen Variablen der Quantenmechanik behaupten, dass jedes einzelne Quant eines unpolarisierten Strahls im ungemessenen Zustand gar keine festgelegte Richtung hat. Jedenfalls enthält die

quantenmechanische Beschreibung eines unpolarisierten Strahls keine Information darüber, welches Lichtquant in welcher Richtung polarisiert ist. Nach dieser Modellierung sind alle Teilchen im gleichen quantenmechanischen Zustand, und demnach ist nicht nur der Strahl unpolarisiert, sondern jedes einzelne seiner Konstituenten.

Dennoch kann auch hier, wie bereits im Falle von Orts- und Impulsmessungen geschehen, die These vertreten werden, dass die Unbestimmtheitsrelation lediglich ein Effekt der im Zuge eines Messaktes unvermeidlich in das System eingebrachten Störung ist. An und für sich, d.h. im ungestörten Zustand, hat doch sicherlich jedes einzelne Lichtquant eine scharf definierte Polarisationsrichtung, und da diese im Formalismus nicht abgebildet wird, ist dies wiederum ein Zeichen seiner Unvollständigkeit. Die „alte“ Debatte zwischen Bohr und Einstein bezüglich der Realität quantenmechanischer Attribute lässt sich somit auch auf die Frage nach „inexistenter“ versus „objektiv vorhandener, aber lediglich unbekannter“ Polarisation übertragen, und an dieser Stelle ermöglicht die Entdeckung John Bells, empirisch zu entscheiden, welche der gegensätzlichen Auffassungen angemessener ist.

6.2.3 Die optische Version des EPR-Experiments

Die optische Version des EPR-Experiments bedient sich des Umstandes, dass bestimmte Atome beim Übergang von einem angeregten Niveau in den jeweiligen Grundzustand nicht nur einzelne Lichtquanten emittieren, sondern Paare solcher Teilchen, die über ihren gemeinsamen Entstehungsprozess quantenmechanisch miteinander verschränkt sind. Beispielsweise lassen sich durch Bestrahlung mit kurzen Laserpulsen Quecksilber- oder Kalziumatome dergestalt anregen, dass sie die aufgenommene Energie mittels zweier in entgegengesetze Richtungen ausgesandter Quanten wieder abgeben.[226] Es ist nun das Attribut der Polarisation, welches dabei von besonderem Interesse ist. Messungen dieser Eigenschaft an jedem der ausgesandten Lichtteilchen ergeben, dass diese vollkommen unpolarisiert sind, was sich wie oben ausgeführt, darin zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit, in einer frei gewählten Richtung polarisiert zu sein, immer 50% beträgt. Nur jeweils die Hälfte der gemessenen Quanten passiert einen entsprechenden Filter, unabhängig davon, in welcher Lage dieser angeordnet wurde. Da die beiden Komponenten des Systems über eine ihnen gemeinsame Ψ-Funktion miteinander verschränkt sind, ist es jedoch möglich, von der Messung der Polarisation an einem der Teile auf diejenige des jeweils anderen zu schließen: Sie muss stets dieselbe sein. Wenn ein Lichtquant auf der einen Seite des Labors einen horizontalen Filter ungehindert passiert, so muss das entsprechende Partnerteilchen, welches in die entgegengesetzte Richtung emittiert wurde, bei einer entsprechenden horizontalen Messung ebenfalls den Filter überwinden. Analoges gilt für negative Resultate: Wird eines der Quanten vom horizontalen Filter absorbiert und ist demnach sicher vertikal polarisiert, so trifft dies auch für das andere Lichtquant auf der gegenüberliegenden Seite des Labors zu. Beide haben demnach immer dieselbe Polarisation, obwohl die Richtung derselben natürlich zufällig und unvorhersehbar ist. Doch *haben* sie diese Polarisationsrichtung schon, *bevor* sie gemessen werden, oder legt erst eine Messung am einen Teil diejenige des jeweils anderen instantan fest? Vernünftigerweise sollte man erwarten, dass sie unabhängig von einem Messakt bereits eine bestimmte Ausrichtung haben, denn wie sonst könnte man diese starke Korrelation

[226] Die Emission von Paaren verschränkter Lichtquanten ist keinesfalls exotisch, sondern eher der Normalfall der Lichtemission von angeregten Gasen. Man findet diese Vorgänge in jeder Straßenlaterne.

der Attribute erklären, die sich ja vollkommen unabhängig vom räumlichen Abstand der Quanten immer wieder bestätigen lässt?
Man sieht sofort ein, dass dieser Fall ähnlich gelagert ist wie das ursprüngliche EPR-Gedankenexperiment. Es existieren hier ähnliche Konditionalbeziehungen, und die daraus sich ergebenden Schlussfolgerungen erinnern an die Argumente Einsteins. Diese Überlegungen lassen sich in aller Kürze wie folgt auf den Punkt bringen:

1.) Jedes der beiden Quanten des verschränkten Systems ist unpolarisiert, d.h. für jede mögliche Ausrichtung eines Filters ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieser passiert wird, gleich groß. In einer Serie von Versuchen lässt sich erweisen, dass zu jeder beliebig vorgegebenen Richtung 50% der Quanten den Filter passieren und 50% von diesem absorbiert werden.

2.) *Wenn* ein Lichtquant in einer frei gewählten Richtung polarisiert (oder nicht-polarisiert) ist, *dann* gilt dies mit Sicherheit auch für das jeweils andere Teilchen – vollkommen unabhängig von der Größe ihres Abstandes.

3.) Das Verhalten eines Teiles beim Erreichen eines Polarisations-Messgerätes kann nur von den lokalen Gegebenheiten an diesem Ort abhängen und nicht von einer anderen, unter Umständen weit entfernten Messung. Bestenfalls könnte ein bisher nicht entdecktes „Signal“ die Information einer bereits erfolgten Messung am ersten Teil zum Ort des zweiten Teiles transportieren und dessen lokale Bedingungen entsprechend beeinflussen, doch dieser letzte Ausweg wäre bei einer gleichzeitigen Messung an beiden Teilen vollkommen ausgeschlossen.[227]

4.) Es folgt daraus notwendig, dass jedes Lichtquant eine verborgene Liste von möglichen Verhaltensweisen besitzt, die genau festlegen, wie auf eine beliebige Anordnung eines Filters zu reagieren ist. Jedes Quant *hat* demnach auch unabhängig von einer Messung eine genau festgelegte Polarisation oder eine ihm eigene, lokale Disposition, bei Gelegenheit einer Messung auf eine vorher feststehende Weise zu reagieren.

---

[227] Hier muss selbstverständlich der in der Speziellen Relativitätstheorie geprägte Begriff von Gleichzeitigkeit zur Anwendung kommen. Sind die beiden Messpunkte gleich weit vom Emissionsort der Lichtquanten entfernt, so erreichen diese die Messpunkte interessanterweise *per definitionem* gleichzeitig.

5.) Da die Quantenmechanik diese Informationen nicht enthält, ist sie notwendigerweise keine vollständige Beschreibung der physikalischen Realität.

Betrachtet man die bereits dargestellte Unbestimmtheitsrelation Heisenbergs in bezug auf das Attribut der Polarisation als gültig, so scheint diese mit der gefolgerten Unvollständigkeit der Quantenmechanik nicht im *unmittelbaren* Widerspruch zu stehen. Wenn man am ersten Teilchen z.B. die vertikale Polarisation misst und am zweiten die diagonale, so können diese lokalen Messungen aufgrund der vorhergehenden Erfahrungen mit dem System auf die jeweils anderen Komponenten übertragen werden und man hätte für beide Lichtquanten eine Antwort auf zwei Attribute, deren gleichzeitige exakte Kenntnis die Unbestimmtheitsbeziehung definitiv verbietet. Ob diese Übertragung allerdings zulässig war, ließe sich nach diesen Messungen nicht mehr entscheiden, denn jedes lokale Experiment könnte den Zustand des infrage stehenden Teilchens in genau der unvorhersehbaren Weise stören, die von der Unbestimmtheitsrelation vorhergesagt wird. Mit anderen Worten: Die Quantenmechanik könnte, obwohl nachgewiesenermaßen unvollständig, auch hier wieder eine adäquante Theorie der empirisch messbaren Phänomene sein.

Auf den ersten Blick scheint die Situation hier genauso verfahren zu sein wie bei dem ursprünglich von Einstein vorgeschlagenen Experiment. Dass dem nicht so ist, ist der Kern der Bellschen Entdeckung.

6.2.4 Eine Variante der Bellschen Ungleichung

John Bell beschäftigte sich ursprünglich mit einem System spin-korrelierter Elementarteilchen und konnte an diesem zeigen, dass die Vorhersagen der Quantenmechanik eine Beziehung verletzen, die man „Bellsche Ungleichung“ nennt. Dieser Beweis der Verletzung jener Ungleichung unter der Annahme der Korrektheit der Quantentheorie ist in der Physik unter dem Namen „Bellsches Theorem“ bekannt. Eine Variante dieser Ungleichung soll nun anhand des optischen EPR-Experiments erläutert werden.

Gegeben sei ein Versuchsaufbau, in dem durch wiederholte Anregung eines Kalzium-Atoms immer wieder Paare verschränkter Lichtteilchen erzeugt werden, die sich in entgegengesetzte Richtungen von ihrem Emissionsort entfernen und dabei eine beliebig große Strecke zurücklegen, bevor sie auf Messgeräte treffen, mit denen sich ihre Polarisation in frei wählbarer Richtung feststellen lässt. Darüber hinaus existiere ein Bezugssystem, relativ zu dem sich die Neigung der optischen Achse jedes der Polarisationsmessgeräte angeben lasse, so dass Begriffe wie „horizontal“ oder „vertikal“ bzw. Winkeldifferenzen zwischen beiden Detektoren eindeutig definiert werden können. Weiterhin habe man Zugriff auf die Messergebnisse der weit voneinander entfernten lokalen Beobachter, die für eine bestimmte Lage ihrer Messgeräte, die z.B. als Winkel zur Vertikalen angegeben sei, angeben, ob ein Teilchen den Polarisationsfilter passiert oder nicht (in Form einer „Ja“ bzw. „Nein“-Aussage).

Zunächst denke man sich beide Detektoren vertikal ausgerichtet. Wie zu erwarten, werden für ein Paar verschränkter Lichtquanten beide Messgeräte immer zum gleichen Ergebnis kommen. Entweder sind *beide* vertikal polarisiert, oder *beide* sind es nicht. Würde man eine Liste anlegen, die die Ergebnisse – in J(a)- oder N(ein)-Aussagen kodiert – beider lokaler Beobachter für eine Reihe verschränkter Quanten-Paare aufzeichnet, so erhielte man z.B. folgende Aufstellung:

1. Beobachter:	J	N	N	J	N	J	N	J	N	J	J	N	J	N	J	N	…
2. Beobachter:	J	N	N	J	N	J	N	J	N	J	J	N	J	N	J	N	…

Ähnlich nachvollziehbar wäre das Resultat, wenn eines der Messgeräte um 90 Grad gegen das andere verdreht würde. Überall dort, wo ein Lichtquant den vertikalen Polarisator am ersten Beobachtungspunkt passiert, würde der zweite Beobachter, dessen Filter horizontal ausgerichtet ist, hinter diesem *kein* Teilchen registrieren und umgekehrt. Eine Auflistung der Resultate sähe wie folgt aus:

1. Beobachter:	N	N	J	N	J	J	N	N	J	J	N	J	N	J	N	J	…
2. Beobachter:	J	J	N	J	N	N	J	J	N	N	J	N	J	N	J	N	…

Beide Reihen werden am vernünftigsten dadurch zu erklären sein, dass die Polarisation der Lichtquanten bereits feststeht, bevor sie an weit entfernten Orten und unabhängig voneinander gemessen wird. Ein klassisches System kann diese Reihen somit nicht nur problemlos reproduzieren, sondern ein solches scheint auch die naheliegendste Erklärung dieser Korrelationen zu sein. Niemand käme auf die abstruse Idee anzunehmen, dass beide Polarisationsmerkmale solange vollkommen unbestimmt sind, bis eine tatsächliche Messung durchgeführt wurde, auf deren Grundlage man erst anschließend den Zustand des ungemessenen Systems erschließen könnte:

„The philosopher in the street, who has not suffered a course in quantum mechanics, is quite unimpressed by Einstein-Podolsky-Rosen correlations. He can point to many examples of similar correlations in everyday life. The case of Bertlmann´s socks is often cited. Dr. Bertlmann likes to wear two socks of different colours. Which colour he will have on a given foot on a given day is quite unpredictable. But when you see […] that the first sock is pink you can be already sure that the second sock will not be pink. Observation of the first, and experience of Bertlmann, gives immediate information about the second. There is no accounting for tastes, but apart from that there is no mystery here. And is not the EPR business just the same?"[228]

Die beiden bisher skizzierten Beispiele betrachteten die Situation der gleichen Ausrichtung beider Messgeräte und den Fall, dass zwischen ihren optischen Achsen ein Winkel von 90 Grad eingeschlossen wird. Die erste Reihe (Winkeldifferenz 0 Grad) zeigt bezüglich der gemessenen Resultate vollkommene Übereinstimmung, und in der zweiten Liste (Winkeldifferenz 90 Grad) zeigt sich eine ausnahmslose Opposition.

[228] John Bell in Bell (1989), S. 139.

Nennt man ein nicht-übereinstimmendes Paar von Messergebnissen einen „Fehler“, so kann man ein Maß F für die relative Fehlerrate definieren, welches durch den Quotienten aus der Anzahl der Fehler und der Menge aller gemessenen Teilchenpaare gebildet wird. Bei gänzlicher Kongruenz beider Reihen nimmt somit F den Wert Null an (keine Fehler) und bei vollkommener Gegensätzlichkeit den Wert Eins (ausschließlich Fehler). Formuliert man F als Funktion des von den optischen Achsen der Messgeräte eingeschlossenen Winkels, so gilt demnach $F_{(0)}=0$ und $F_{(90)}=1$.

Man wird nun erwarten dürfen, dass ausgehend von der parallelen Anordnung eine langsame Vergrößerung der Winkeldifferenz zwischen beiden Messgeräten eine immer größere Fehlerrate zur Folge hat, bis schließlich bei orthogonaler Ausrichtung kein einziges Paar von Messwerten mehr übereinstimmt. Insbesondere wird ein charakteristischer Winkel ϕ existieren, unter dem die Fehlerrate so liegt, dass durchschnittlich in vier gemessenen Paaren ein einziges Paar nicht übereinstimmt. $F_{(\phi)}$ hätte dann den Wert ¼ oder 0,25.

Ausgestattet mit diesem Rüstzeug lässt sich nun eine Variante der sogenannten Bellschen Ungleichung unmittelbar einsichtig machen: Man nehme zunächst an, beide in großer Entfernung voneinander befindlichen lokalen Beobachter hätten ihre Messgeräte vertikal ausgerichtet. Die resultierende Reihe von Ergebnissen stimmt vollkommen überein; es gibt keine Fehler, und somit ist $F_{(0)}=0$. Nun dreht einer der beiden, man nenne ihn Beobacher A, seinen Polarisationsmesser um den Winkel ϕ. Jetzt beträgt die Fehlerrate Eins zu Vier oder $F_{(\phi)}=¼$. Beobachter A macht seine Aktion sofort wieder rückgängig, die Winkeldifferenz ist wieder Null und entsprechend $F_{(0)}=0$ (keine Fehler).

Nun vollführt Beobachter B (fast) das gleiche Manöver: Er dreht sein Messgerät um den Winkel ϕ, allerdings in die *entgegengesetzte* Richtung. Der Wert der Winkeldifferenz ist natürlich davon unabhängig, welcher der beiden Polarisatoren gedreht wird und in welche Richtung dies geschieht. Sie beträgt nun wieder ϕ und die Fehlerrate wiederum Eins zu Vier oder $F_{(\phi)}=¼$.

Die entscheidende Frage ist nun: Was geschieht, wenn beide Beobachter ihre Geräte jeweils um den Winkel ϕ verdrehen, und zwar in entgegengesetzte Richtungen, so dass die Winkeldifferenz insgesamt $2\cdot\phi$ beträgt? Wie hoch ist die Fehlerrate $F_{(2\phi)}$? Wenn alles „mit rechten Dingen“ zugeht, so würde man erwarten, dass $F_{(2\phi)}$ doppelt so groß ist wie $F_{(\phi)}$, d.h. $F_{(2\phi)} = ½$. Eine Differenz von ϕ ergibt einen Fehler pro vier Messungen, und eine

Differenz von $2 \cdot \phi$ müsste zwei Fehler pro vier Messungen ergeben. Genau genommen kann die Fehlerrate aber geringer sein als 2/4, denn es kann der Fall eintreten, dass beide Reihen gleichzeitig von dem Ergebnis abweichen, welches bei vertikaler Stellung zu erwarten gewesen wäre, so dass sich die beiden Fehler zu einem Nicht-Fehler „addieren". Auf keinen Fall jedoch können mehr Fehler auftreten als zwei in vier Messungen. Formal ausgedrückt muss also gelten: $F_{(2\phi)} \leq F_{(\phi)} + F_{(\phi)}$ oder: $F_{(2\phi)} \leq ½$.

Dies ist eine Form der Bellschen Ungleichung, und sie muss notwendigerweise für den Fall gelten, dass beide Lichtquanten des verschränkten Systems für jeden Winkel bereits im ungemessenen Zustand eine festgelegte Antwort darauf haben, ob sie einen entsprechend ausgerichteten Polarisationsfilter passieren würden oder nicht. Dass sie, sofern beide in einer beliebigen Richtung parallel ausgerichtet sind, absolut übereinstimmende Messergebnisse liefern, legt diese Vermutung zwingend nahe. Des weiteren wird natürlich das Lokalitätspostulat Einsteins unterstellt, denn beide Messgeräte könnten in astronomischer Entfernung positioniert sein, so dass eine klassische Kommunikation, die nach der Relativitätstheorie maximal mit Lichtgeschwindigkeit vonstatten gehen kann, definitv ausgeschlossen ist. Genau genommen kann sogar mit einer gleichzeitgen Messung beider Quanten jede beliebige endliche Geschwindigkeit für einen Informationsaustausch zwischen den Messpunkten ausgeschlossen werden. Da beide Lichtteilchen sich selbst mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, sind sie ein perfektes Synchronisationssignal für den Fall, dass beide Messpunkte gleich weit vom Emissionsort des Paares entfernt liegen. Man kann die Messungen somit (zumindest theoretisch) bis zum Punkt der absoluten Gleichzeitigkeit verlegen, so dass eine eventuell stattfindende, raumzeitlich aufgefasste Informationsübertragung jeden denkbaren Betrag an Geschwindigkeit überschreiten müsste, um die lokalen Ergebnisse auf irgendeine subtile Art beeinflussen zu können.[229]

Was sagt nun die quantenmechanische Berechnung über die optische Variante des EPR-Experiments? Wird die soeben diskutierte Ungleichung verletzt oder nicht? – Das sogenannte Bellsche Theorem kommt eindeutig zu dem Resultat, dass dies der Fall ist: Wenn die Quantentheorie richtige Prognosen bezüglich der Messungen an jenem verschränkten System macht, dann genügen die Korrelationen dieser Resultate nicht mehr

[229] Diese Argumentation hängt natürlich davon ab, dass alle Punkte, die von zwei gleichzeitig ausgesandten Lichtstrahlen (im Vakuum) gerade erreicht werden, als „gleichzeitig" *definiert* sind und dass qua Konstanz der (Vakuum-) Lichtgeschwindigkeit diese jeweiligen Abstände vom Emissionsort notwendigerweise alle gleich groß sein müssen. Dies soll hier nicht weiter problematisiert werden, da hierzu Details der Speziellen Relativitätstheorie herangezogen werden müssten.

derjenigen Ungleichung, die die Grundlage des Einsteinschen Realitätsverständnisses zum Ausdruck bringt. Und diese Auffassung von Realität ist in bezug auf das Lokalitätspostulat nichts anderes als eine begrifflich präzisierte Version der alltäglichen Vorstellung von objektiver Wirklichkeit.

Im diskutierten Beispiel ist die Prognose der Quantenmechanik für die relative Fehlerrate durch den Ausdruck $F_{(\phi)} = 1\text{-}\cos^2(\phi)$ gegeben. Für einen Winkel von 30 Grad errechnet man somit einen Wert von $F_{(30)} = ¼$ und für den doppelten Winkel $F_{(60)} = ¾$, oder eine relative Fehlerrate von 3 pro 4 Messungen! Dies ist deutlich mehr als die maximal zu erwartenden 2 Fehler in 4 Paaren und verletzt die obige Ungleichung deutlich.

Mit dieser Entdeckung Bells war die Möglichkeit eröffnet, die Quantenmechanik einem erneuten empirischen Test zu unterziehen. Und das weniger hinsichtlich ihres Vermögens, Messergebnisse korrekt vorherzusagen, sondern vielmehr unter dem Gesichtspunkt der Frage, welche Art von physikalischer Realität jenen Phänomenen zugrundeliegen kann und welche nicht. Es war mit anderen Worten möglich, dem bisher empirisch unentscheidbaren Gegensatz der ontologischen Positionen Albert Einsteins und Niels Bohrs mit experimentellen Mitteln zu Leibe zu rücken.

6.2.5 Die Verletzung der Bellschen Ungleichung im Experiment

Mittlerweile existieren eine ganze Reihe von experimentellen Untersuchungen, in welchen die Frage beleuchtet wird, ob quantenmechanische Systeme tatsächlich die Bellsche Ungleichung bzw. leicht modifizierte Varianten derselben verletzen oder nicht. Eine Auflistung der wichtigsten Studien findet man in einem Aufsatz von Bernard d´Espagnat zum Problem der Realität in der Quantentheorie.[230] Einem mittlerweile geläufigen Sprachgebrauch folgend, nennt man Korrelationen, die auf der Basis eines klassischen bzw. alltäglichen Realitätsmodells erklärt werden können (z.B. der von Bell zititerte Fall von Dr. Bertlmanns Socken), *schwache*, und diejenigen, welche Bells Ungleichung verletzen, *starke* Korrelationen.

Die ersten Experimente, die testen sollten, ob es in der Natur starke Korrelationen gibt, stammen von Stuart Freedman und John Clauser und wurden bereits 1972 an der *University of California* in Berkeley durchgeführt. Freedman und Clauser analysierten verschränkte Lichtquanten, die von angeregten Kalzium-Atomen ausgesandt wurden und die in einiger Entfernung vom Emissionsort auf Polarisationsfilter und jeweils dahinter angeordnete Detektoren auftrafen. Die Arbeit mit einzelnen Lichtquanten hat zur Folge, dass sowohl hinsichtlich der Polarisationsfilter als auch der Detektoren gewisse Unwägbarkeiten in Kauf genommen werden müssen, die die Ergebnisse des Experiments negativ beeinflussen können. Durch sorgfältige Testläufe der jeweils isolierten Komponenten und eine daraufhin angepasste Analyse der Daten lassen sich diese Störfaktoren jedoch hinreichend minimieren. Es wurden unterschiedliche Winkeldifferenzen zwischen den beiden Polarisationsfiltern getestet, und die Resultate standen in Übereinstimmung mit den Prognosen der Quantenmechanik, d.h. sie verletzten explizit die auf die experimentelle Situation angepasste Version der Bellsche Ungleichung. D´Espagnat führt weitere sechs Untersuchungen auf, die letzte aus dem Jahr 1976, die teilweise mit Quanten des sichtbaren Lichts, teilweise mit unsichtbaren hochenergetischen Gamma-Quanten durchgeführt wurden. Lediglich zwei dieser Studien lieferten Resultate, die prinzipiell noch unter der Annahme eines lokal-realistischen Modells der Wirklichkeit erklärt werden könnten. Alle anderen reproduzierten eindeutig die auf der Grundlage der

[230] Vgl. d´Espagnat (1980) in Neuser (1996), S. 64.

Quantenmechanik angestellten Berechnungen, d.h. diejenigen starken Korrelationen, die der Bellschen Ungleichung nicht genügen.

Alle bisher erwähnten Versuche bedienten sich eines statischen Aufbaus; die Ausrichtung der Filter blieb jeweils für die Erhebung einer Messreihe fest eingestellt. Dies eröffnet die vielleicht nicht besonders plausible, aber dennoch nicht auszuschließende Möglichkeit eines regulären, d.h. sich kontinuierlich durch den Raum ausbreitenden Informationsaustausches zwischen beiden Messpunkten, auch wenn physikalisch nicht ganz klar ist, welche Art von Kräften oder Feldern dafür in Betracht kommen könnten. In einem in dieser Hinsicht verbesserten Versuchsaufbau müsste somit sichergestellt werden, dass die Entscheidung, welche konkrete Polarisationsrichtung tatsächlich gemessen werden soll, erst kurz vor Eintreffen der Lichtquanten definitiv festgelegt wird. Von dieser Festlegung hängt ja die Verteilung der möglichen Resultate ab, und eine Korrelation, die stärker ist, als dies aufgrund eines klassischen Modells zu erwarten wäre, könnte dann nicht mehr durch verborgene Signale zustandegekommen sein, die dem in der Relativitätstheorie formulierten maximalen Geschwindigkeitslimit, d.h. der Lichtgeschwindigkeit, unterliegen. Die experimentelle Umsetzung einer solchen Idee stellt freilich eine besondere Herausforderung dar. Beispielsweise ist es vollkommen unmöglich, die Polarisationsfilter kurz vor Eintreffen eines Teilchens mechanisch zu bewegen, da ein Lichtquant die Strecke eines Meters in nur 3,3 Nanosekunden (Milliardstel-Sekunden) zurücklegt. Auch für John Bell ist dieser bisher nicht berücksichtigte Zeitfaktor ein wichtiger, wenn nicht sogar der entscheidende Gesichtspunkt aller experimentellen Bemühungen: „Of more importance, in my opinion, is the complete absence of the vital *time* factor in existing experiments. The analyzers are not rotated during the flight of the particles. Even if one is obliged to admit some long range influence, it need not travel faster than light – and so would be much less indigestible. For me, then, it is of capital importance, that Aspect is engaged in an experiment in which the time factor is introduced."[231]

Diese Bemerkungen Bells stammen aus dem Jahr 1981. Das von ihm angedeutete Experiment wurde 1982 von Alain Aspect, Jean Dalibard und Gérad Roger am französischen *Institut d´Optique Théoretique et Apliquée* der *Université Paris Sud* durchgeführt.[232] In diesem bedient man sich sich auf jeder Seite des Versuchsaufbaus jeweils zweier, in unterschiedlichem Winkel fest installierter Polarisationsfilter nebst

[231] Bell (1989), S. 154.
[232] Vgl. Aspect (1982).

zugehörigen Detektoren, zwischen denen die eintreffenden Lichtquanten mittels einer extrem schnellen optischen Weiche hin- und herdirigiert werden können. Die Schaltfrequenz dieser Verzweigungen beträgt 50 Megahertz, so dass an jedem der beiden Messpunkte alle 10 Nanosekunden eine andere Polarisationsrichtung gemessen werden kann.[233] Beide Taktgeber für die optischen Weichen arbeiten unabhängig voneinander, d.h. natürlich zu erwartende geringfügige Gangunterschiede der Oszillatoren führen für jedes Lichtquantenpaar zu einem quasi-zufällig ausgewählten Satz an Polarisatoren.[234] Die Wege vom Emissionsort der Lichtteilchen – als Quelle werden angeregte Kaliziumatome verwendet – bis zu den Detektoren betragen jeweils 6 Meter, so dass ein etwa vorhandenes Signal, welches mit Lichtgeschwindigkeit zwischen beiden ausgetauscht werden könnte, etwa 40 Nanosekunden Zeit benötigen würde. Die Schalter sind demnach schneller als die „Flugzeit“ zwischen Kalziumatom und Detektor, und erst recht schneller als die Dauer einer möglicherweise mit Lichtgeschwindigkeit erfolgenden Kommunikation zwischen beiden Messorten. Die vier Filter, A_1/A_2 auf der einen und B_1/B_2 auf der anderen Seite des Experimentalaufbaus, stehen in relativen Winkelverhältnissen, die den Beziehungen $A_1/A_2 = A_2/B_1 = B_1/B_2 = 22{,}5°$ und $A_1/B_2 = 67{,}5°$ genügen. Die beiden Winkel 22,5° und 67,5° sind diejenigen, welche nach den Berechnungen der Quantenmechanik die größte Diskrepanz zur Bellschen Ungleichung hervorrufen müssten. Im Versuch wurde eine modifizierte Form dieser Gleichung verwendet, die nach ihren „Konstrukteuren“ *Clauser-Horne-Shimony-Holt Inequality* heißt. Diese ist auf die speziellen Erfordernisse des Experiments abgestimmt und enthält unter anderem Terme zur Unterdrückung bzw. zum Ausgleich systematischer Fehlerquellen. Der aus den Versuchsdaten zu ermittelnde Parameter S muss in Analogie zur Ungleichung Bells der Beschränkung $-1 \leq S \leq 0$ genügen, um mit den Prognosen lokal-realistischer Wirklichkeitsmodelle vereinbar zu sein. Der nach der Quantenmechanik zu erwartende Wert von S, der unter der Annahme obiger Winkeldifferenzen (22,5° und 67,5°) berechnet wurde, ist S = 0,112 und verletzt somit die

---

[233] Eine Schaltfrequenz von 50 Mhz bedeutet, dass auf jeder der Seiten alle 20 ns ein kompletter Wechselzyklus vollendet ist (Polarisator 1 → Polarisator 2 → Polarisator 1), so dass die einzelnen Wechselvorgänge (1-2 und 2-1) alle 10 ns aufeinander folgen. Alle 10 ns wird „gewechselt“.

[234] Natürlich wäre die Idealvorstellung, dass alle 10ns tatsächlich vollkommen *zufällig* gewählt würde, an welchem Polarisator ein ankommendes Lichtquant „auf die Probe gestellt“ wird. Aspect et al. glauben jedoch nicht, dass diese Unzulänglichkeit einen Einfluss auf die Resultate nimmt: „The ideal scheme has not been completed since the change is not truly random, but rather quasiperiodic. Nevertheless, the two switches on the two sides are driven by different generators at different frequencies. It is then very natural to assume that they function in an uncorrelated way.” Vgl. Aspect(1982), S. 1807.

genannte Relation deutlich. Die im Experiment tatsächlich gewonnenen Resultate fassen Aspect et al. wie folgt zusammen:

„Two runs have been performed in order to test Bell´s inequalities. In each run, we have chosen a set of orientations leading to the greatest predicted conflict between quantum mechanics and Bell´s inequalities [...] The average of the two runs yields $S_{EXPT} = 0.101 \pm 0.020$, violating the inequality $S \leq 0$ by 5 standard deviations. [...] A more ideal experiment with random and complete switching would be necessary for a fully conclusive argument against the whole class of supplementary-parameter theories obeying Einstein´s causality. However, our observed violation of Bell´s inequalities indicates that the experimental accuracy was good enough for pointing out a hypothetical discrepancy with the predictions of quantum mechanics. No such effect was observed."[235]

[235] Aspect (1982), S. 1807.

6.2.6 Starke Korrelationen und die Frage nach der physikalischen Realität

Bohr und Einstein haben die Entdeckung der Bellschen Ungleichung und die experimentellen Tests derselben nicht mehr erleben dürfen. Und so mag es reine Spekulation sein, sich auszumalen, wie die beiden Kontrahenten der historischen Solvay-Konferenzen auf diese erstaunlichen Resultate reagiert hätten. Sicher ist, dass dann, wenn man die experimentellen Resultate von Alain Aspect als gültig akzeptiert, diese durch kein lokal-realistisches Modell der physikalischen Wirklichkeit erklärt werden können. Die unmittelbaren Beeinflussungen über beliebige Distanzen hinweg, die Einstein bisweilen als „spukhafte Fernwirkungen“ bezeichnet hatte und angesichts deren sich Schrödinger an okkulte „Magie“ erinnert fühlte, scheinen in der Natur tatsächlich zu existieren. Auch wenn aus den Versuchen Aspects streng genommen nur erschlossen werden kann, dass etwaige Signalübertragungen deutlich schneller als das Licht sein müssten, so liegt doch die Vermutung nahe, dass diese in der Tat instantan, d.h. ohne zeitlichen Verzug vonstatten gehen. Es hat den Anschein, als sei ein verschränktes System, wie aus seiner theoretischen Beschreibung unmittelbar ersichtlich, ein einheitliches Ganzes und nicht als eine Summe separater Teile zu begreifen. Was im Rahmen einer Messung an einem der vermeintlich unabhängigen Komponenten geschieht, beeinflusst ohne zeitlichen Verzug das Verhalten des jeweils anderen Teiles und man kann sogar behaupten, dass dessen Eigenschaften bis zu diesem Messakt noch gar nicht eindeutig festgelegt sind. Die Verletzung der Bellschen Relationen sind zumindest ein eindeutiger Hinweis darauf, dass die dynamischen Attribute eines Elementarteilchens in der Tat erst durch den Akt einer konkreten Messung *hervorgebracht* werden, d.h. der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik in diesem Punkt eher zu trauen ist als einem nachweislich unhaltbaren lokalen Realismus. In Strenge *bewiesen* ist dies jedoch ausdrücklich nicht, und es ist davon abgesehen auch kaum denkbar, wie eine solche These überhaupt bewiesen werden könnte.[236] Umgekehrt scheint die von Einstein, Podolsky und Rosen vertretene Auffassung, dass sich die reale Existenz der in der Quantentheorie nachweislich nicht vorhandenen verborgenen Parameter verschränkter Systeme unter der Annahme des Lokalitätspostulates indirekt erschließen lasse, eindeutig widerlegt. Wenn diese existieren sollten, dann nicht als lokale Attribute,

[236] Es wäre sozusagen ein Nichtexistenz-Beweis gefordert, der empirisch grundsätzlich nicht erbracht werden kann.

doch als solche waren sie schließlich gedacht. Für die meisten Physiker war damit jedenfalls der letzte, meist ohnehin nicht mehr besonders ernst genommene Einwand gegen die Vollständigkeit der Theorie hinfällig geworden.[237]

Die empirische Verletzung der Bellschen Ungleichung verhalf also der Quantenmechanik zu einer weiteren Bewährung, die angesichts der weitreichenden Konsequenzen für die Vorstellung von objektiver Wirklichkeit umso bedeutsamer ist. Tatsächlich hat diese notwendige Wandlung des Realitätsbegriffes sogar mit der Theorie im engeren Sinne gar nichts zu schaffen, sondern ist selbst unter der Annahme einer späteren Ablösung derselben, von bleibendem Wert. Die in der Natur zu beobachtenden starken Korrelationen zeigen sich in Messreihen, die unter den lokalen Bedingungen beliebig weit voneinander entfernt liegender Orte zustandegekommen sind. Solange ein maximal mit Lichtgeschwindigkeit sich ausbreitender Informationsaustausch ausgeschlossen werden kann, ist auf deren Basis die Zurückweisung lokaler Realitätsmodelle unvermeidlich.

"Although Bell´s theorem arose in the context of quantum theory, Bell´s result does not depend on the truth of quantum theory. The Clauser-Aspect experiments show that Bell´s inequality is violated by the facts. This means that even if quantum theory should someday fail, its successor theory must likewise violate Bell´s inequality when it comes to explaining the twin state. Physics theories are not eternal. When quantum theory joins the ranks of phlogiston, caloric, and the luminiferous ether in the physics junkyard, Bell´s theorem will still be valid. Because it´s based on facts, Bell´s theorem is here to stay."[238]

Einsteins Begriff einer objektiven Wirklichkeit als Gegenstand der Physik beruht auf der Annahme mehrerer Grundprinzipien, unter welchen die Lichtgeschwindigkeit eine besondere Rolle einnimmt. Erstens vertritt er den Realismus als eine Position, die davon ausgeht, dass die Gegenstände der Physik, was immer sie auch sein mögen, unabhängig von jedwedem Beobachter an und für sich existieren. Dabei ist ausdrücklich keine Form des naiven Materialismus wie z.B. der antike Atomismus gemeint, sondern eher eine mathematisch elaboriertere Beschreibung der Welt, deren *prima materia* als universelles Kraftfeld in Erscheinung tritt. Die beiden letzten Jahrzehnte seines Lebens verbrachte

---

[237] Der Physiker Shimon Malin erklärt z.B. seine Parteinahme und diejenige vieler Fachkollegen für die Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik durch den Einfluss einer nicht weiter rationalisierbaren Intuition: „Ich glaube, dass viele Physiker, ich selbst eingeschlossen, Bohrs Auffassung bevorzugten, weil wir intuitiv von der Vollständigkeit der Quantenmechanik überzeugt waren und das Gefühl hatten, dass sie etwas radikal Neues über das Wesen der Realität aussagt. Obwohl wissenschaftliche Behauptungen stets in rationalen Begriffen vorgestellt werden, basieren sie gleichwohl häufig auf Gefühl und Intuition anstatt auf logischen Argumenten!" Vgl. Malin (2003), S. 145f.

[238] Herbert (1987), S. 227.

Einstein mit der Arbeit an einer vereinheitlichten Feldtheorie, die auch heute noch als das Endziel der theoretischen Physik angesehen wird, wenn ihm auch hierin kein durchschlagender Erfolg mehr vergönnt war. Das zweite Prinzip ist die Forderung nach einer kausal vorherbestimmten Evolution des Kosmos, in welcher kein Platz für den Begriff eines absoluten Zufalls sein konnte. Bekanntlich kritisierte er zeitlebens die statistische Interpretation der Quantenmechanik, sofern sie als Verkörperung einer nicht weiter analysierbaren Eigenschaft der Natur betrachtet wurde, von welcher man nicht mehr die Hoffnung haben durfte, sie eines Tages wieder durch eine streng deterministische Theorie nach klassischem Vorbild ersetzen zu können. Das dritte Postulat der Einsteinschen Weltsicht ist eng mit dem Ideal strenger Kausalität verbunden und wurde bereits unter dem Begriff „Lokalitätsprinzip“ verwendet: Lokale Wirkungen müssen lokale Ursachen haben, und scheinbare Fernwirkungen sind immer als Sukzession unendlich vieler Nahwirkungen zu begreifen, d.h. als sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitende Störung im raumerfüllenden Feld.

Nach der Speziellen Relativitätstheorie existiert nun für diese Ausbreitungsgeschwindigkeit eine absolute Obergrenze, die mit derjenigen des Lichts im Vakuum zusammenfällt. Bekanntlich wurden in dieser Theorie die drei räumlichen Dimensionen der Newtonschen Physik und die quasi auf jene „aufgesetzte“, in allen Bereichen gleichförmig voranschreitende Zeit durch eine mathematische Verschmelzung dieser Komponenten ersetzt, die sogenannte vierdimensionale Raumzeit, welche die eigentliche geometrische Struktur der Wirklichkeit widerspiegelt. Der empirisch messbare Raum und die empirisch messbare Zeit sind nur Projektionen dieses vierdimensionalen Gebildes auf die uns bekannten drei räumlichen bzw. die eine zeitliche Dimension, und diese „Schattenwürfe“ verändern sich für einen Beobachter je nach dessen Bewegungszustand relativ zum beobachteten Objekt. Für diesen laufen die Uhren bewegter Gegenstände langsamer, und die räumliche Dimension in deren Bewegungsrichtung „schrumpft“ (mitsamt den darin enthaltenen Objekten) immer mehr zusammen. Im Grenzfall eines mit Lichtgeschwindigkeit bewegten Objektes scheint dessen Zeit stillzustehen und dessen Ausdehnung in Bewegungsrichtung sich auf Null reduziert zu haben.

Einstein war mit dem Namen „Relativitätstheorie“ nicht besonders glücklich. Dieser suggerierte (und suggeriert auch heute noch) die falsche Intuition, dass nicht nur alle physikalischen Beschreibungen relativ seien, was bei vielen Größen durchaus der Fall ist,

sondern dass gar kein absoluter Standpunkt existierte, von dem aus sich sagen ließe, wie die Dinge wirklich liegen. Tatsächlich ist aber das vierdimensionale Raumzeit-Kontinuum gewissermaßen das absolute System, und die Messergebnisse eines jeden Beobachters lassen sich über diesen ausgezeichneten Bezugsrahmen in diejenigen eines in beliebiger Relativbewegung dazu befindlichen anderen Beobachters umrechnen. Ohne diese geometrischen Invarianten der vierdimensionalen Raumzeit wären die zur Umrechnung gebräuchlichen Lorentz-Transformationen schlechterdings nicht möglich. Die Lichtgeschwindigkeit, die ja wie alle Geschwindigkeiten der Quotient aus einer räumlichen und einer zeitlichen Größe darstellt, spielt nun bei der Festlegung einer absoluten Reihenfolge in der kausalen Kette von Ursachen und Wirkungen eine besondere Rolle. In gewissem Sinne bewegen sich grundsätzlich *alle* physikalischen Gegenstände samt ihren Beobachtern immer mit Lichtgeschwindigkeit, selbst wenn letztere z.B. den Eindruck hätten, doch gerade zu „ruhen“. Nur geschieht diese Bewegung nicht im gewöhnlichen dreidimensionalen Raum, sondern in der vierdimensionalen Raumzeit. Hier kann man die Lichtgeschwindigkeit als einen immer gleich langen Vektor oder „Pfeil“ auffassen, der lediglich in unterschiedlichen Winkeln zu den Achsen des Koordinatensystems liegen kann. Ein Beobachter, der unbeschleunigt ist, d.h. auf den keine Kräfte wirken, kann sich selbst mit vollem Recht als in Ruhe befindlich bezeichnen. Sein Lichtgeschwindigkeitsvektor fällt mit der Achse seiner Eigenzeit zusammen, d.h. er bewegt sich nicht im Raum, sondern nur durch die Zeit und das so schnell er eben kann, d.h. mit Lichtgeschwindigkeit. Für ein relativ zu diesem Beobachter bewegtes Objekt kippt der Vektor ein wenig aus der zeitlichen in den Bereich der drei räumlichen Dimensionen, d.h. dieses „verbraucht“ einen Teil seiner Lichtgeschwindigkeit auf die Bewegung durch den Raum, was zur Folge hat, dass es sich entsprechend langsamer durch die Zeit bewegt. Im Grenzfall steht der Vektor im rechten Winkel zur Zeitachse. Jetzt ist dieses Objekt so schnell wie das Licht und seine Zeit steht still. Eine daran angeheftete Uhr würde nicht mehr weiterzählen. Genau genommen ist es für ein Objekt mit von Null verschiedener Ruhemasse niemals möglich, diesen Zustand einzunehmen, da seine dynamische Masse mit zunehmender Geschwindigkeit ebenfalls ansteigt und es im Grenzfall einer unendlichen Energie bedürfte, dieses genau so schnell werden zu lassen wie das ruhemassefreie Licht.

Warum ist nun dieses so schnell, wie es ist, d.h. ca. 300.000 Kilometer pro Sekunde? Darauf gibt die Relativitätstheorie keine Antwort. Man muss diese Zahl eben empirisch bestimmen.[239] Dass sie aber gemessen an alltäglichen Geschwindigkeiten sehr groß ist, hat zur Folge, dass relativistische Effekte wie die Verlangsamung des Gangs von Uhren oder die Verkürzung bewegter Objekte im gewöhnlichen Leben keine Rolle spielen. Was geschähe jedoch, wenn es Wirkungen gäbe, die diese obere Grenzgeschwindigkeit überschreiten würden? Dann folgt aus der Geometrie der Raumzeit, dass sich nicht mehr absolut zwischen Ursache und Wirkung unterscheiden ließe und Wirkungen existierten, deren Ursache erst in der Zukunft liegt. Die Zeit überlichtschnell bewegter Objekte selbst verliefe rückwärts. Eine eindeutige kausale Beschreibung der Natur wäre nicht mehr möglich, was im Grunde nicht mehr bedeuten würde als die potentielle Selbstabschaffung der Physik.

Das Lokalitätspostulat, welches in Einsteins Realitätsauffassung eine so wichtige Rolle spielt, bedeutet demnach, dass alle Wirkungen letztlich auf kontinuierliche Nahwirkungen zurückführbar sein müssen und dass diese sich nicht schneller als mit Lichtgewindigkeit durch den Raum bewegen können. Oftmals nennt man dieses besondere Prinzip auch „Einstein-Lokalität“. Vor diesem Hintergrund ist auch unmittelbar ersichtlich, warum eine im optischen EPR-Experiment ermittelte Überschreitung der Lichtgeschwindigkeit hinsichtlich der gegenseitigen Einflussnahme beider gemessener Lichtquanten auf den ersten Blick so schwerwiegende Konsequenzen zu haben scheint. Könnte man nicht mittels dieser instantanen Wirkungen Botschaften in die Vergangenheit senden oder Botschaften aus der Zukunft empfangen? Könnte man diesen „Kanal“ zwischen den verschränkten Teilchen nicht zur zeitlosen Kommunikation nutzen?

Es scheint so zu sein, dass dies trotz des ganzheitlichen Verhaltens verschränkter Systeme nicht möglich ist und die Relativitätstheorie von dieser Seite nichts zu befürchten hätte.[240]

---

[239] Mittlerweile sind etwaige Nachkommastellen dieses Wertes *per definitionem* abgeschnitten worden, so dass man unter Zurhilfenahme einer exakten Atomuhr eigentlich nicht mehr die Lichtgeschwindigkeit misst, sondern die Länge eines Meters bestimmt. Die Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum beträgt demnach „genau“ 299.792.458 Meter pro Sekunde, und die Länge eines Meters ist genau die Strecke, die das Licht im Vakuum innerhalb einer 1/299.792.458 Sekunde zurücklegt. Diese Maßnahme ist dem Umstand zu schulden, dass heutzutage Zeiten viel genauer gemessen werden können als Längen. Das „Urmeter“ zu Paris hat damit (im Gegensatz zum Urkilogramm!) nur noch historische Bedeutung.

[240] Auf andere Schwierigkeiten, die immer noch dazu führen, dass Quanten- und Relativitätstheorie im Grunde unvereinbar sind, wurde bereits hingewiesen (vgl. Anm. 224). Die meisten heutigen Physiker vermuten, dass weitreichende Modifikationen am ehesten an der Relativitätstheorie zu erwarten sind, die in ihrer Grundstruktur eine durch und durch klassische Theorie darstellt. Ihr Gegenstandsbereich ist die subjektunabhängige raumzeitliche Realität,

Im oben diskutierten Fall, der stellvertretend für alle gegenwärtig denkbaren Verschränkungen stehen kann, empfängt ja jeder lokale Beobachter ein vollständig unpolarisiertes Lichtquant, d.h. die Wahrscheinlichkeit für die Polarisation in einer beliebig gewählten Richtung ist immer gleich groß und beträgt 50%. Aus dem Muster der Messreihen lässt sich ebensowenig eine Information herauslesen wie aus der Kopf-Zahl-Verteilung einer idealen Münze. Dass in der Tat eine starke Korrelation zwischen den beiden verschränkten Teilen des Systems besteht, ist nur durch einen unmittelbaren Vergleich beider Datensätze feststellbar, und die Übermittlung dieser Information genügt nach wie vor den Beschränkungen der Relativitätstheorie. Angesichts dieser Lage halten es viele Physiker wie z.B. Shimon Malin, Henry Stapp oder Bernard d´Espagnat für angebracht, zwischen „Einfüssen“ und „Signalen“ zu unterscheiden. Die Natur ermöglicht offenbar instantane Einflüsse, doch diese verletzen nicht die Basispostulate der Relativitätstheorie, da sie nicht dazu geeignet sind, Informationen zu übertragen. In Fällen, wo dies hingegen möglich ist, hat man es mit „Signalen“ zu tun, doch diese sind ihrerseits nicht instantan; sie bewegen sich maximal mit der Geschwindigkeit des Lichts.

---

alle Vorgänge lassen sich durch stetige Differentialgleichungen beschreiben, und sie basiert auf dem Ideal eines vollständigen kausalen Determinismus.

7. Reduktionismus und die Grenzen

Wenn man nach den methodologischen, erkenntnistheoretischen und ontologischen Prinzipien fragt, die die Genese und den unvergleichlichen Erfolg der modernen Naturwissenschaften ermöglicht haben, so stößt man unter anderem auf die Idee einer vollkommenen Objektivierung ihres Gegenstandsbereiches, die ontologische Reduktion desselben auf absolut letzte oder aus heuristischen Gründen konstruierte „vorläufig letzte“ materielle Einheiten, die Unterstellung einer durchgängig kausal determinierten Interaktion jener Elemente und schließlich die Erschaffung einer geometrisch mathematischen Abstraktion der physikalischen Wirklichkeit, die schließlich, an ihrer Statt, zum Inbegriff des objektiv Seienden überhaupt werden sollte.

Im frühen 17. Jahrhundert sind in Europa mehr oder weniger zeitgleich die Anfänge dieser modernen Epoche zu beobachten, deren Gründungsfiguren, jede auf ihre eigene Weise, die Abkehr von der scholastisch-aristotelischen Wissenschaftstradition mit der Verheißung einer Zukunft verbanden, die keine historischen Vorbilder mehr haben würde. Personen wie Francis Bacon in England, der den Neubeginn des menschlichen Erkenntnisunternehmens auf Empirie und Induktion zu gründen gedachte, oder René Descartes in Frankreich, der in der Vernunft selbst die unbedingte und voraussetzungslose Quelle der Wahrheit erblickte, oder Galileo Galilei in Italien, der ein Stück weit beide Wege betreten hatte, sind die leitenden Figuren und Ideengeber des naturwissenschaftlichen Zeitalters.

Aus philosophiehistorischer Sicht tritt dabei besonders Descartes hervor, der mit der Etablierung einer absoluten Trennung von Subjekt und Objekt, von *res cogitans* und *res extensa*, sowie seiner reduktionistischen Methodologie die Voraussetzungen für die vollkommene rationale Durchdringung des materiellen Universums geschaffen hatte, von welchem man mit Fug und Recht behaupten kann, dass alle Fragen, die hier überhaupt sinnvoll gestellt werden können, auch eine Antwort besitzen und dass das Auffinden jener Lösungen letztlich nur eine Frage des aufgewendeten Scharfsinns und der verfügbaren Zeit ist. Was die logischen Empiristen des 20. Jahrhunderts für ihre erfahrungsbasierte Einheitswissenschaft reklamierten, gilt in gleicher Weise für das Cartesische Universum der ausgedehnten Materie: Das Rätsel gibt es nicht. Alles erschöpft sich in Ausdehnung und der gegenseitigen Verschiebung dieses Ausgedehnten gegeneinander, d.h. in rein

quantitativen Bestimmungsstücken, die aus der Welt, inklusive der Pflanzen, Tiere und des menschlichen Körpers, ein gigantisches mechanisches Getriebe werden lassen, welches insgesamt nicht mehr ist, als die Summe seiner materiellen Einzelteile.

Freilich ist dies bestenfalls die Hälfte der Cartesischen Lehre, denn dieser gilt zu Recht als *der* Philosoph der Subjektivität. Es ist letztlich sogar kein geringeres als das sich selbst überantwortete Subjekt, das im bekannten Cogito-Argument die erkenntnistheoretische Isolation des methodischen Zweifels überwindet und damit den Grundstein des *gesamten*, d.h. auch des naturwissenschaftlichen Erkenntnisunternehmens legt.

Im „Cogito" Descartes´ zeigt sich die methodologische und ontologische Prioriät des Subjekts. In ihm bündeln sich sinnliche Wahrnehmung, Vorstellungsvermögen, Fühlen und Wollen. Es ist *Bewusstsein* schlechthin, in welchem sich der unantastbare Hort alles qualitativen Empfindens, alles Denkens und aller sinnhaften bzw. wertenden Einstellungen verbirgt und welches seinem göttlichen Schöpfer viel näher steht als die leblose und von purer Notwendigkeit regierte Materie. Gleichwohl besitzt auch die menschliche Seele, deren grundlegende Charakteristik durch Denken und Ausdehnungslosigkeit beschrieben ist, einen ihr jeweils zugeordneten Körper, der zur Gänze dem ontologischen Bereich der *res extensa*, d.h. dem des Nicht-Denkenden und räumlich Ausgedehnten angehört und mit dem sie in inniglicher, aber letztlich unverstandener Interaktion steht. Die Seele empfindet bei Gelegenheit bestimmter körperlicher Verfasstheiten scheinbar kaum willkürlich zu beeinflussende Gefühle wie Lust, Unlust, Hunger, Durst oder Schmerz und kann ihrerseits willentlich die komplexe Maschinerie steuern, deren „Führerstand" Descartes in der Hirnanhangdrüse des Gehirns vermutet. Auf die Schwierigkeit der Wechselwirkung zwischen Seele und Körper, d.h. zweier eigenständiger Substanzen, die ihrem reinen Begriff nach bereits als vollkommen voneinander getrennt angesehen werden und angesichts deren kaum denkbar ist, wie Nicht-Ausgedehntes in der Lage sein sollte, auf Ausgedehntes einzuwirken, wird hier nicht weiter eingegangen. Es sei nur darauf hingewiesen, dass die von Descartes gegebene Erklärung, welche darin besteht, dass die Seele in der Zirbeldrüse ja keine Bewegung neu generiere, sondern lediglich vorhandene materielle Ströme in ihrer Richtung umleite, die *spiritus animales*[241] in unterschiedliche Nervenenden dirigiere, um gleichsam hydraulisch die jeweils intendierten Muskeln

[241] Diese „Lebensgeister" sind keine immateriellen Entitäten, sondern bestehen durchaus aus winzigen Partikeln ganz gewöhnlicher Materie. Sie in Verbindung zur Lebenskraft (vis vitalis) oder den Entelechien des Vitalismus zu bringen, wäre somit nicht statthaft.

aufzublähen – dass diese These dennoch dem eigens postulierten Prinzip von der Erhaltung der Gesamtmenge aller Bewegung im Universum[242] zuwiderläuft. Die spätere, physikalisch präzisierte Variante jener Idee, der sogenannte Energieerhaltungssatz, ließ die Annahme einer möglichen Einwirkung der Seele auf das Gehirn noch abenteuerlicher erscheinen und trug viel zur absoluten „Verbannung“ des Bewusstseins aus der als objektiv-materiell vorgestellten Wirklichkeit bei. Auf dieses Problem wird weiter unten gesondert eingegangen.

Für die sich neu herausbildende empirische Naturwissenschaft war die generelle ontologische Vereinfachung der bewusstseinsunabhängigen Realität und die von Descartes vorgeführte Möglichkeit einer mathematisch-quantitativen Behandlung der Gegenstände ein Segen. Sein Ruf als Wegbereiter der modernen Naturwissenschaft begründet sich nicht in den eigenen Beiträgen zur Naturforschung, die man bis auf die Arbeiten zur Optik als hoch-spekulativ und weitgehend fruchtlos ansehen muss, sondern vielmehr in der Ausgestaltung einer universellen, quantitativ-mathematisch verfahrenden Methode. Hatte noch Galilei seine Fallgesetze mittels geometrischer Figuren gewissermaßen anschaulich begründen müssen, so schuf Descartes mit der Analytischen Geometrie die Voraussetzungen für eine vollständige Arithmetisierung des Raumes und der Zeit, als deren sinnfälligstes Merkmal uns heute noch das Cartesische Koordinatensystem begegnet. An die Stelle einer unendlichen Linie im Raum konnte z.B. nun die algorithmische Komprimierung derselben in Form einer einfachen Funktion ($y = m \cdot x + b$) treten, mittels deren sich die aktual unendliche Mannigfaltigkeit ihrer Punkte in eine Form bringen ließ, die Beweise in einer mathematischen Strenge erlaubte, die mit zeichnerischen Mitteln niemals möglich gewesen wären. Die erfolgreiche Anwendung dieser Mathematik auf den physikalischen Raum bedurfte allerdings der Erweiterung des Begriffssystems, die durch reine Deduktion aus Verstandesprinzipien nicht zu erlangen war. Descartes´ Weltenbau basiert nur auf Ausdehnung und Bewegung. Er ist ein gänzlich kinematisches System, in dem der Begriff der Kraft, der zum Dreh- und Angelpunkt der Newtonschen Physik werden sollte, noch nicht in axiomatischer Definition vorkommt, ja sogar als solche gar nicht vorkommen kann, da selbst die Idee der *soliditas*, d.h. der Undurchdringlichkeit materieller Körper und das Prinzip der Massenträgheit als Sekundärphänomen reiner Bewegung konstituiert wird.

---

[242] Vgl. z.B. Descartes, Principia Philosophiae, II, 36 bzw. Descartes (1992), S. 48.

Der immense Erfolg Newtons erklärt sich aus der Einführung seines Kraftbegriffes und der damit in unmittelbarem Zusammenhang stehenden Erweiterung des mathematischen Instrumentariums um den Infinitesimalkalkül, der etwa zur gleichen Zeit auch von Leibniz entwickelt wurde. Der kausale Determinismus fand seinen Ausdruck in Form eines Systems von Differentialgleichungen, die, gegeben den Bewegungszustand, Form und Masse aller Körper des materiellen Universums, es erlaubten, sowohl die Vergangenheit als auch den zukünftigen Zustand der Welt präzise zu berechnen. Die vernünftigerweise angenommene endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit jedweder Kraftwirkung, d.h. die prinzipielle Unmöglichkeit instantaner Fernwirkungen, die, trotz der „unzeitlichen" Form des Gravitationsgesetzes, selbst Newton als unabdingbare Voraussetzung einer physikalischen Naturerklärung erachtete, ermöglichte weiterhin die Behandlung zusammengesetzter Systeme als eine einfache Summe der Eigenschaften und lokalen Interaktionen ihrer jeweiligen Elemente, d.h. eine beispiellos erfolgreiche Verfahrensweise, die im Rahmen der Philosophie der Naturwissenschaften unter dem Begriff des „Reduktionismus" firmiert.

Bereits Descartes hatte in den frühen *regulae ad directionem ingenii* ausgeführt, dass „die ganze Methode [...] in der Ordnung und Disposition dessen [besteht], worauf man sein geistiges Auge richten muss, um irgendeine Wahrheit zu finden. Und zwar werden wir diese Regel genau befolgen, wenn wir verwickelte und dunkle Propositionen stufenweise auf einfachere zurückführen und sodann von der Intuition der allereinfachsten zur Erkenntnis aller anderen über dieselben Stufen hinaufzusteigen versuchen."[243] Und später, im *Discours de la méthode* heißt es: „Die zweite [Regel besagt], jedes Problem, das ich untersuchen würde, in so viele Teile zu teilen, wie es angeht und wie es nötig ist, um es leichter zu lösen. Die dritte, in der gehörigen Ordnung zu denken, d.h. mit den einfachsten und am leichtesten zu durchschauenden Dingen zu beginnen, um so nach und nach, gleichsam über Stufen, bis zur Erkenntnis der zusammengesetztesten aufzusteigen, ja selbst in Dinge Ordnung zu bringen, die natürlicherweise nicht aufeinander folgen."[244]

Für Descartes ist mit seiner universellen Methode bereits die Idee verbunden, dass letztlich alle Forschungsdisziplinen ein einheitliches Ganzes bilden und auf ein gemeinsames Fundament einfachster Prinzipien zurückgeführt werden können, denn „die Erkenntnis

[243] Descartes, Regulae ad Directionem Ingenii, Regel 5. Vgl. Descartes (1972), S. 16.
[244] Descartes, Discours de la méthode II, 8/9 bzw. Descartes (1960), S. 31.

einer Wahrheit entfernt uns nicht, wie die Ausübung einer Kunstfertigkeit, von der Entdeckung einer anderen, sondern hilft vielmehr dabei. [...] Man muß also überzeugt sein, daß alle Wissenschaften so miteinander verknüpft sind, daß es viel leichter ist, sie alle gemeinsam zu erlernen, als eine einzelne von den anderen abzutrennen."[245]

Im 20. Jahrhundert begegnet man der Vorstellung einer Einheitswissenschaft wieder in der Philosophie des logischen Empirismus. Auch hier wird ein Konstitutionssystem propagiert, in welchem alle Aussagen der Wissenschaft auf nicht weiter analysierbare Sinnesempfindungen oder auf sprachliche protokollierte Fixierungen solcher Beobachtungen zurückführbar sein müssen. Obwohl die Meinungen darüber, welches Fundament nun für die Wissenschaften am geeignetsten sei, bisweilen weit auseinander gehen, so steht doch der Gedanke im Hintergrund, dass über die prinzipielle Rückführbarkeit aller höherstufigen Aussagen auf jene Basis letztlich alle Forschungsdisziplinen ein einheitliches Ganzes bilden.

Eine weniger auf Sinnesempfindungen oder Wahrnehmungsprädikate, als vielmehr auf letzte einfache „Dinge" gegründete Vorstellung von Einheitswissenschaft, die dem alltäglichen Realitätsverständnis von objektiv in Raum und Zeit situierten Objekten Rechnung trägt, wurde 1958 von Paul Oppenheim und Hilary Putnam vorgeschlagen.[246] Die überall in den Naturwissenschaften zu beobachtende Tendenz des Verstehens durch Zerlegung in einfachere Komponenten, d.h. letztlich durch Reduktion, wird hier in theoretisch-logischer Hinsicht auf den Punkt gebracht und es wird vorgeschlagen, dass ein mehr oder weniger natürliches Stufensystem existiere, welches durch sogenannte Mikroreduktionen schrittweise auf eine absolut unterste Ebene – die der „Elementarteilchen" – zurückgeführt werden kann. Für die den jeweilgen Stufen zugeordneten wissenschaftlichen Theorien sind dann ebenfalls Reduktionsbeziehungen formulierbar, die den folgenden Kriterien genügen müssen:

„Gegeben seien zwei Theorien T_1 und T_2; T_2 heißt auf T_1 reduziert dann und nur dann, wenn 1. die Sprache von T_2 Terme enthält, die nicht in der Sprache von T_1 enthalten sind, 2. jegliche Beobachtungsdaten, die durch T_2 erklärt werden können, auch durch T_1 erklärbar sind, 3. T_1 mindestens ebenso gut systematisiert ist wie T_2."[247]

---

[245] Descartes, Regulae ad Directionem Ingenii, Regel 1. Vgl. Descartes (1972), S. 3f.
[246] Vgl. Oppenheim/Putnam (1958) in Krüger (1970), S. 339-371.
[247] Oppenheim/Putnam (1958) in Krüger (1970), S. 341.

In analoger Weise wird sodann die Reduktion einer Teilwissenschaft B_2 durch eine andere Teilwissenschaft B_1 (z.B. die Reduktion der Chemie auf die Physik) und der Begriff der „Mikroreduktion“ erläutert: „Man nehme die allgemein anerkannten Theorien aus B_2 zu gegebener Zeit *t* als T_2. Dann wird B_2 auf B_1 zur Zeit *t reduziert* dann und nur dann, wenn es zur Zeit *t* in B_1 eine Theorie T_1 gibt, so daß T_1 T_2 reduziert. [...] Dieser Ansatz setzt voraus (1) die bekannte Annahme, daß eine Aufteilung des gesamten Vokabulars beider Teilwissenschaften in theoretische Terme und Beobachtungsterme gegeben sei, und (2), daß die beiden Teilwissenschaften dasselbe Beobachtungsvokabular besitzen.
[...] Unter den folgenden Bedingungen werden wir sagen, daß die Reduktion von B_2 auf B_1 eine *Mikroreduktion* ist: B_2 ist auf B_1 reduziert; die Objekte des Grundbereiches von B_2 sind Ganze, die eine Zerlegung [...] in echte Teile besitzen, welche alle dem Grundbereich von B_1 angehören. Nehmen wir z.B. an, B_2 sei eine Teilwissenschaft, die vielzellige lebende Dinge als Grundbereich hat. B_1 sei eine Teilwissenschaft, deren Grundbereich aus Zellen besteht. Dann können die Dinge aus dem Grundbereich von B_2 in echte Teile zerlegt werden, die alle zum Grundbereich von B_1 gehören. Falls des weiteren B_1 B_2 zur Zeit *t* reduziert, werden wir sagen B_1 *mikroreduziert* B_2 zur Zeit *t*.“[248]

Eine Mikroreduktion im beschriebenen Sinne stellt nach Meinung der Autoren „einen Schritt in Richtung auf *Einheit der Sprache* in der Wissenschaft dar. Denn B_1 erklärt alles, was auch B_2 erklärt (und normalerweise einiges mehr), falls B_1 B_2 reduziert. Dann können wir B_1 *an Stelle von* B_2 *benutzen*, auch wenn wir in B_1 keine Analoga für einige theoretische Terme von B_2 definieren können.
[...] Ebenso zielt die Mikroreduktion von B_2 auf B_1 auf *Einheit der Gesetze* ab, denn sie ´reduziert´ die Gesamtzahl der wissenschaftlichen Gesetze durch die Möglichkeit, im Prinzip auf die Gesetze von B_2 zu verzichten und die einschlägigen Beobachtungen mit Hilfe von B_1 zu erklären.“[249]

Oppenheim und Putnam schlagen nun sechs hierarchisch geordnete und bereits aus der bisherigen Systematik der empirischen Wissenschaften zu entnehmende Ebenen vor, deren Aggregationsgrad ausgehend von den ultimativen Einheiten der Elementarteilchen schrittweise zunimmt und zwischen denen jeweils asymmetrische Teil-Ganzes-Beziehungen bestehen. Jede Theorie einer Stufe ist dabei eine potentielle Mikroreduzierende der nächst-höheren, so dass infolge der hieraus resultierenden Transitivität der Reduktionen die vollständige Rückführung aller Ebenen auf die Gesetze

[248] Ebd. S. 341/342. Kursivierung im Original.
[249] Ebd. S. 342. Kursivierung im Original.

der Atomphysik möglich erscheint. Im Detail werden folgende Phänomenbereiche unterschieden:[250]

6. Soziale Gruppen
5. (mehrzellige) lebende Dinge
4. Zellen
3. Moleküle
2. Atome
1. Elementarteilchen

Die Einteilung ist eine empirische, d.h. die Brauchbarkeit der einzelnen Stufen für die Durchführung des (mikro-) reduktionistischen Programmes erweist sich letztlich am Erfolg des Unternehmens. Gleichwohl ist die Annahme der Existenz unterschiedlicher Aggretationsebenen überhaupt auch ein Gebot der Praktikabilität: „Es ist nicht absurd anzunehmen, daß schließlich die Gesetze der Psychologie im Sinne des Verhaltens einzelner Neuronen erklärt werden können, daß das Verhalten einzelner Zellen – unter Einschluß der Neuronen – endlich wird erklärt werden können im Sinne ihres biochemischen Aufbaus, und daß das Verhalten der Moleküle – die Makromoleküle, aus denen die lebenden Zellen aufgebaut sind, einschlossen – zum Schluß erklärt werden kann im Sinne der Gesetze der Atomphysik. Wenn dies erreicht ist, dann werden die Gesetze der Psychologie im Prinzip auf die Gesetze der Atomphysik reduziert worden sein, obgleich es nichtsdestoweniger hoffnungslos unpraktisch wäre, zu versuchen, das Verhalten eines einzelnen menschlichen Wesens im Sinne seines Aufbaus aus Elementarteilchen zu erklären.“[251]

Oppenheim und Putnam argumentieren für die Einheit aller empirischen Disziplinen, indem sie den Nachweis zu erbringen suchen, dass alle höherstufigen Beschreibungssysteme prinzipiell auf Aussagen reduziert werden können, die ausschließlich der Theorie der fundamentalsten Ebene entstammen. Ein solches Verfahren beinhaltet gleichermaßen eine Reduktion der wissenschaftlichen Begriffe, eine Reduktion der Gesetze und letztlich sogar eine Reduktion der naturwissenschaftlichen Ontologie, da durch die Zusammenlagerung von Elementarteilchen schließlich nichts mehr entstehen

[250] Ebd. S. 345.
[251] Ebd. S. 343.

kann, als Haufen von Elementarteilchen, auch wenn man die Beziehung zwischen diesen z.B. „das soziale System einer menschlichen Gesellschaft“ nennen mag. Aus heuristischen Gründen könnte das Festhalten an Beschreibungssystemen höherer Stufen auch weiterhin unabdingbar sein, um „hoffnungslos unpraktische“ theoretische Monstren zu vermeiden, doch es scheint offensichtlich, dass im Falle der Angemessenheit des mirkroreduktionistischen Programms letztlich der Wissenschaft der untersten Stufe die absolute Priorität einzuräumen ist. Über ein der Transitivität der Reduktionsbeziehungen analoges Prinzip bestimmen die Gesetze der fundamentalsten Ebene notwendig und vollständig das Verhalten auf höheren Aggregationsstufen, und es wäre z.B. durchaus zulässig, die Soziologie deduktiv aus den Formalismen der Atomphysik herzuleiten.

Auch wenn nun die direkte Gegenüberstellung von Elementarteilchenphysik und Soziologie und der Verweis auf die prinzipielle Reduzierbarkeit der letzeren ein wenig grotesk anmuten mag, so ist doch die Zwangsläufigkeit der Argumentation scheinbar unausweichlich – jedenfalls dann, wenn man bereit ist, einige bisher nicht explizit ausgeführte Zusatzannahmen zu akzeptieren, die ihrerseits vollkommen vernüftig klingen.

Betrachtet man darüberhinaus den Siegeszug der neuzeitlichen Naturforschung, so lassen sich mühelos Beispiele für erfolgreiche Reduktionen beibringen, ja man kann sogar behaupten, dass die reduktionistische Methodologie zum Inbegriff dessen gehört, was man eine wissenschaftliche *Erkärung* nennt. Und diese ist wiederum nicht viel mehr, als eine systematische Intensivierung der natürlichen Einstellung des Menschen, das Verhalten zusammengesetzter Systeme durch die Einsicht in die Wirkzusammenhänge ihrer Komponenten verstehbar und vorhersehbar zu machen. Die von Descartes vorbereitete Möglichkeit, den empirischen Raum und die darin befindlichen mechanischen Prozesse gänzlich in ein System mathematischer Relationen und Funktionen zu transformieren, bot für den Ansatz reduktiver Erklärungen enorme Vorteile; es gehört schließlich zum Begriff der mathematischen Gegenstände und Zahlen, nicht mehr als die Summe ihrer Teile zu sein, und ohne diese Verlagerung des Schauplatzes der Naturwissenschaft in einen ontologisch neutralen, d.h. sämtlicher qualitativer Aspekte beraubten Raum, wäre die Newtonsche Mechanik kaum denkbar gewesen.

An dieser Stelle begegnet man nun den oben bereits angedeuteten Zusatzannahmen, die im wesentlichen auf die der klassischen Physik eigene und später auch von Einstein vertretene Vorstellung von objektiver Realität hinauslaufen. Unabhängig vom Beobachter gibt es

einen physikalischen Raum und darin befindliche Elemente der Wirklichkeit, denen quantifizierbare und zumindest theoretisch messbare Attribute zukommen, und die unter der Annahme des Lokalitätspostulates sowie der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit kausaler Wirkungsketten einen deterministischen Prozess verkörpern, der seinerseits durch ein sämtliche Bestimmungsstücke repräsentierendes mathematisches Modell zur Gänze beschrieben werden kann. Selbstverständlich ist niemals gesichert, dass die jeweils vorliegende Beschreibung vollständig und adäquat ist: „As far as the propositions of mathematics refer to reality, they are not certain; and as far as they are certain, they do not refer to reality."[252] – Nichtsdestoweniger wird unterstellt, dass es eine solche geben müsse. Den Glauben an die apriorische Vernunftordnung des Kosmos zählte Einstein bekanntlich zu seinen quasi-religiösen Überzeugungen.[253]

Der Aufstieg, den die Naturwissenschaften seit der Mitte des 17. Jahrhunderts begonnen hatten, betraf zunächst die physikalische Mechanik als eine ihrer fundamentalsten Disziplinen. Die Idee einer vollkommenen Objektiver- und Mathematisierbarkeit der Cartesischen *res extensa* und die damit mögliche Reduktion des Kosmos auf einfache Begriffe und Prinzipien war die Basis ihres immensen Erfolges. Was frühe biologische bzw. medizinische Forschung betraf, so war bereits Descartes durch anatomische Studien zu der Überzeugung gelangt, dass Pflanzen und Tiere mitsamt des menschlichen Körpers ausschließlich als mechanische Automaten behandelt werden können, d.h. reine, von purer Notwendigkeit regierte *res extensa* darstellen. Die Reduzierbarkeit dieser Gegenstände auf mechanische Prinzipien eröffnete den Weg des zunehmenden Erkenntnisfortschritts auch in diesen Disziplinen der Naturforschung. Dass aber zumindest im Menschen der eigentliche Urgrund jedweder Wissenschaft überhaupt, die bewusst wahrnehmende, ihre Erkenntnisgegenstände konstituierende sowie Sinn und Bedeutung stiftende Seele zum puren Mechanismus des Körpers hinzutreten muss, und ihrerseits nicht auf diesen reduziert werden kann – diese These geriet im Kreise der aufstrebenden Naturwissenschaft zur metaphysischen Spekulation, die allenfalls zum Zeitvertreib der idealistischen Philosophie gereichte. Sicher: Durch die absolute begriffliche Trennung von *res cogitans* und *res extensa* und die damit zusammenhängenden Schwierigkeiten bei der Erklärung ihrer Interaktion, hatte Descartes ungewolt zu dieser naheliegenden Vertreibung der Seele aus dem sinnentleert zurückbleibenden Kosmos beigetragen. Die Einsicht aber, dass die

[252] Einstein (1954), S. 233.
[253] Vgl. z.B. Einstein (1934), S. 176.

klaffende Lücke ihrer Eliminierung auch für die empirische Naturwissenschaft nicht folgenlos bleiben konnte, verbreitete sich im Verlauf des 19. Jahrhunderts selbst im Kreise ihrer eifrigsten Protagonisten.

Das reduktionistische Programm der Zergliederung der jeweiligen Erkenntnisgegenstände hatte mittlerweile auch in der Anwendung auf lebende Systeme zu enormen Fortschritten geführt. Man hatte die Zellen als quasi-autonome Konstituenten biologischer Organismen identifiziert, die Ontogenese höherer Lebewesen als Entwicklung aus jeweils einer einzelnen Keimzelle beschrieben und die Phylogenese der Arten, inklusive der des *homo sapiens*, im Rahmen der natürlichen Zuchtwahl erklären können. Die noch junge Disziplin der Elektrophysiologie hatte die grundlegenden Kommunikations- und Steuerungsmechanismen des Nervensystems aufgedeckt, auf deren Grundlage man hoffen durfte, dereinst ein lückenloses Verständnis des Verhaltens höherer Wirbeltiere zu erlangen und sogar die geistigen Fähigkeiten des Menschen auf nichts mehr als die komplexe Aktivität neuronaler Reflexbogen zu reduzieren.

Die atemberaubende Geschwindigkeit der Fortschritte in diesen Bereichen strafte scheinbar all diejenigen Lügen, die die Möglichkeit des Verständnisses der Lebensvorgänge und der höheren Geisteskräfte auf der Basis naturwissenschaftlicher Methoden stets in Abrede gestellt hatten. Die Bilanz der bisherigen Erfolge führte zur berechtigten Hoffnung, dass eine konsequente Weiterführung der reduktionistischen Welterklärung auf der Grundlage einer rein materialistischen Ontologie schließlich keine denkbare Frage mehr offen lassen würde. Als in dieser Phase der Euphorie der führende Vertreter der deutschen Physiologie, Emil du Bois-Reymond in einer Art Bilanzaufnahme der wissenschaftlichen Errungenschaften des 19. Jahrhunderts sich anschickte, prinzipielle Grenzen jedweder Naturerkenntnis zu verkünden, löste dies im Lager seiner metaphysikfeindlich gestimmten Fachkollegen, deren radikalster Vertreter der Jenenser Ordinarius für Zoologie, Ernst Haeckel war, einen Sturm der Entrüstung aus. In dieser denkwürdige Rede, die anlässlich der zweiten allgemeinen Sitzung der Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte am 14. August 1872 in Leipzig gehalten wurde, hatte du Bois-Reymond zwei tiefgründige Rätsel benannt, die nach seinem Dafürhalten sich einer naturwissenschaftlichen Behandlung für immer entziehen würden, und seine Ausführungen mit der orakelhaften Prophezeiung des „Ignorabimus“ – wir werden nicht wissen – enden lassen:

„Naturerkennen –“, so seine einleitenden Worte, „genauer gesagt naturwissenschaftliches Erkennen der Körperwelt mit Hilfe und im Sinne der theoretischen Naturwissenschaft – ist Zurückführen der Veränderungen in der Körperwelt auf Bewegungen von Atomen, die durch deren von der Zeit unabhängige Zentralkräfte bewirkt werden oder Auflösen der Naturvorgänge in Mechanik der Atome. Es ist psychologische Erfahrungstatsache, daß, wo solche Auflösung gelingt, unser Kausalitätsbedürfnis vorläufig sich befriedigt fühlt.“[254]

Diese „vorläufige“ Befriedigung endet nun nach Ansicht du Bois-Reymonds an einer ersten und schlechthin unüberwindlichen Grenze, sobald nach dem eigentlichen Wesen von Materie und Kraft gefragt wird, d.h. nach der Verfasstheit desjenigen substanziellen Prinzips, welchem bereits die vorsokratischen Naturphilosophen mit der Frage nach der Arché, dem Urgrund alles Seienden gegenüberstanden. Woraus „bestehen“ die Atome der mechanistischen Physik und woher stammt ihre Bewegung? Es scheint nicht nur so zu sein, dass im Rahmen der maximalen Kenntnis eines materiellen Systems, d.h. der Kenntnis aller Ortslagen und Bewegungsgrößen seiner Komponenten, die qualitative Frage nach dem Urstoff noch nicht berührt würde, sondern vielmehr, dass noch nicht einmal vorstellbar ist, wie eine befriedigende Antwort überhaupt aussehen könnte. Dieses Substanzproblem ist gleichsam das Kernthema der Metaphysik schlechthin, welche in der Frage gipfelt, warum überhaupt etwas sei, und nicht vielmehr nichts. Der Naturforscher und der Mensch im allgemeinen kann sich dennoch damit begnügen, den seiner Zergliederungen zugrundeliegenden Stoff sowie den Raum und die Zeit als von vorneherein gegeben zu betrachten, ohne sich in seinen Möglichkeiten des Weltverstehens, welches im wesentlichen auf das Verstehen der zeitlichen Evolution dieses Stoffes hinausläuft, eingeschränkt zu sehen. Sind irgendwelche nicht weiter begründbaren materiellen und kinetischen Anfangsbedingungen gesetzt, so scheint der vom Kausalgesetz determinierte kosmische Tanz der Atome dem Naturwissenschaftler die Möglichkeit an die Hand zu geben, zumindest *prinzipiell* alle Verhaltensweisen des Gesamtsystems und ausgewählter Teile desselben erklären zu können. Er könnte die Bildung von Sternen, Planetensystemen und die Entstehung des Lebens, welches aus dieser Perspektive nicht mehr zu sein scheint als ein komplexer Mechanismus, ebenso verstehen, wie die

[254] Du Bois-Reymond (1974), S. 55.

biologischen Evolutionprozesse, an deren vorläufigem Ende der Mensch sich schließlich selbst wiederfindet.

Dass aber, die Materie vorausgesetzt, im Zuge dieses vollständig transparenten Geschehens sich eine zweite absoulte Schranke der Erkenntnis auftut, die den empirischen Wissenschaftler in ähnlich hilfloser Lage zurücklässt, wie denjenigen, der es wagte, nach dem Urgrund alles Seienden zu fragen – diese Einsicht du Bois-Reymonds wiegt für das Programm einer reduktionistisch zergliedernden Naturerklärung umso schwerer:

„[…] an irgendeinem Punkt der Entwickelung des Lebens auf Erden, den wir nicht kennen und auf dessen Bestimmung es hier nicht ankommt, [tritt] etwas Neues, bis dahin Unerhörtes auf, etwas wiederum, gleich dem Wesen von Materie und Kraft, und gleich der ersten Bewegung, Unbegreifliches. Der in negativ unendlicher Zeit angesponnene Faden des Verständnisses zerreißt, und unser Naturerkennen gelangt an eine Kluft, über die kein Steg, kein Fittig trägt: wir stehen an der anderen Grenze unseres Witzes. Dies neue unbegreifliche ist das Bewußtsein.

[…] Mit der ersten Regung von Behagen oder Schmerz, die im Beginn des tierischen Lebens auf Erden ein einfachstes Wesen empfand, oder mit der ersten Wahrnehmung einer Qualität, ist jene unübersteigbare Kluft gesetzt, und die Welt nunmehr doppelt unbegreiflich geworden.“[255]

Es ist demnach die Entstehung einer subjektiv-qualitativen Perspektive, die, obgleich erst im menschlichen Welt- und Selbstbewusstsein zur vollen Entfaltung gelangt, bereits in den elementarsten Frühformen derselben nicht aus der materiellen und dynamischen Verfasstheit der biologischen Organismen deduziert werden kann, denn „welche denkbare Verbindung besteht zwischen bestimmten Bewegungen bestimmter Atome in meinem Gehirn einerseits, andererseits den für mich ursprünglichen, nicht weiter definierbaren, nicht wegzuleugnenden Tatsachen: ´Ich fühle Schmerz, fühle Lust; ich schmecke Süßes, rieche Rosenduft, höre Orgelton, sehe Rot´ und der ebenso unmittelbar daraus fließenden Gewißheit: ´Also bin ich´? Es ist eben durchaus und für immer unbegreiflich, daß es einer Anzahl von Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Sauerstoff-, usw. Atomen nicht sollte gleichgültig sein, wie sie liegen und sich bewegen werden. Es ist in keiner Weise einzusehen, wie aus ihrem Zusammensein Bewußtsein entstehen könne. […] Es ist also grundsätzlich unmöglich, durch irgendeine mechanische Kombination zu erklären, warum ein Akkord *König*scher Stimmgabeln mir wohl-, und warum Berührung mit glühendem Eisen mir wehtut. Kein mathematisch überlegener Verstand könnte aus astronomischer Kenntnis des materiellen Geschehens in beiden

[255] Ebd. S. 65f.

Fällen *a priori* bestimmen, welcher der angenehme und welcher der schmerzhafte Vorgang sei. Daß es vollends unmöglich sei, und stets bleiben werde, höhere geistige Vorgänge aus der als bekannt vorausgesetzten Mechanik der Hirnatome zu verstehen, bedarf nicht der Ausführung.“[256]

Du Bois-Reymond hatte seinen Begriff von Naturerkennen expliziert und den Versuch unternommen, auf rationalem Wege die prinzipiellen Grenzen dieses Unternehmens abzustecken, d.h. im wesentlichen dasjenige zu wiederholen, was ein Jahrhundert zuvor in der Philosophie Immanuel Kants bereits geleistet worden war. So unscheinbar also der Inhalt seiner gleichwohl rhetorisch brillianten Rede auch sein mochte, so unerwartet heftig fielen die Reaktionen der Zeitgenossen aus, und man kann nicht umhin, darin ein Symptom eines kulturellen Umfeldes zu sehen, in welchem die rapide voranschreitende Naturalisierung des Menschen dessen tradiertes Selbstbild bereits bis in die Grundfesten erschüttert hatte. Mit großem Beifall wurde das du Bois-Reymondsche *Ignorabimus* von Seiten derer instrumentalisiert, die hierin die von höchster wissenschaftlicher Stelle verbriefte Möglichkeit der Rettung bzw. Wiederherstellung einer unsterblichen menschlichen Seele erblickten. Der erbittertste Widerstand entstammte hingegen dem Lager der biologischen und physiologischen Naturforscher, die angesichts der enormen Fortschritte ihrer noch jungen Disziplinen nicht bereit waren, schlechthin absolute Grenzen der Erkenntnis zu akzeptieren und erst recht nicht hinsichtlich der empirischen Untersuchung des sinnlichen Empfindungsvermögens, welches sich doch in gleicher Weise wie alle anderen Fähigkeiten höherer Organismen auf nicht mehr als die Eigenschaften der sie konstituierenden Materie zurückführen lassen müsste.

In den meisten Fällen beruhten sowohl die rigorose Ablehnung der von du Bois-Reymond vertretenen Thesen als auch die vielerorts zu vernehmende Genugtuung bezüglich des offenen Eingeständnisses naturwissenschaftlicher Grenzen auf einem Missverständis, denn weder war von diesem beabsichtigt, der metaphysischen Seele Platz zu schaffen, noch war ihm daran gelegen, den Geltungsanspruch der empirischen Wissenschaften zu relativieren. Es ging ihm mit anderen Worten nicht darum, der Naturforschung nachzuweisen, dass in ihrem Gegenstandsbereich Probleme existieren, auf die sie nicht in der Lage wäre, eine Antwort zu geben, sondern vielmehr darum, um ein weiteres Mal festzustellen, dass durch ihre rein quantitative Methodik *die Form aller in ihr denkbaren Fragen und Antworten* bereits vorgegeben ist, ohne dass das Bewusstseinsproblem hinzugehörte. Ob dieses zu den

[256] Ebd. S. 71.

lösbaren oder unlösbaren Schwierigkeiten zählt, ist demnach keine empirische Frage, sondern eine solche, deren Antwort man *a priori* aus dem von du Bois-Reymond gegebenen Begriff des „Naturerkennens“ deduzieren kann. Wenn letzteres lediglich das „Zurückführen der Veränderungen in der Körperwelt auf Bewegungen von Atomen“ ist, so ist das Bewusstsein in der Tat gänzlich „transzendent“, denn was immer es auch sein mag, es ist selbst keine Veränderung in der *Körperwelt*, sondern allenfalls die Wahrnehmung derselben.

Ist dieses vorausgesetzt, so gibt es andererseits keine Grenze hinsichtlich der objektiven Erforschung von Natur und Mensch. Alles was ein biologischer Organismus auch immer an Verhaltensweisen an den Tag legen kann, ist die Folge der Einrichtung seiner materiellen Teile, und insofern vollständig naturwissenschaftlich verstehbar. Es gibt nichts, was hier eine Seele bzw. ein empfindendes Bewusstsein hinzutun könnte. Der ganze Verlauf des Kosmos, mitsamt der in ihm befindlichen Menschen, verliefe in genau der gleichen Weise, ob nun dort zusätzlich noch ein Bewusstsein existierte oder nicht. Da letzteres insofern gar kein Bestandteil der objektiven Welt ist, ist die empirische Wissenschaft hinsichtlich dieser prinzipiell vollständig. Ebenso einsichtig ist – darauf wird noch zurückzukommen sein –, dass auch willentliche Akte, für die sich das wollende Subjekt allein verantwortlich fühlt, gar nicht von diesem ausgehen, sondern bereits vom deterministischen Nervensystem bzw. vom Gehirn „entschieden“ sind, denn an der kausalen und energetischen Abgeschlossenheit des materiellen Universums besteht auch für du Bois-Reymond kein Zweifel. Auch diejenigen also, die seiner Ignorabimus-Rede die indirekte Rechtfertigung für menschliche Würde, Freiheit, Moral und Verantwortung entnehmen wollten, hatten den eigentlichen Sinn seiner Worte nicht verstanden.

Innerhalb der empirischen Wissenschaften war also gegen Ende des 19. Jahrhundert der Streit entbrannt, ob die Sphäre des subjektiven Empfindens tatsächlich ein transzendentes Problem darstelle oder nicht. Du Bois-Reymond hatte zwar für die prinzipielle Unlösbarkeit argumentiert, gleichzeitig aber dafür gesorgt, dass dieser Schwierigkeit keinerlei empirische Relevanz zukommen kann. Mit der Tanszendenz des Bewusstseins war jeder mögliche Berührungspunkt mit der kausal abgeschlossenen Welt der Materie von vorneherein unterbunden, so dass für ihn auch eine epiphänomenalistische Position ausgeschlossen sein musste: Davon, dass die Hirnphysiologie Bewusstseinsphänomene zwar verursacht, diese aber am absoluten Endpunkt der Kausalkette stehen und ihrerseits

keine Möglichkeit der Rückwirkung (willentliche Akte) haben, kann gar nicht gesprochen werden, da der Begriff der Kausalität überhaupt nur im Bereich der Materie sinnvoll verwendet werden kann.

Konsequenterweise sympathisiert du Bois-Reymond am ehesten mit der Leibnizschen Version einer prästabilierten Harmonie zwischen Geist und Körper, d.h. der These, dass beide Bereiche – subjektives Bewusstsein und materielle Vorgänge – vollkommen getrennt nebeneinander herlaufen und jeder Phänomenbereich sich aufgrund seiner inneren Einrichtung in determinierter Weise so entwickelt, dass auch ohne wechselseitige Bedingtheit sich z.B. immer dann ein subjektives Gefühl von Schmerz einstellt, wenn im Gehirn bestimmte physiologische Gegebenheiten vorliegen und umgekehrt.[257]

Der öffentlichkeitswirksamste Gegner du Bois-Reymonds, der Jenenser Zoologie-Ordinarius Ernst Haeckel, trachtete hingegen nach einer ausschließlich monistischen Erklärung der „höheren Seelentätigkeiten“, die diese mit den Funktionen der jeweils assoziierten Hirnareale gleichsetzte: „Die eigenartige Naturerscheinung des Bewußtseins ist nicht, wie du Bois-Reymond und die dualistischen Philosophen behaupten, ein völlig und ´durchaus transzendentes Problem´, sondern sie ist, wie ich stets konsequent behauptet habe, ein physiologisches Problem und als solches auf die Erscheinungen im Gebiete der Physik und Chemie zurückzuführen.“[258]

Ohne auf die Details der Begründung dieser These – sie läuft im wesentlichen auf eine psychophysische Identitätstheorie hinaus – näher einzugehen, ist auch hier der materielle Kosmos und mit ihm die subjektive Seelentätigkeit, an die deterministischen Gesetze der Mechanik gebunden und Naturerkenntnis letztlich nichts mehr als die Erklärung eines Gesamtphänomens aus der Interaktion seiner kleinsten Bestandteile. Zumindest bezüglich der Angemessenheit reduktionistischer Verfahrensweisen bestand damals wie heute unter den praktizierenden Naturwissenschaftlern kaum ein Dissens, wobei die Rechtfertigung derselben im 19. Jahrhundert auf der uneingeschränkten Gültigkeit der Newtonschen Physik beruhte. Die sich empirisch bewährende Idee kleinster Teile bildete zusammen mit den Prinzipien der Mechanik das Fundament, auf dem alle anderen empirischen Disziplinen gegründet waren und in denen insofern niemals mehr Sicherheit angetroffen werden konnte, als bereits in der Axiomatik der materiellen Basis enthalten war.

---

[257] Die hierbei oftmals gebrauchte Metapher ist die zweier Uhren, die jede für sich so kunstvoll gebaut sind, dass sie nach einer anfänglichen Synchronisierung auch ohne wechselseitige kausale Einfussnahme immer die gleiche Zeit anzeigen.
[258] Haeckel (1984), S. 234.

Diese deduktive Beziehung zwischen den Naturgesetzen der jeweiligen Basis und den theoretischen Beschreibungssystemen höherstufiger, d.h. zusammengesetzter Entitäten, ist gleichermaßen in der oben bereits dargelegten Rechtfertigung des Reduktionismus von Oppenheim und Putnam zu finden, so dass auch hier die Gesetze der Ebene der „Elementarteilchen“ sich transitiv auf alle folgenden Aggregationsstufen übertragen. Im Gegensatz zur Situation des ausgehenden 19. Jahrhunderts muss hier allerdings berücksichtigt werden, dass diese Gesetze keineswegs mehr den Charakter derjenigen der klassischen Mechanik tragen, sondern vielmehr infolge der Entwicklung der Quantentheorie einer radikalen Umgestaltung unterzogen werden mussten.

7.1 Reduktionismus und Quantenmechanik

Die Idee, eine potentielle Einheit aller empirischen Naturwissenschaften über das Verfahren schrittweiser Mikroreduktionen sicherzustellen, die schließlich alle höherstufigen Theoriebereiche auf die Gesetze der fundamentalsten Ebene, die der Elementarteilchen, zurückführen sollen, ist wie bereits dargestellt noch 1958 von Oppenheim und Puntam vertreten und systematisch begründet worden. Die Wahl der ultimativen Einheiten orientiert sich dabei an der empirischen Zergliederung der Natur, d.h. an der für das 19. Jahrhundert noch unbekannten Einsicht, dass die Atome der Stoffe wiederum aus kleineren Komponenten zusammengesetzt sind, den sogenannten Elementarteilchen, doch ist offensichtlich, dass weitere Forschungen dazu führen könnten, eine noch grundlegendere Basis des Wissenschaftssystems zu etablieren. Gegenwärtig kann man in der Physik bereits von „Subelementarteilchen“ sprechen, wobei auch für diese die Quantenmechanik zuständig ist, d.h. die prinzipiellen Eigenschaften bzw. Attribute jener Gegenstände und die zugehörigen Wechselwirkungen werden in ähnlicher Weise modelliert, wie diejenigen von Elektronen oder ganzen Atomen. Bei der hier intendierten Neubewertung des Reduktionismus kommt somit dem Problem, welche Basis des Systems jeweils zu wählen ist, weniger Bedeutung zu als dem Befund, dass man es nach heutigem Stand des Wissens generell mit quantenmechanischen Entitäten zu tun hat.

Nach Oppenheim und Putnam kann das Theoriensystem einer (Teil-) Wissenschaft B_2 auf dasjenige einer Wissenschaft B_1 reduziert werden, wenn „die Objekte des Grundbereiches von B_2 [...] Ganze [sind], die eine Zerlegung [...] in echte Teile besitzen, welche alle dem Grundbereich von B_1 angehören.“[259] Auf der niedrigsten Reduktionsstufe bietet sich somit die Idee des (Elementar-) Teilchens allein schon aus begrifflichen Gründen an, denn diese suggeriert das tatsächliche Vorliegen eines raumzeitlich objektiv existierenden Gegenstandes, dessen Eigenschaften prinzipiell unabhängig von anderen Gegenständen sind. Kann ein System, wie gefordert, in „echte Teile“ zerlegt werden, so *besteht* es letztlich nur aus „echten Teilen“, die ihre potentielle Eigenständigkeit auch innerhalb dieser Verbindung bewahren.

[259] Oppenheim / Putnam (1958) in Krüger (1970), S. 341f.

Wie wird nun der Begriff eines solchen mikrophysikalischen Objektes in der Quantentheorie behandelt und inwiefern ist dieses als Basis eines einheitswissenschaftlichen Systems zu gebrauchen?

Zunächst einmal ist es eine empirische Erfahrung, dass jedwede Wirkung, die sich im konkreten Experiment registrieren lässt, immer nur in Form diskreter Ereignisse vonstatten geht, die nahelegen, dass hier raumzeitlich lokalisierbare Entitäten am Werke sind. Beispielsweise zeigt die im Rahmen des Fotoeffektes untersuchte Wechselwirkung zwischen Licht und den Elektronen metallischer Testkörper, dass dieses Licht offenbar in Form einzelner Quanten vorliegt, die ihre Energie immer nur ganz oder garnicht übertragen. Die naheliegendste Erklärung hierfür ist die Annahme, die Strahlung „bestehe" letztlich aus einem Strom diskreter Teilchen, wobei hier bereits eine gewisse Vorsicht geboten ist, denn Licht besteht sicherlich nicht im gleichen Sinne aus Lichtquanten, wie z.B. Regen aus Regentropfen. Die meisten Physiker umgehen den unangemessenen Begriff des „Bestehens", indem sie behaupten, es *trete* immer nur in Form dieser Energiepäckchen *auf*, oder es *verhalte sich* (bei Gelegenheit einer Messung) wie ein Schauer einzelner Teilchen:

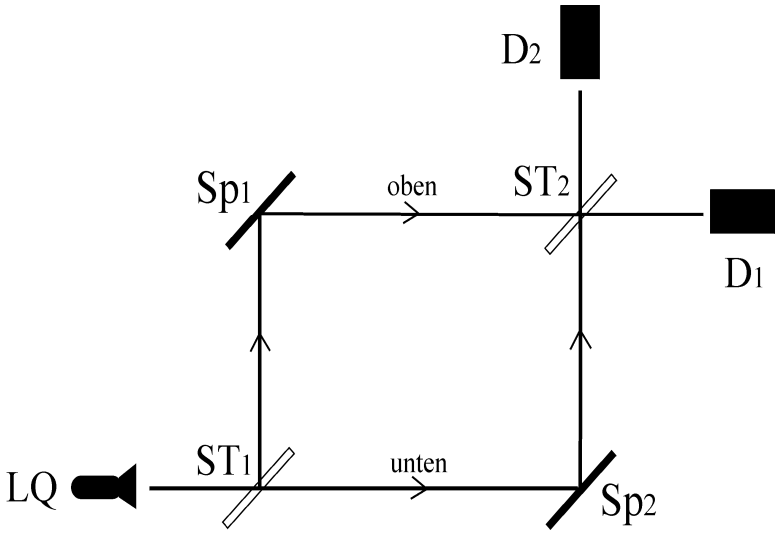
„Ich betone noch einmal, daß Licht in dieser Form – als Teilchen – auftritt. Es verhält sich genauso, wie sich Teilchen verhalten. Das müssen sich vornehmlich diejenigen unter Ihnen einprägen, die in der Schule vermutlich etwas vom Wellencharakter des Lichts erzählt bekamen. *In Wirklichkeit* aber ist das Verhalten des Lichts das von Teilchen."[260]

Verhalten ist dabei *beobachtetes* oder zumindest *prinzipiell beobachtbares* Verhalten, denn unabhängig davon kann die Idee, Licht sei an und für sich eine Ansammlung von Teilchen, nicht aufrecht erhalten werden. Beim bekannten Doppelspalt-Versuch, der mit extrem verdünntem Licht bzw. mit einzelnen Lichtquanten angestellt wird, führt die Vorstellung, dass jene Teilchen exakt definierte Trajektorien beschreiben, die *entweder* durch den einen *oder* den anderen Spalt verlaufen, bereits zur vollkommenen Unerklärlichkeit des sich einstellenden Interferenzmusters. Ein zu jeder Zeit exakt lokalisiertes Teilchen kann vernünftigerweise nur *einen* der beiden möglichen Wege wählen, doch ist die tatsächliche Wahrscheinlichkeitsverteilung der möglichen Ortslagen hinter dem Doppelspalt nur durch einen Wellenzug zu erklären, der gleichzeitig *beide* Öffungen passiert hat und anschließend „mit sich selbst" in Interferenz getreten ist. Jeder Versuch, mittels geeigneter

[260] Richard Feynman in Feynman (2004), S. 26. Kursive Hervorhebung im Original.

Detektoren herauszufinden, was in dem räumlichen Bereich zwischen der Strahlungsquelle und dem registrierenden lichtempflindlichen Film *wirklich* geschieht, ist vollkommen zum Scheitern verurteilt: Man erhält *entweder* die „Welcher-Weg-Information“ *oder* ein Interferenzmuster, aber niemals beides.

Die Aussichtslosigkeit des Unternehmens, auch ungemessenen Lichtquanten genaue räumliche Positionen zuzubilligen, kann durch andere Versuchsaufbauten noch deutlicher hervorgebracht werden, als beim ohnehin schon hinreichend irritierenden Doppelspalt-Experiment. Man betrachte z.B. die folgende Anordnung, die unter dem Namen „Mach-Zehnder-Interferometer“ bekannt ist: [261]



Sie besteht aus einer Lichtquelle (LQ), zwei Strahlteilern[262] (ST_1, ST_2), zwei Spiegeln (Sp_1, Sp_2) und zwei Detektoren (D_1, D_2). Lässt man einen monochromatischen und kohärenten Lichtstrahl (z.B. Laserlicht) in die Apparatur eintreten, so wird dieser an HS_1 in zwei Teilstrahlen aufgespalten und verläuft auf beiden Wegen zum zweiten Strahlteiler, von dem aus sowohl zu D_1 als auch zu D_2 überlagertes Licht beider Teilstrahlen gelangt. Welchen Weg das Licht, das die Detektoren erreicht, jeweils genommen hat, lässt sich in folgender Weise aufschlüsseln:

[261] Diese Apparatur wurde gegen Ende des 19. Jahrhunderts von dem Züricher Physiker Ludwig Zehnder und – davon unabhängig – von dem Prager Physiker Ludwig Mach, dem Sohn Ernst Machs, entworfen.
[262] Ein Strahlteiler ist in der Regel ein „halbversilberter“ Spiegel, der die eine Hälfte des auftreffenden Lichts reflektiert und die andere Hälfte auf geradem Wege hindurchlässt.

	Zielort: Detektor Nr. 1	Zielort: Detektor Nr. 2
Weg „oben“:	1.) Reflektion an HS_1	1.) Reflektion an HS_1
	2.) Reflektion an Sp_1	2.) Reflektion an Sp_1
	3.) Transmission durch HS_2	3.) Reflektion an HS_2
Weg „unten“:	1.) Transmission durch HS_1	1.) Transmission durch HS_1
	2.) Reflektion an SP_2	2.) Reflektion an SP_2
	3.) Reflektion an HS_2	3.) Transmission durch HS_2

Man sieht, ohne dass hier auf technische Details der exakten Berechnung eingegangen werden soll, dass das Licht, welches zu Detektor 1 gelangt ist, auf beiden seiner Wege (oben vs. unten) ein „ähnliches Schicksal“ erleiden musste: Es wurde jeweils einmal an einem Strahlteiler reflektiert, jeweils einmal durch einen Strahlteiler hindurchgelassen und jeweils einmal an einem Spiegel reflektiert, wobei hierbei die etwas veränderte Reihenfolge der Ereignisse keine Rolle spielt. Wenn das Interferometer „wohljustiert“ ist und die durchlaufenen Wege die gleiche Länge[263] aufweisen, so erreichen D_1 zwei Teilwellen, die die gleiche Phasenlage[264] haben und sich konstruktiv wieder zum ursprünglichen, d.h. ungeteilten Lichtstrahl überlagern. Der Lichtstrahl kommt in Richtung des Detektors D_1 genauso aus der Apparatur wieder heraus, wie er hineingegangen war.

Die offensichtlichen Unterschiede in den Wegen der Teilstrahlen, die zum Detektor 2 gelangen, führen hingegen, ohne dies hier weiter zu begründen, zu einer Phasenverschiebung von 180 Grad zwischen den Wellen beider Lichtwege, d.h. die Wellenzüge überlagern sich hier derart, dass stets ein Wellental auf einen Wellenberg trifft und umgekehrt. In der Summe stellt sich eine vollständige destruktive Interferenz ein, die zur Folge hat, dass D_2 überhaupt kein Licht erreicht.

In Analogie zu den Doppelspalt-Versuchen oder den Arbeiten mit optischen Polarisationsfiltern, kann man auch hier die Frage stellen, welche Auswirkungen es hätte, wenn die Lichtquelle so stark abgeschwächt würde, dass mit großer Wahrscheinlichkeit immer nur einzelne Lichtquanten in der Apparatur angetroffen werden könnten. Mustert man dabei die einzelnen Komponenten des Aufbaus im einzelnen, so sind die

[263] Es ist nicht unbedingt erforderlich, dass beide Wege exakt gleich lang sind, sondern lediglich, dass ihre *Differenz* ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge des verwendeten Lichts ausmacht. „Gleiche Länge“ ist ein Sonderfall dieser Bedingung.

[264] „Gleiche Phasenlage“ bedeutet, dass Wellenberge auf Wellenberge und Wellentäler auf Wellentäler treffen.

interessantesten Punkte sicherlich die beiden Strahlteiler. An diesen wird bekanntlich ein Lichtstrahl in zwei gleiche Teilstrahlen von jeweils halber Intensität zerlegt, aber was geschieht, so könnte man fragen, im Falle der Ankunft eines einzelnen Lichtquants? Spaltet dieses sich auch in zwei Teilquanten auf und beschreitet beide Wege? Man kann entsprechende Detektoren nutzen, um dies in Erfahrung zu bringen, und es zeigt sich, dass die Quanten keineswegs aufgeteilt werden, sondern immer nur unversehrt und ungespalten *einen* der beiden möglichen Wege „wählen“ und das mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 50%. Dass sich im Einzelfall auf keine denkbare Weise vorhersagen lässt, welche Richtung ein gegebenes Quant an einem Strahlteiler tatsächlich einschlagen wird, dürfte denjenigen, der bereits mit ähnlich gelagerten Fällen (z.B. dem Verhalten an Polarisationsfiltern) bekannt gemacht wurde, kaum mehr verwundern. Die anderen Komponenten des Experiments, d.h. die beiden Spiegel (S_1 und S_2), sind insofern unproblematisch, als sie im Idealfall 100% des Lichts reflektieren und demnach auch alle Quanten dem erzwungenen Richtungswechsel Folge leisten müssen.

Ausgestattet mit diesen Informationen über das Verhalten einzelner Quanten an den Strahlteilern und den Spiegeln, könnte man nun versuchen, den Ausgang eines entsprechenden, mit extrem verdünntem Licht bzw. einzelnen Lichtteilchen durchgeführten Experiments vorherzusagen, ohne auf den vermeintlich antiquierten Begriff der Welle zurückzugreifen: Am ersten Teiler ist die Wahrscheinlichkeit für jeden der beiden Wege 50%. Am zweiten Teiler befinden sich die Lichtquanten in der gleichen Situation; 50% werden reflektiert und 50% transmittiert, so dass rein rechnerisch an jedem der Detektoren die Hälfte aller in den Apparat eingetretenen Teilchen ankommen müsste und das im Gegensatz zur wellentheoretischen Vorhersage, die bekanntlich D_2 vollkommen leer ausgehen lässt. Welche Deutung ist nun die richtige? Es erweist sich hier ebenso wie im Doppelspalt-Versuch, dass die Lichtquanten sich hinsichtlich der Verteilung möglicher und unmöglicher Orte wie eine Welle verhalten, die den ganzen Versuchsaufbau, d.h. beide Wege gleichzeitig durchmessen muss, um zu „wissen“, welcher Detektor erreicht werden kann und welcher nicht. Nur so lässt sich erklären, dass de facto *keines* der Teilchen in D_2 ankommt, auch wenn sichergestellt ist, dass sich zu jeder Zeit nur maximal ein einziges Quant in der Apparatur aufhält. Aber auch in diesem Fall ist man versucht zu fragen, was denn hier *wirklich* geschehe. Lässt sich nicht gleichzeitig herausfinden, welchen der beiden Wege ein Quant tatsächlich einschlägt *und* dabei eine Interferenz beobachten, d.h. in einer

langen Reihe von Versuchen feststellen, dass D_2 niemals erreicht wird? Die Theorie verbietet es, und die Praxis hat keine Möglichkeit gefunden, dieses Verbot zu umgehen. Welcher-Weg-Information und Interferenz sind niemals gleichzeitig zu haben, da sie komplementäre Experimentalsituationen erfordern; und es ist dieser Umstand, der es nach Bohr letztlich verhindert, dass Wellen- und Teilchenbild in direkten Konflikt geraten. Was jenseits dieser Bilder wirklich am Werke ist, lässt sich nicht sagen, doch scheint die *ganze* Apparatur, d.h. auch die Wege, von denen man annehmen muss, dass sie gar nicht eingeschlagen wurden, für das Phänomen verantwortlich zu sein. Dass diese Ganzheitlichkeit auch experimentell zu vollkommen kontraintuitiven Resultaten führen kann, soll der folgende Fall verdeutlichen:

In den oberen der beiden Wege wird eine lichtundurchlässige Barriere eingebracht. Wie zu erwarten, kommen nur noch die Hälfte der Lichtquanten aus der Apparatur wieder heraus, d.h. diejenigen 50%, die am ersten Strahlteiler den oberen Weg eingeschlagen haben, werden von der Barriere absorbiert und gehen verloren. Erstaunlicherweise erreichen aber von den 50%, die den unteren Weg „gewählt“ haben (und diesen mussten sie ja wählen, um überhaupt herauskommen zu können), wiederum die Hälfte den ehemals verbotenen Detektor 2, d.h. die destruktive Interferenz, die dies vorher verhindert hatte, ist nicht mehr vorhanden! In raumzeitlichen Bildern gesprochen, sieht man sich mit der verblüffenden Konsequenz konfrontiert, dass das Verhalten der Lichtquanten am letzten Strahlteiler von der Blockade eines Weges abhängen muss, den sie nachweislich nicht genommen haben!

Es mag nur als zusätzliche Verschärfung des Problems angeführt werden, dass die tatsächliche Länge dieser Wege keine Rolle spielt. Das Interferometer könnte sich (zumindest theoretisch) über riesige Distanzen erstrecken. Was immer in dieser Apparatur „herumspukt“ – es ist offenbar über alle relevanten Teile derselben augenblicklich „informiert“. Dass hier der Begriff des „augenblicklichen“ bzw. des „instantanen“ tatsächlich nicht überzogen ist, lässt sich sogar im Experiment erweisen. Es wird später darauf zurückzukommen sein.

Im Mach-Zehnder-Interferometer hat man es im Rahmen jeder Messung mit einzelnen Quanten zu tun, deren Verhalten aber von der ganzen Apparatur in einer Weise abhängt, die Zweifel daran aufkommen lässt, ob die beliebig großen räumlichen Distanzen für das eigentliche Quantenobjekt, was immer es auch sein möge, überhaupt vorhanden sind. Identifiziert man dieses Objekt mit seiner mathematischen Beschreibung, d.h. mit einer

entsprechenden Schrödingerschen Ψ-Funktion, so ist das nicht-lokale Verhalten der Lichtquanten eine unmittelbare Konsequenz des Formalismus. In diesem ist nur derjenige Rest der *Differenz* beider Wege von Interesse, der bei einer Division derselben durch die Wellenlänge des verwendeten Lichts noch übrig bliebe, oder anders ausgedrückt: Es ist nur die durch unterschiedliche Weglängen verursachte *Phasenverschiebung* von Belang und nicht die absolute Größe der Strecken.

Es ist offensichtlich, dass man die Vorstellung, das Verhalten des Lichts gleiche im wesentlichen demjenigen materieller Korpuskeln, nur auf die diskreten Ereignisse in der jeweiligen Beobachtungssituation beziehen kann, und streng genommen noch nicht einmal auf diese, denn auch im Messprozess selbst verhindert die Unbestimmtheitsrelation Heisenbergs die gleichzeitige Kenntnis derjenigen Attribute des vermeintlichen Teilchens, deren *gemeinsame* Kenntnis erst den mechanischen Zustand eines klassischen Körpers eindeutig festlegen würde. Es sind diese auch heute noch irritierend wirkenden Paradoxien, die den Realisten Einstein Zeit seines Lebens beschäftigten und die bis heute nichts von ihrer Aktualität verloren haben: "Die ganzen 50 Jahre bewusster Grübelei haben mich der Antwort auf die Frage: ´Was sind Lichtquanten?´ nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich."[265]

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass Lichtquanten keine Sonderrolle spielen hinsichtlich der Schwierigkeiten zu verstehen, was sie eigentlich sind. Die de Broglieschen Wellenlängen von Atomen oder ganzen Atomgruppen, die im Gegensatz zu den Konstituenten elektromagnetischer Strahlung eine von Null verschiedene Ruhemasse aufweisen, sind zwar um etliche Größenordnungen kürzer, als die des sichtbaren Lichts, doch zeigen auch diese vermeintlich massiven Objekte eindeutige Interferenz-eigenschaften, die keinesfalls mehr mit dem Konzept eines klassischen Teilchen zu vereinbaren sind. Will man diese Phänomene zur Darstellung bringen, so benötigt man Doppelspalte oder sogenannte Beugungsgitter[266], die viel kleiner sind, als diejenigen, welche im optischen Experiment zur Anwendung kommen. Die größten materiellen Strukturen, die man bisher zur Interferenz bringen konnte, sind sogenannte C_{60}-Moleküle,

---

[265] Brief von Albert Einstein an Michele Besso vom 12.12.1951. Zitiert nach Kanitscheider (1988), S. 58.

[266] Ein Beugungsgitter besteht im Gegensatz zum Doppelspalt aus sehr vielen Spalten. Trifft ein ebener Wellenzug auf ein solches Gitter, so geht von jeder Öffnung eine Sekundärwelle aus, und die Superposition aller Sekundärwellen erzeugt wiederum ein bestimmtes Interferenzmuster. Lichtquanten oder „materielle Teilchen", die an einem Gitter solche Muster produzieren, müssen in gewisser Weise durch alle Spalten gleichzeitig hindurchgehen.

d.h. Verbindungen aus 60 (!) Kohlenstoffatomen, die in ihrer dreidimensionalen Anordnung der aus fünf- und sechseckigen Flächen zusammengesetzten Struktur eines Fußballs ähneln.[267] Diese Objekte sind über eine Million mal schwerer, als ein Elektron und zeigen eindeutig die von der Quantentheorie vorhergesagten Welleneigenschaften. Gegenwärtig konzentrieren sich einige Forschergruppen darauf, immer größere Objekte zur Interferenz zu bringen, was allerdings immer trickreichere Experimentalaufbauten erfordert. Ob hier eine Obergrenze existiert, an welcher die Quantentheorie ihre Vorhersagekraft einbüßt und ab der die Gegenstände sich schließlich so verhalten, wie man es im alltäglichen Kontext von ihnen erwarten sollte, ist eine offene Frage. Die deBroglie-Wellenlängen makroskopischer Objekte wären jedenfalls so unvorstellbar klein, dass keine gitter- oder spaltenartige Strukturen mehr existierten, an denen sich mögliche Interferenz-effekte zeigen könnten. Theoretisch wäre es möglich, auf diese Weise ein scheinbar klassisches Verhalten mit der Quantentheorie in Einklang zu bringen, doch herrscht über diese Fragen auch unter den Physikern noch keine Einigkeit.

Diese prinzipielle Nicht-Lokalität, die bereits ein Grundcharakteristikum einfachster Quantenobjekte zu sein scheint, verstärkt sich noch, wenn man es mit vermeintlich zusammengesetzten Systemen zu tun hat. Die infolge der Entdeckung der Bellschen Ungleichung angestellten Experimente zeigen eindeutig, dass die quantenmechanische Verschränkung zweier Teilchen viel mehr ist, als eine rein summarische Zusammen-setzung eigenständiger Komponenten. Das Ganze ist mehr, als die Summe der Teile, oder, falls man Wert darauf legt, es weniger emphatisch auszudrücken: Das durch die Schrödinger-Funktion vertretene Gesamtsystem kann in einem quantenmechanisch maximal bestimmten Zustand sein, ohne dass die betreffenden Teilsysteme dies sind, und dies gilt für alle jemals in Wechselwirkung gestandenen Systeme solange, bis ein mysteriöser Messakt die Verschränkung auflöst. Das größte und bislang ungelöste Rätsel der Quantentheorie besteht nun darin, zu verstehen, was dieses Kollabieren der Wellenfunktion tatsächlich verursacht, denn dass ein Apparat, den man vielleicht ein „Messgerät“ zu nennen geneigt ist, sich als ein solches auszeichnet, obwohl er doch letztlich aus der selben Materie besteht, wie die zu messenden Objekte und mit diesen eigentlich nur in eine weitere, sozusagen komplexere Verschränkung geraten müsste, statt ein eindeutiges Resultat zu liefern, ist letztlich vollkommen unverstanden.

---

[267] Vgl. Zeilinger (2003), S. 26-29 und 102 ff.

Wenn man nun versucht, den quantenphysikalischen Begriff eines Elementarteilchens daraufhin zu untersuchen, inwieweit er als Basis eines reduktionistischen Systems der Wissenschaft dienen könnte, so sieht man sich mit den größten Schwierigkeiten konfrontiert. Zunächt einmal sind diese Teilchen keine eigenständigen Entitäten, sondern vielmehr nur Erscheinungsformen oder Attribute eines zugrundeliegenden Prozesses, der zwar mathematisch modelliert, aber nicht mehr räumlich angeschaut werden kann. In der gegenwärtigen Theorie dient dieser Prozess, dessen zeitliche Evolution mittels einer Schrödingerschen Wellenfunktion beschrieben wird, zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit, im Rahmen einer zukünftigen Messung für ein ausgewähltes dynamisches Attribut einen bestimmten Wert zu erhalten, wobei die Erwartungskataloge sogenannter konjugierter Paare von Attributen wie z.B. „Ort / Impuls“ oder „Energie / Zeit“ in einem reziproken Verhältnis stehen, dergestalt, dass die vollkommen sichere Vorhersage der einen Größe die gänzliche Unbestimmtheit der jeweils anderen zur Folge hat und umgekehrt. Auch ohne die Frage zu berühren, warum das mathematische Spiel der Möglichkeiten überhaupt irgendwo (z.B. in einem Messgerät) zu einer manifesten Wirklichkeit wird, und welche Rolle dabei der Beobachter oder das vom Beobachter geschaffene experimentelle Umfeld spielt, ist offensichtlich, dass die Konstruktion autonomer Teilchen allein schon daran scheitert, dass immer und mathematisch notwendig wesentliche Bestimmungsstücke derselben fehlen.

Die dem Alltagsverstand entlehnte Idee, das Verhalten zusammengesetzter Systeme aus den Verhaltensweisen ihrer Komponenten begreiflich zu machen, bedient sich unausgesprochen des Anschauungsraumes und des Kausalitätsideals der klassischen Mechanik. Was an einem gegebenen Ort geschieht, muss eine zureichende lokale Ursache haben und für jedwede Kette von Ursachen und Wirkungen existiert eine maximale und endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit, die es überhaupt erst gestattet, zwischen Ursachen und Wirkungen in zeitlicher Hinsicht zu unterscheiden. Die wichtigste Intuition ist dabei die Separierbarkeit von Elementen, d.h. die Vorstellung, dass es überhaupt klassische Gegenstände an und für sich gibt, die intrinsische Eigenschaften unabhängig vom Vorhandensein anderer Objekte besitzen, so dass über Naturgesetze, die die Wechselwirkungen dieser Eigenschaften in zusammengesetzten Systemen betreffen, die zeitliche Evolution komplexer Anordnungen eindeutig verstanden und vorhergesagt werden kann. Auch in der klassischen Physik war diese Idee streng genommen ein niemals zu

erreichendes Ideal, doch erlaubten es die unterschiedlichen Dimensionen physikalischer Einflüsse in der Regel, zwischen wesentlichen und unwesentlichen Faktoren zu unterscheiden und z.B. in der mathematischen Behandlung eines mechanischen Getriebes (z.B. eines Uhrwerks) die Reibung zwischen den Komponenten – die störenden Einflüsse der Luft, die Gravitationskraft der Erde, den Impulseintrag kosmischer Strahlung usw. – zu vernachlässigen, da sie in Relation zu den in der Rechnung vorkommenden mechanischen Kräften von verschwindender Größenordnung sind. Es konnte jedoch kein Zweifel daran bestehen, dass derjenige, der *restlos alle* Bewegungen der kleinsten materiellen Teile des Kosmos kennte, es in deren jeweiligen Interaktionen ausschließlich mit der mathematischen Idealgestalt selbst zu tun hätte, so dass er, ohne weitere Störfaktoren berücksichtigen zu müssen, aus der konsequenten Anwendung einfachster Bewegungsgleichungen das Verhalten aller zusammengesetzen Systeme und letztlich sogar dasjenige des größten dieser Objekte, des gesamten Universums, mit vollkommener Sicherheit berechnen könnte. Wenn es also nach dieser Idee möglich war, ausgehend von der materiellen Basis der kleinsten Teile alle höherstufigen Gegenstände deduktiv zu konstruieren, so musste auch das umgekehrte Verfahren, die Dekomposition komplexer Objekte in ihre ulitmativen Konstituenten, die einzig legitime und sichere Methode wissenschaftlicher Erkenntnis sein.

Die Quantenmechanik führt nun zu einer erstaunlichen Einsicht, die dazu geeignet ist, die Durchführbarkeit des mikroreduktionistischen Programmes gleichsam in ihren Grundfesten zu erschüttern und die man, wenn es darum ginge, sie auf eine schlagwortartige und etwas vereinfachte Formel zu bringen, auch so ausdrücken könnte: *Die kleinsten Einheiten der Materie im Sinne der klassischen Physik gibt es nicht!* Es gibt zwar etwas, das den Eindruck erweckt, an ihre Stelle treten zu können, doch dieses „Etwas“ offenbart in seinen Eigenschaften, wenn man es nach den Maßstäben der klassischen Mechanik bewerten müsste, nur die Hälfte derjenigen Attribute, deren es zu einer vollständigen Hypostasierung bedürfte. Die genauen Beträge, die man, abgesehen von sogenannten „reinen Fällen“, im Zuge eines Messaktes erhält, sind nur mittels einer Wahrscheinlichkeitsverteilung vorherzusagen, und diese Verteilung hängt zu allem Übel noch nicht einmal von den lokalen Bedingungen am Messpunkt ab, sondern kann in nicht zu vernachlässigender Weise und ohne zeitlichen Verzug von den Verhältnissen in beliebig weit entfernten Regionen des empirischen Raumes beeinflusst werden.

Die Zusammensetzung dieser grundsätzlich nicht-lokalen Entitäten führt zu Systemen, die mehr sind als die Summe ihrer Teile und die einen ganzheitlichen oder *holistischen* Charakter offenbaren. Es ist zwar immer möglich, eine dieser Komponenten isoliert zu betrachten bzw. zu vermessen, doch ist deren Verhalten untrennbar an das Schicksal aller anderen Bestandteile gebunden, unabhängig davon, über welche räumlichen Distanzen sich das System erstreckt. Dieses verhält sich, wie ein *einziges* Quantenobjekt. Ist von diesem die maximal mögliche Kenntnis vorhanden, so ist diejenige der Komponenten notwendig unter-maximal. Versucht man nun, das Wissen über einen der Teile zu maximieren, so ist das System nicht mehr vorhanden. Eine Zerlegung des Systems „erklärt“ nicht das Verhalten des Systems aus seinen Konstituenten, sondern zerstört unwiederbringlich das System, und man weiß nicht mehr, was man eigentlich „erklären“ wollte.

Vor dem Hintergrund dieser Befunde ist der Versuch, die Einheit der Wissenschaften über das Verfahren der Mikroreduktion sicherstellen zu wollen, ein aussichtsloses Unterfangen. Wie zur Mitte des 20. Jahrhunderts „Elementarteilchen“ noch ernsthaft als Kanditaten für echte Teile höherstufiger Systeme gehandelt werden konnten, ist angesichts der quantenmechanischen Umgestaltung dieses Begriffes kaum nachzuvollziehen. Gleichwohl bedarf der unbestreitbare Erfolg dieser Methodologie einer Erklärung, die wiederum auf das Problem hinausläuft, an welcher Stelle die Gesetze des Mikrokosmos annähernd in diejenigen der klassischen Mechanik übergehen und bis zu welcher unteren Grenze zusammengesetzte Systeme tatsächlich nicht mehr zu sein scheinen, als die Summe ihrer Teile. Es ist aber zu vermuten, dass die Quantentheorie trotz ihrer oftmals kontraintuitiven Beschreibungen des Mikrokosmos und trotz der noch ungelösten Interpretationsprobleme eher in der Lage ist, das Wesen der Realität zu erfassen, als noch die Physik des 19. Jahrhunderts. Diese hatte in ihrer Degradierung des Universums zu einem deterministischen Spiel der Atome keinen Raum mehr gelassen für sogenannte *emergente* Phänomene, d.h. solche Erscheinungen, die aus der puren mechanischen Interaktion der Atome schlechterdings nicht zu erklären sind. Man kann mit einem gewissen Recht die These vertreten, dass die Ausbildung des subjektiven Bewusstseins, obwohl diese nach der üblichen Rekonstruktion der Naturgeschichte eine vergleichsweise späte Entwicklungsstufe markiert, der Inbegriff der Emergenzphänomens schlechthin ist, welches mit einem Schlage die unterschiedlichsten intrinsisch sinnlosen materiellen Strukturen mit einer qualitativen Bedeutsamkeit versieht, die etwa eine Mischung niederfrequenter

Luftdruckschwankungen zu einer Bachschen Fuge und die „Einschläge“ unzähliger Lichtquanten auf der Retina des Auges zum Licht- und Schattenspiel eines abendlichen Bergpanoramas werden lässt.

Auf die gleichwohl spekulativen Beziehungen, die zwischen dem quantentheoretischen Modell der Realität und der Emergenz des phänomenlaen Bewusstseins bestehen könnten, wird noch gesondert einzugehen sein, doch muss bereits an dieser Stelle mit Nachdruck darauf hingewiesen werden, dass der Kern des du Bois-Reymondschen *Ignorabimus* davon nicht im geringsten berührt wird. Schlechterdings *jede* Theorie der Welt ist immer nur Objekt und setzt das Subjekt als Bedingung ihrer Möglichkeit voraus. Aus der Sphäre dieser subjektbedingten Objektivität führt kein denkbarer Weg zur Erklärung der Subjektivität selbst, deren Gegenstand sie ist; auch wenn naturalistische und reduktionistische Bestrebungen in der jüngeren Neurophysiologie diese *analytische Wahrheit* als empirische Unwissenheit verkaufen wollen, die angesichts der Entwicklung immer besserer Forschungsmethoden (nicht-invasive bildgebende Verfahren etc.) in naher Zukunft zu beheben sein werde. Dennoch bietet die von der Quantentheorie modellierte Version einer physikalischen Realität entscheidende Vorteile gegenüber dem Weltsystem der klassischen Mechanik, insofern sie die Entstehung holistischer Systeme und emergenter Eigenschaften nicht mehr als naturwissenschaftliche Unmöglichkeit deklariert: Ein komplexes Netzwerk von Neuronen *kann* bei Gelegenheit eines bestimmten globalen Aktivitätsmusters von einem seiner Natur nach nicht-lokalen subjektiven Bewusstseins-zustand begleitet sein, der keineswegs ein Epiphänomen desselben ist, sondern vielmehr eine auf ihre Komponenten nicht mehr reduzierbare und auf diese insgesamt zurückwirkende Form. Und ein Lebewesen *kann*, nicht nur in der Zuschreibung eines beobachtenden und wertenden Subjekts sondern als vermeintliche Summe materieller Bestandteile, in einem von der klassischen Mechanik ausgeschlossenen Sinne *mehr* sein als diese Summe, d.h. eine globale und funktional unzerteilbare Form ausbilden, die auf die stofflichen Bedingungen ihrer jeweiligen Manifestation stabilisierenden Einfluss nimmt.

Es liegt nun nahe, diese gleichsam zu neuem Leben erweckte Dichotomie von Stoff und Form mit den beiden grundlegenden Elementen der quantentheoretischen Dynamik zu identifizieren, der mit der Schrödingergleichung gegebenen zeitlichen Evolution der Möglichkeiten und der im diskontinuierlichen Messakt sich vollziehenden

Konkretisierung, d.h. des Übergangs vom Potenziellen zum Aktualen. Im oben vorgeführten Beispiel des Mach-Zehnder-Interferometers bestimmt die nicht-lokale, über die Verhältnisse in der gesamten Apparatur instantan „informierte“ Wellenfunktion die Wahrscheinlichkeitsverteilung der möglichen Messergebnisse an den beiden Detektoren. Sie ist die übergeordnete Form, die die Aktualisierung ihrer Teile auf subtile Weise beeinflusst und im Extremfall der vollständigen (destruktiven oder konstruktiven) Interferenz sogar eindeutig determiniert.

Gleichwohl unterliegt die Situation einer nicht zu umgehenden Komplementarität, die sich darin äußert, dass der Versuch, den genauen Weg eines Lichtquants zu verfolgen, was allein eine raumzeitlich-kausale Beschreibung des Systems ermöglichen würde, die unmittelbare Zerstörung des Interferenzmusters nach sich ziehen muss. Oder anders ausgedrückt: Die Untersuchung der Frage, *warum* Detektor Nr. 2 kein Licht erreicht, setzt voraus, auf die Welcher-Weg-Information und auf den Begriff einer determinierten Trajektorie überhaupt zu verzichten. Andererseits würde der Versuch einer experimentellen Verfolgung der Wege der Lichtquanten, die zu einer raumzeitlich-kausalen Beschreibung der Vorgänge vonnöten wäre, den Effekt, den es ursprünglich zu erklären galt, d.h. denjenigen, dass an D_2 kein Licht ankommt, vollkommen zum Verschwinden bringen.

Die sich in der Beschreibung atomarer Systeme andeutende Komplementarität lässt sich in gewisser Weise auf höherstufige emergente Systeme übertragen, und es war kein geringerer als Niels Bohr selbst, der in der Anwendung dieses Begriffes auf biologische Organismen die Möglichkeit einer Versöhnung reduktionistischer und holistischer Erklärungsmodelle erblickte: „Wenn wir also imstande wären, die Analyse des Mechanismus der lebenden Organismen ebensoweit zu treiben wie die Analyse der Atomphänomene, so könnten wir kaum erwarten, ein Verhalten zu finden, das irgendwie von dem der anorganischen Stoffe abweicht. In diesem Dilemma müssen wir jedoch daran denken, daß die Bedingungen bei biologischen und physikalischen Untersuchungen nicht unmittelbar miteinander verglichen werden können, da die Notwendigkeit, das Untersuchungsobjekt am Leben zu halten, für jene eine Einschränkung bedeutet, die bei diesen kein Gegenstück aufzuweisen hat. So würden wir zweifellos ein Tier töten, wenn wir versuchten, eine Untersuchung seiner Organe so weit durchzuführen, daß wir den Anteil der einzelnen Atome an den Lebensfunktionen angeben könnten. In jedem Versuch an lebenden Organismen muß daher eine gewisse Unsicherheit in bezug auf die

physikalischen Bedingungen, denen sie unterworfen sind, bestehen bleiben; und es drängt sich der Gedanke auf, daß die geringste Freiheit, die wir in dieser Hinsicht den Organismen zugestehen müssen, gerade groß genug ist, um ihnen zu ermöglichen, ihre letzten Geheimnisse gewissermaßen vor uns zu verbergen. […]
Ich will […] hervorheben, daß der Kern der erwähnten Analogie das typische Komplementaritätsverhältnis ist, das zwischen der für jede physikalische Analyse erforderlichen Unterteilung einerseits und charakteristischen biologischen Phänomenen wie Selbsterhaltung und Fortpflanzung der Individuen andererseits besteht. Dieser Sachverhalt bringt es ja auch mit sich, daß der Begriff der Zweckmäßigkeit, der in der mechanischen Analyse keinen Platz hat, einen gewissen Anwendungsbereich bei Problemen findet, wo Rücksicht auf die Kennzeichen des Lebens genommen werden muß. In dieser Hinsicht erinnert die Rolle der teleologischen Argumente in der Biologie an die im Korrespondenzprinzip formulierten Bestrebungen, das Wirkungsquantum in der Atomphysik auf rationale Weise in Betracht zu ziehen.“[268]

Die hier von Bohr intendierte Idee komplementärer Beschreibungssysteme steht in gewisser Analogie zur Situation, in der sich ein Physiker befände, der eine Antwort auf die Frage nach dem Wesen des Lichts zu geben hätte. Der Dualismus von Welle und Teilchen offenbart sich hier in der Notwendigkeit, zwei gleichermaßen unerlässliche gedankliche Konzeptionen verwenden zu müssen, deren unmittelbarer Widerspruch durch die Unmöglichkeit verhindert wird, in ein und demselben experimentellen Aufbau beide gleichzeitig zur Darstellung zu bringen. Keine der beiden Perspektiven kann auf die jeweils andere reduziert werden und beide sind gleich ursprünglich. Es liegt somit nahe, „die spezifisch biologischen Gesetzmäßigkeiten als Naturgesetze zu betrachten, komplementär zu jenen, die für eine Beschreibung der Eigenschaften unbelebter Körper geeignet sind, ganz in Analogie zu der komplementären Beziehung zwischen den Stabilitätseigenschaften der Atome und solchen Phänomenen, für deren Beschreibung eine raumzeitliche Koordinierung der einzelnen atomaren Teilchen in Betracht kommt. In diesem Sinne dürfte die Existenz des Lebens sowohl bezüglich Definition als Beobachtung in der Biologie als eine gegebene Voraussetzung, die nicht weiter begründet werden kann, angesehen werden, in gleicher Weise wie die Existenz des Wirkungsquantums zusammen mit der atomistischen Struktur der Materie die elementare Grundlage der Atomphysik bildet.“

[268] Bohr (1958), S. 9 ff.

Bohr weist jedoch ausdrücklich darauf hin, dass dieses Komplementaritätsverhältnis in der wissenschaftlichen Beschreibung der belebten Natur keinesfalls zur Ausbildung eines neuartigen szientistischen Mystizismus dienen soll, sondern, wie im Bereich der atomaren Phänomene, lediglich Ausdruck der Situation ist, dass schlechterdings unüberwindliche Grenzen hinsichtlich der Anwendbarkeit raumzeitlich-kausaler Begriffe existieren, die gewissermaßen mit den Grenzen mechanizistisch-reduktionistischer Methodologien zusammenfallen. Genau in der gleichen Weise, wie Atome keine „Dinge“ sind, sind Lebewesen keine reinen Mechanismen. Die Methoden der Beobachtung selbst, die darauf abzielen würden, bis in das Verhalten des kleinsten Biomoleküls eine durchgängige raumzeitliche Beschreibung der Vorgänge zu liefern, sind mit der gleichzeitigen Beobachtung eindeutiger Determiniertheit grundsätzlich unvereinbar.

7.2 Determinismus, Indeterminismus und das Problem des freien Willens

Im Rahmen der klassischen Mechanik begegnete das materielle Universum dem Physiker als naturgesetzlich determiniertes Getriebe kleinster Korpuskeln, in welchem jeder Zustand als notwendige Folge des jeweils vorhergehenden Zustandes betrachtet werden muss, dergestalt, dass mit der ersten Konfiguration der Massenverteilung im Raume und den jeweiligen Geschwindigkeiten dieser Teile, wo immer sie auch herrühren mochten, die zeitliche Evolution dieses Systems bis in alle Ewigkeit festgelegt war: „Wir müssen also den gegenwärtigen Zustand des Weltganzen als die Wirkung eines früheren und als die Ursache des folgenden Zustandes betrachten“, schrieb zu Beginn des 19. Jahrhunderts der französische Mathematiker Pierre Simon de Laplace. „Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kennte, und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts würde ihr ungewiß sein und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen.“[269]

Es ist nachvollziehbar, dass ein menschlicher Naturforscher, der nur über eine endliche Menge an Information verfügen kann und dessen mathematische Möglichkeiten ebensosehr begrenzt sind, sich in einer ungleich schwierigeren Situation wiederfände als jener „Laplacesche Dämon“, doch wäre diese vermeintliche Begrenzung der Welterkenntnis lediglich den Unzulänglichkeiten des erkennenden Subjekts zuzuschreiben und nicht einer prinzipiellen Unberechenbarkeit der Natur. Diese Idee der durchgängigen Determiniertheit des materiellen Kosmos findet sich auch schon bei Descartes, wobei bereits dieser sich mit dem Dilemma konfrontiert sah, entweder der menschlichen Seele, die ja selbst kein körperliches Prinzip ist, die Möglichkeit willentlicher Einflussnahmen auf ihren jeweiligen Leib abzusprechen, oder im Bereich des Gehirns eine explizite Verletzung der eigens formulierten Gesetze der Bewegungserhaltung zuzulassen. Um der alltäglichen Erfahrung gerecht zu werden, dass Willensakte sehr wohl dazu hinreichen, den eigenen Körper in Bewegung zu versetzen, entschied sich Descartes bekanntlich zu der inkonsequenten These, dass zwar die Seele keine *neue* Bewegung im Gehirn erzeugen könne, sie aber durchaus in der Lage sei, bereits *vorhandene* stoffliche Ströme in ihrer

[269] Laplace (1932), S. 1 f.

Richtung umzulenken. Die Erkenntnis, dass es selbst zum Zwecke dieser „Umlenkung“ einer Bewegung bedarf – die Begriffe des mechanischen Impulses und der Energie waren noch nicht entwickelt –, brachte die Cartesianer der ersten Generation bereits dazu, im wahrsten Sinne des Wortes einen *deus ex machina* zu bemühen, d.h. anzunehmen, dass bei jeder Gelegenheit des Wollens nicht die Seele in das Getriebe des Körpers eingreife, was sie aus prinzipiellen Gründen gar nicht in der Lage zu leisten ist, sondern Gott selbst die Güte besitzen müsse, dies zu bewirken.

Die fehlende Erklärung der Wechselwirkung zwischen Körper und Geist war eine der größten Schwachpunkte des Cartesischen Substanzdualismus und die großen Fortschritte im Bereich der Physik führten schließlich zur Formulierung universeller Erhaltungssätze, von denen niemand mehr ernsthaft anzunehmen bereit war, dass diese im menschlichen Gehirn durch das gespenstische Walten des Geistes außer Kraft gesetzt werden könnten. Im Gegenteil schien immer mehr darauf hinzudeuten, dass das Verhalten der biologischen Organismen eine unmittelbare Folge der zwar komplexen, aber dennoch kausal bestimmten Regelschleifen des Nervensystems ist, so dass sich dieses im Falle einer genauen Kenntnis aller relevanten materiellen Faktoren mit Sicherheit vorhersagen ließe. Selbiges musste *mutatis mutandis* auch für den Menschen gelten, dessen Gefühl der subjektiven Freiheit damit grundsätzlich infrage gestellt war. Selbst du Bois-Reymond war sich sicher, dass die ausnahmslose Gültigkeit der Naturgesetze den menschlichen Organismus vollständig determinieren.

„Wie anders faßt unsere Zeit das Problem der Willensfreiheit auf. Die Erhaltung der Energie besagt, daß so wenig wie Materie, jemals Kraft entsteht oder vergeht. Der Zustand der ganzen Welt, auch eines menschlichen Gehirnes, in jedem Augenblick ist die unbedingte mechanische Wirkung des Zustandes im vorhergehenden Augenblick und die unbedingte mechanische Ursache des Zustandes im nächstfolgenden Augenblick. Daß in einem gegebenen Augenblick von zwei Dingen das eine oder andere geschehe, ist undenkbar. Die Hirnmolekeln können stets nur auf bestimmte Weise fallen, so sicher wie Würfel, nachdem sie den Becher verließen. Wiche eine Molekel ohne zureichenden Grund aus ihrer Lage oder Bahn, so wäre das ein Wunder so groß als bräche der Jupiter aus seiner Ellipse und versetzte das Planetensystem in Aufruhr.“[270]

[270] Du Bois-Reymond (1974), S. 176.

Dieser Determinismus und die Verabschiedung der vermeintlichen subjektiv empfundenen Freiheit betraf bei du Bois-Reymond keineswegs den Bereich der transzendenten Probleme, denn das unerklärliche Auftreten des Bewusstseins hatte mit der kausalen Abgeschlossenheit der materiellen Welt nichts zu schaffen. Der Bereich des qualitativen Empfindens wurde als reines Epiphänomen der Hirnaktivität aufgefasst, als von den neuronalen Prozessen bedingt ohne seinerseits mit der Kraft versehen zu sein, auf das Gehirn zurückwirken zu können. Diese Lesart des Bewusstseins als absolutes Endglied einer Kausalkette ist auch unter den heutigen Neurophysiologen ein ungeschriebenes Gesetz, wobei die erheblich fortgeschrittenen Möglichkeiten, mittels nicht-invasiver Verfahren dem Hirn gleichsam beim Denken zuzusehen, die Überzeugung noch verstärkt haben, dass es letztlich der deterministische Nervenprozess selbst sei, der eine Handlung plane und ausführe und nicht das vermeintlich freie Subjekt. Dass in kontrollierten Experimentalsituationen, in welchen die Probanden zu beliebiger Zeit willentlich einen Finger oder die Hand bewegen sollen, bereits über eine halbe Sekunde vor der tatsächlichen Ausführung der Handlung eine großflächige Hirnaktivität, ein sogenanntes „Bereitschaftspotential“, zu registrieren ist, hatte der Neurologe Hans Kornhuber schon in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckt. Dies und ähnlich gelagerte experimentelle Evidenzen lassen es heute für ausgemacht erscheinen, dass die im subjektiven Empfinden erlebte Gewissheit, der Urheber seiner jeweiligen Taten zu sein, eine erst nachträglich generierte Illusion ist, die dem Bewusstsein ein vom Hirn längst Entschiedenes als vermeintlich frei Gewolltes präsentiert. „Keiner kann anders, als er ist“, „Verschaltungen legen uns fest“ und „Wir sollten aufhören, von Freiheit zu reden“[271] – diese und ähnliche Behauptungen werden gerade in jüngster Zeit von Seiten führender Hirnforscher der beeindruckten Öffentlichkeit präsentiert, und schon werden erste Konsequenzen für die Begriffe von „Schuld“ und „Verantwortlichkeit“ im Strafrecht reklamiert, denn man könne schließlich niemanden für irgendetwas verantwortlich machen, was die kausale Bedingtheit seiner materiellen Struktur notwendigerweise hervorbringen musste.

Es soll nun im hiesigen Zusammenhang keine detaillierte Untersuchung dessen stattfinden, was Willensfreiheit bedeutet bzw. vielmehr, was sie *nicht* bedeutet; doch scheint es angebracht, die Behauptungen der gegenwärtigen Neurowissenschaft zumindest in zwei Punkten einer eingehenderen Kritik zu unterziehen: Zum ersten wäre da die in der Regel

[271] Vgl. Singer (2004).

unausgesprochen vorausgesetzte These des psychophysischen Epiphänomenalismus, der in der heutigen Philosophie des Geistes meist unter dem Begriff des „Supervenienzprinzips“ firmiert und zweitens die Idee von der neuronalen Determiniertheit der physiologischen Prozesse, die sich letztlich auf die Annahme einer durchgängigen Determiniertheit der physikalischen Welt selbst zurückführen lässt.

Die letztere Behauptung ist naheliegenderweise im Rahmen einer „naturalistischen Naturalismuskritik“ am leichtesten zu widerlegen, denn bekanntlich lassen sich die diskontinuierlichen Quantensprünge, d.h. die konkreten Resultate einer Messung an atomaren Systemen im Regelfall nur mittels einer Wahrscheinlichkeitsbetrachtung vorhersagen, und die Chancen, das Problem mittels der Einführung verborgener Variablen aus der Welt schaffen zu können, sind nach dem experimentellen Nachweis der „spukhaften“ EPR-Korrelationen nicht gerade gestiegen. Den meisten Physikern gilt es als ausgemacht, dass nicht gemessene physikalische Attribute nicht nur unbekannt, sondern tatsächlich unbestimmt sind, oder vielmehr, dass diese keine unabhängigen Elemente der Realität im von Einstein intendierten Sinne sein können. Und auch hinsichtlich des statistischen Charakters elementarer Quantenereignisse besteht kaum mehr Hoffnung auf Besserung. Für eine große Menge Atome eines radioaktiven Präparates lässt sich z.B. eine Halbwertszeit angeben, die diejenige Zeit spezifiziert, nach welcher etwa die Hälfte zerfallen sein wird, doch „wenn man ein einzelnes radioaktives Atom betrachtet, so ist seine wahrscheinliche Lebensdauer viel schwerer abzuschätzen als diejenige eines gesunden Spatzen.“[272] Lässt man Licht oder materielle Teilchen einen Doppelspalt passieren, so ist es gleichermaßen unmöglich vorherzuberechnen, an welchem Ort des Detektorschirmes die Teilchen ihre Energie abgeben werden: „Wir haben von der Wahrscheinlichkeit gesprochen, daß ein Elektron unter gegebenen Umständen eintreffen wird. Wir haben stillschweigend vorausgesetzt, daß es in unserem experimentellen Aufbau (oder sogar in dem bestmöglichen) unmöglich sein würde, genau vorherzusagen, was passiert. Wir können nur die Chance voraussagen! Wenn das wahr wäre, würde es bedeuten, daß die Physik aufgegeben hat bei dem Problem, genau vorherzusagen, was unter bestimmten Umständen passieren wird. Ja! die Physik *hat* aufgegeben. *Wir wissen nicht, wie man vorhersagen könnte, was unter vorgegebenen Umständen passieren würde*, und wir glauben heute, daß es unmöglich ist – daß das einzige, was vorhergesagt werden kann, die Wahrscheinlichkeit verschiedener Ereignisse ist. Man muß erkennen, daß

[272] Schrödinger (2001), S. 136.

dies eine Einschränkung unseres früheren Ideals, die Natur zu verstehen, ist. Es mag ein Schritt zurück sein, doch hat niemand eine Möglichkeit gesehen, ihn zu vermeiden.“[273]

Angesichts dieser Sachlage mag man an der These, dass die neuronalen Prozesse des Gehirns ein streng deterministisches System ausbilden, durchaus berechtigte Zweifel anmelden. Und dies gilt erst recht angesichts der extrem rückgekoppelten Architektur, die das System bisweilen an kritische Punkte manövriert, sogenannte Bifurkationsstellen, an welchen infinitesimal kleine Einflüsse makroskopische Wirkungen hervorbringen können.[274]

Andererseits ist offensichtlich, dass auf den ersten Blick mit diesem Indeterminismus nichts gewonnen ist. Im Grenzfall von purem Zufall geleitet zu sein, ist keine brauchbare Antwort auf das zugrundeliegende Problem freier *versus* unfreier Willensentscheidungen.

An dieser Stelle muss nun die erste der beiden oben genannten Annahmen einer genaueren Prüfung unterzogen werden, der Epiphänomenalismus, der seinen logischen Ausdruck in der sogenannten Supervenienzthese findet: „Das Mentale superveniert insofern auf dem Physikalischen, als sich beliebige zwei Dinge (Objekte, Ereignisse, Organismen, Personen, etc.), die in allen physikalischen Eigenschaften gleich sind, hinsichtlich ihrer mentalen Eigenschaften nicht unterscheiden können. Das heißt: Physikalische Ununterscheidbarkeit beinhaltet auch psychologische Ununterscheidbarkeit. Oder wie man manchmal sagt: Kein mentaler Unterschied ohne einen physikalischen Unterschied.“[275]

Dieses Supervenienz-Prinzip lässt die Möglichkeit zu, dass zwei Organismen im gleichen psychologischen Zustand sein können, ohne im gleichen physikalischen Zustand zu sein, d.h. geistige Zustände, die man wohl am ehesten mit Descartes´ Begriff des „Denkens“ identifiziert, sind unter Umständen multipel realisierbar. Wie der analytische Philosoph Jaegwon Kim ausführt, ist dieses Prinzip zwar theoretisch damit vereinbar, dass zumindest *eine* Cartesianische Seele existieren könnte, die gar keine physikalischen Eigenschaften

---

[273] Feynman (1988), S. 30. Kursive Hervorhebungen im Original.

[274] Diese in rückgekoppelten Systemen zu beobachtenden „chaotischen“ Eigenschaften hätten bereits in der Welt der klassischen Physik dazu hingereicht, ein System wie das Gehirn (und vermeintlich sehr viel einfachere!) als absolut unberechenbar zu erweisen, ohne dass dies den prinzipiellen Determinismus außer Kraft gesetzt hätte. Die faszinierenden mathematischen Konsequenzen eines „deterministischen Chaos“ würden z.B. auch den Laplaceschen Dämon in absoluter Hilflosigkeit zurücklassen, sofern dieser nur die geringste denkbare, aber von Null verschiedene Zeit für einen Rechenschritt benötigte. Selbst eine vollkommen exakte Bestimmung des infinitesimal nächsten Zustandes des Universums würde eine unendlich lange Rechenzeit in Anspruch nehmen. Auf diese chaostheoretischen Argumente soll allerdings hier nicht weiter eingegangen werden.

[275] Kim (1998), S. 11.

besäße, doch wird jene Möglichkeit von den Anhängern der Supervenienz in der Regel ausgeschlossen.[276] Des weiteren wird von diesen oftmals ohne explizite Nennung unterstellt, dass geistige Prozesse mit materiellen nicht nur kovariieren, sondern sogar von letzteren kausal abhängen, d.h. welche psychologischen Zustände ein (Lebe-) Wesen hat, ist von seinen physikalischen Eigenschaften eindeutig determiniert. Die Materie hat gewissermaßen das ontologische Primat gegenüber den geistigen Epiphänomenen, die sich zwar nicht auf neuronale Konfigurationen reduzieren lassen, aber umgekehrt auch keine Möglichkeit besitzen, auf diese einen Einfluss auszuüben. Es ist somit diese konkretisierte Form des Epiphänomenalismus, die von den meisten Neurophysiologen vertreten wird, und die erst in Kombination mit der These einer kausal determinierten materiellen Welt die Verabschiedung des vermeintlich freien Willens nach sich zieht, mitsamt den angedeuteten moralisch-ethischen Konsequenzen. Neben dieser ersten Kombination von Annahmen:

1.) Der Epiphänomenalismus ist gerechtfertigt und
die materielle Welt ist kausal determiniert.

existieren noch drei andere Möglichkeiten:

2.) Der Epiphänomenalismus ist gerechtfertigt und
die materielle Welt ist **nicht** kausal determinert

3.) Der Epiphänomenalismus ist **nicht** gerechtfertigt und
die materielle Welt ist kausal determiniert

4.) Der Epiphänomenalismus ist **nicht** gerechtfertigt und
die materielle Welt ist ebenfalls **nicht** kausal determiniert.

Die beiden Szenarien 1 und 3 sind, sofern die Quantenmechanik weiterhin keine grundlegende Revision erfährt, definitiv ausgeschlossen. Nicht kausal determiniert zu sein, soll hier aber nicht bedeuten, dass eine kausale Beschreibung des Kosmos grundsätzlich inadäquat wäre, was die Möglichkeit einer Orientierung in der Welt *ad absurdum* führen

[276] Kim, a.a.O.

würde, sondern lediglich, dass die makroskopische Determiniertheit nicht mit der Idealgestalt derselben zusammenfällt. Sie gilt demnach nur in guter Näherung, und dies entspräche sogar der in der naturwissenschaftlichen Praxis etablierten Erwartung, dass eine Rechnung umso spekulativer wird, je größer die betrachteten Zeiträume und je komplexer die modellierten Systeme sind. Es verblieben die Kombinationen 2 und 4.

Unter den Gegebenheiten der Situation Nr. 2 stellt sich, wie beim Epiphänomenalismus generell, die Frage, warum das qualitative Bewusstsein überhaupt existiert, wenn doch alles, was in der materiellen Welt geschieht (ob zufällig oder notwendig), genau so verliefe, ohne jene geistigen Begleiterscheinungen. Warum, so das häufig angeführte Argument, hat die Natur im Laufe der Evolution ein Prinzip entwickelt, welches für das Urproblem des Lebens, das Überleben, gar nicht von Belang ist? Auch im Falle des Menschen wären Entscheidungen, die auf der bewussten Abwägung von Gründen beruhen, eine pure Illusion: „Wenn eingeräumt wird, daß das bewußte Verhandeln von Argumenten auf neuronalen Prozessen beruht, dann muß es neuronalem Determinismus in gleicher Weise unterliegen wie das unbewußte Entscheiden, für das wir dies zugestehen. Dies folgt aus der zwingenden Erkenntnis, daß neuronale Vorgänge in der Großhirnrinde nach immer gleichen Prinzipien ablaufen und daß sowohl bewußte als auch unbewußte Entscheidungen auf Prozessen in dieser Struktur beruhen. Wenn dem aber so ist, warum räumen wir den bewußten Entscheidungen einen anderen Status ein als den unwillkürlichen, warum wähnen wir erstere unserer Intention und Wertung unterworfen und sind bereit, für sie besondere Verantwortung zu übernehmen?“ [277]

Nun, die Antwort auf diese eher rhetorisch gemeinte Frage des Neurophysiologen Wolf Singer hat eine beeindruckend einfache Antwort: Weil Begriffe wie Freiheit, Zurechenbarkeit, Wertung/Bewertung und vor allem Verantwortlichkeit in der objektivistischen Beschreibung neuronaler Systeme schlechterdings keine Entsprechung haben können! Was würde den Naturforscher berechtigen, von einem materiellen System wie einem Gehirn zu behaupten, es sei „frei“? Abwesenheit von Determinismus ist sicherlich eine notwendige Bedingung, doch wäre diese hinreichend? Ist z.B. der Ausgang einer Ortsmessung im Doppelspaltexperiment eine Folge der „freien Entscheidung“ des betreffenden Lichtquants, da abgesehen von einer statistischen Reglementierung keine kausale Verursachung derselben vorliegt? Ist das Lichtteilchen für seine Taten

[277] Vgl. Singer (2004).

verantwortlich zu machen? Würde es Schuld auf sich geladen haben, wenn mit einer bestimmten Wahl die Zündung einer Atombombe verbunden wäre? All diese Fragen klingen vollkommen absurd und würden sich nicht weniger absurd ausnehmen, wenn sich jenes Lichtquant von einem menschlichen Gehirn vertreten ließe.

Freiheit ist kein objektivierbares Systemverhalten, sondern in erster Linie Selbstzuschreibung, die wiederum ein voll ausgeprägtes Selbstbewusstsein zur Voraussetzung hat. Diese beiden Faktoren bedingen sich wechselseitig, so dass man behaupten kann, dass ohne Selbstbewusstsein keine Freiheit und gleichermaßen ohne Freiheit kein Selbstbewusstsein möglich ist. Wessen sollte sich ein purer Automatismus „bewusst" sein? Sobald sich dieser dessen bewusst würde, „nur" ein Automatismus zu sein, wäre sein Automaten-Dasein im gleichen Augenblick beendet. Sich als ein *Ich* wahrzunehmen bzw. zu sich „ich" zu sagen, ist der erste und gleichsam ursprünglichste Akt der Freiheit. Diese Wahrnehmung *kann* kein determiniertes Epiphänomen eines seinerseits durchgängig determinierten Systems sein. Sie ist eine phänomenale und irreduzibel-holistische Eigenschaft eines komplexen biologischen Nervensystems, womit nicht behauptet werden soll, dass Nervensysteme die einzig möglichen materiellen Konfigurationen sind, die von jenen emergenten Phänomenen begleitet werden.[278] Wollte man sich weiterhin einer naturalistischen Sprache bedienen, so könnte man behaupten, dass jene höheren geistigen Zustände eine unmittelbare und unhintergehbare „physikalische" Wirklichkeit sind. Es müssen bestimmte materielle Bedingungen erfüllt sein, damit sich Bewusstsein einstellen

---

[278] Seriell arbeitende programmgesteuerte Rechenmaschinen, deren theoretisches Grundmodell 1936 von dem englischen Mathematiker Alan Turing entwickelt wurde (die sogenannte „Turing-Maschine"), gehören ausdrücklich *nicht* zu den hier favorisierten Kandidaten für Systeme, die potentiell in der Lage sein könnten, Selbstbewusstsein zu generieren. Alle heute gebräuchlichen Computer- und Robotersysteme arbeiten auf dieser Basis, d.h. ihre Algorithmen können immer in einen funktional äquivalenten Algorithmus einer Turing-Maschine übersetzt werden. Turing-Maschinen sind absolut determiniert, d.h. jeder folgende Zustand ist eindeutig durch den jeweils vorhergehenden festgelegt. Da dieses Modell darüberhinaus mittels diskreter Zustände, diskreter „Handlungsanweisungen" (Programmtabelle) und einem ebenfalls diskreten und endlichen Satz an Symbolen arbeitet, ist es leicht und eindeutig zu berechnen. Alan Turing konnte sogar umgekehrt zeigen, dass der Begriff der mathematischen Berechenbarkeit so *definiert* werden kann, dass ein Problem genau dann *berechenbar* ist, wenn eine mit endlichem Symbolsatz und einem endlichen Programm ausgestattete Turing-Maschine (der Speicher wird hingegen als theoretisch unbegrenzt angenommen) in einer endlichen Zahl von Arbeitsschritten zum Stillstand kommt, d.h. ein eindeutiges Ergebnis liefert. Für Turing-Maschinen gilt das von dem Mathematiker Kurt Gödel zu Beginn der 30er Jahre des 19. Jahrhunderts bewiesene Unvollständigkeitstheorem, dessen Kern sich anhand dieses Modells relativ leicht auf den Punkt bringen lässt: Gegeben sei eine universelle Turing-Maschine, die in der Lage sein soll, jede beliebige andere Turing-Maschine zu simulieren, dann kann gezeigt werden – und dies scheint sogar intuitiv einleuchtend zu sein – dass diese sich nicht selbst simulieren kann. Der englische Mathematiker und theoretische Physiker Roger Penrose verwendet genau diese Argumentation um nachzuweisen, dass der menschliche Geist nicht in das funktionalistische Äquivalent einer Turing-Maschine übersetzt werden kann, da dieser (und der Mathematiker Penrose sollte es wissen) in der Lage sei, Probleme analytisch zu lösen, zu deren Beweis ein Computer (eine Turing-Maschine) unendlich lange Zeit benötigen würde, d.h. die algorithmisch unbeweisbar sind. Vgl. hierzu Penrose (1990), Kap. 1-4. Die hiesige Argumentation, dass determinierte Systeme kein Selbstbewusstsein ausbilden können, ist mit der der Paradoxie der universellen Turing-Maschine verwandt.

kann, doch dieses wirkt seinerseits stabilisierend auf diese materiellen Bedingungen zurück. Der Geist wird gleichzeitig hervorgebracht und ist selbst hervorbringend. Das subjektive Empfinden von Freiheit und willentlicher Verursachung ist keine Illusion, sondern es ist gewissermaßen die Innenansicht einer höheren Ordnungsform, die mehr ist als das Verhalten der sie konstituierenden Elemente und die zur Erhaltung ihrer selbst auf diese Konstituenten zurückwirkt. Nimmt man als Vertreter dieser Elemente z.B. einzelne Nervenzellen an, so ist das Verhalten derer, die als Teile eines holistischen Musters infrage kommen, dessen „Innenansicht" wiederum ein subjektiver Bewusstseinszustand ist, nicht nur von den lokalen Bedingungen an ihrer jeweiligen raumzeitlichen Position bestimmt, sondern ebenfalls und unvermittelt vom übergeordneten Gesamtzustand, der sich gewissermaßen derjenigen Teile bemächtigt, die seine Verwirklichung möglich machen.

Es ist leicht einzusehen, dass dieser Vorschlag eines psycho-physischen Eigenschaftsdualismus mit der gegewärtig weit verbreiteten und oben dargestellten Version des Epiphänomenalismus schlechterdings unvereinbar ist. Die Materie hat nicht das ontologische Primat und Bewusstseinszustände sind keine hilflosen Endglieder kausaler Wirkungsketten. Sie greifen umgekehrt kreativ und aktiv in die materiellen Bedingungen ihrer Möglichkeit ein, indem sie z.B. bestimmte neuronale Muster über gewisse Zeiträume stabil halten, die ohne diese nicht-lokalen Beeinflussungen sehr schnell wieder zerfielen.[279] Dass man sogar aus physikalischen Gründen darüber spekulieren darf, ob Bewusstseinszustände unter Umständen nicht viel realer sein könnten als die materiellen Strukturen, deren sie sich bedienen, soll weiter unten dargelegt werden. Im Rahmen der oben unterschiedenen Positionen wird eindeutig für die vierte optiert: Weder ist die materielle Welt durchgängig kausal determiniert, noch ist der Epiphänomenalismus die angemessene Charakterisierung des Verhältnisses zwischen Körper und Geist.

---

[279] Kreativität hat in absolut determinierten Systemen ebenfalls einen schweren Stand, wobei wiederum zwischen Determination und Berechenbarkeit unterschieden werden muss (Vgl. die vorangehende Anmerkung). Karl Popper scheint z.B. diese Unterscheidung an einer Stelle, die dennoch das Problem sehr treffend skizziert, nicht zu berücksichtigen: „Wenn der physikalische Determinismus recht hat, dann könnte ein völlig tauber Physiker, der nie einen Ton Musik gehört hat, sämtliche Sinfonien und Konzerte von Mozart und Beethoven schreiben, indem er einfach den genauen physikalischen Zustand ihres körpers untersucht und voraussagt, wo sie schwarze Zeichen auf ihr liniertes Papier machen würden. Unser tauber Physiker könnte sogar noch mehr tun: Durch hinreichend genaue Untersuchung der Körper von Mozart und Beethoven könnte er Partituren schreiben, die Mozart und Beethoven nie tatsächlich geschrieben haben, die sie aber geschreiben hätten, wenn bestimmte äußere Bedingungen ihres Lebens anders gewesen wären; wenn sie zum Beispiel Hammelfleisch statt Hühnerfleisch gegessen oder Tee statt Kaffee getrunken hätten." Vgl. Popper (1994), S. 232.

7.3 Supervenienzthese und Indeterminismus im neuronalen System

Zugegeben: Die Supervenienzthese ist vernünftig. Sie ist eine heuristisch brauchbare Basis für Medizin und Neurophyisiologie und ihr Grundgedanke ist sogar dem Alltagsmenschen vertraut. Niemand würde erwarten, dass der Konsum größerer Mengen Alkohols oder eine schwere Schädel-Hirn-Verletzung keinen Einfluss auf das Bewusstsein der betroffenen Person hat. Und niemand würde einem neugeborenen Säugling die gleichen geistigen Fähigkeiten zutrauen, wie einem normal entwickelten Erwachsenen. Die systematische Hirnforschung hat eine große Menge an Belegen dafür angehäuft, dass selbst höhere geistige Leistungen wie Sprachvermögen oder soziale Kompetenz an das Vorhandensein und die funktionale Unversehrtheit mehr oder weniger genau lokalisierter Hirnareale gebunden sind. Es existieren Unmengen an Fallstudien, die die skurilsten psychischen Erkrankungen auf morphologische oder physiologische Störungen des Nervensystems zurückführen können, so dass die weitverbreitete Überzeugung, mit den Mitteln einer reduktionistischen Methodologie den Schlüssel zum umfassenden Verständnis aller Leistungen des Gehirns in Händen zu halten, durchaus nachvollziehbar erscheint: Das Gesamtsystem *muss* sich aus dieser Perspektive durch eine Analyse der separierbaren und ihrerseits kausal eindeutig determinierten Teile erklären lassen und es *kann* schließlich nicht mehr sein als die Summe dieser Interaktionen.

Die Ausbildung der Quantentheorie im 20. Jahrhundert hat nun diese Situation grundlegend verändert. Die Physik des Mikrokosmos offenbart eine rätselhafte Wirklichkeit, die ihrem Wesen nach nicht-lokal, nicht-separierbar und holistisch ist. Der Anspruch der reduktionistischen Verfahrensweise, die Welt zusammengesetzter Körper auf die Eigenschaften ihrer Komponenten zurückzuführen, fördert paradoxerweise Systeme zutage (Atome, Elementarteilchen), die die absolute Undurchführbarkeit derjenigen Methodologie erweisen, auf deren Geheiß sie letztlich existieren. Die Physiker sind sich darin weitgehend einig, dass die makroskopische Welt nur ein Grenzfall eines abgründigen Reiches der Quantenobjekte ist, auch ohne dass sie genau zu sagen wüssten, wie die scheinbare Stabilität größerer Gegenstände letztlich zuwege gebracht wird. Damit sind weder der Alltagsverstand noch die Prinzipien der klassischen Mechanik, die ja die Voraussetzungen für den Erfolg reduktionistischer Systemerklärungen schufen, infrage gestellt, sofern man sich wiederum des Umstandes bewusst ist, dass sie ihrerseits nur

Idealisierungen sind, die mehr über die Struktur der menschlichen Subjekte verraten, die sie hervorgebracht haben, als über die Verfasstheit der physikalischen Realität. Obwohl gerade die Neurophysiologie die erste Wissenschaft war, die sich mit den prinzipiellen Grenzen des Reduktionismus auseinanderzusetzen hatte, entstammen ihren Reihen bis heute die eifrigsten Verfechter dieser Programmatik. Kein Physiker würde gegenwärtig noch ernsthaft von „neuronalem Determinismus“ sprechen – Hirnforscher offenbar schon; und dass sie mit dieser Idee tatsächlich die vollkommene und durchgängige Determiniertheit des Menschen behaupten wollen und nicht etwa eine in angemessener Weise abgeschwächte Version, zeigt sich in ihrem vehementen Eintreten für die angebliche Nichtexistenz der Freiheit.

Es soll nun gezeigt werden, dass sich die starke Variante der psychophysischen Supervenienzthese, deren heuristischer Wert unbestritten ist, selbst in einer klassisch gedachten Welt – und das scheint wohl diejenige Art von Wirklichkeit zu sein, die unter den heutigen Neurophysiologen die höchsten Sympathiewerte erzielen würde – niemals beweisen lassen könnte, und das aus logischen Gründen. Sie wäre somit gleichsam dasjenige, was sie am wenigsten sein sollte: ein metaphysisches Dogma. Mit „starker Variante“ ist dabei gemeint, dass neben dem reinen Supervenienzprinzip angenommen wird, dass keine Cartesianische Seele existiert[280] und die Vorgänge im phänomenalen Bewusstsein nicht nur mit den physikalischen Prozessen im Gehirn *kovariieren*, sondern von diesen *determiniert* sind.

Für einen klassischen Physiker wäre es, einmal abgesehen von experimentellen Schwierigkeiten, durchaus vorstellbar, eine vollständige Beschreibung des materiellen Zustandes eines menschlichen Gehirns zu einer gegebenen Zeit zu besitzen, d.h. genau zu wissen, an welchem Ort und in welchem Bewegungszustand jedes einzelne der Atome des Systems sich befindet. Man nehme einmal an, dass diese Information zu jeder beliebigen Zeit verfügbar sei. Der Zustand des Bewusstseins, welches als von den Hirnprozessen determinertes Epiphänomen aufgefasst werden soll, ist selbstverständlich immer nur *einer* Person unmittelbar zugänglich, welche zum Zwecke der Überprüfung des Supervenienz-verhältnisses demjenigen, der die objektive Beschreibung des zugeordneten Gehirns besäße, über ihre jeweilige Befindlichkeit Auskunft geben müsste. Dies wäre jedoch

[280] Wie bereits oben ausgeführt, ist das Supervenienzprinzip streng genommen logisch damit vereinbar, dass zumindest *eine* Cartesianische Seele existieren könnte, d.h. ein rein geistiges Wesen, welches keine materiellen Eigenschaften bzw. keine materielle Basis besäße.

höchst ungenau und würde keinesfalls dazu hinreichen, die Idee, dass sich kein geistiger Unterschied ohne einen materiellen Unterschied einstellen kann, einem strengen Test zu unterziehen. Es scheint nun nahezuliegen, dass eine Beurteilung des Supervenienzprinzips nur anhand des jeweils eigenen Bewusstseins möglich wäre, d.h. man selbst müsste die Information über alle Atome seines Gehirns besitzen, was vielleicht noch denkbar wäre, *und* gleichzeitig darauf achten, in welchem psychologischen Zustand sich gerade der eigene Geist befände. Ist nun auch dies denkbar?

Spätestens an dieser Stelle gerät man in eine unauflösliche Paradoxie, die in dem Umstand begründet ist, dass im sich selbst beschreibenden Bewusstsein Subjekt und Objekt der Erkenntnis zusammenfallen. Im gleichen Augenblick, in dem man glauben könnte, „sich selbst zu haben“, hat man sich schon wieder verloren oder, in einer formaleren Terminologie ausgedrückt: Die Frage nach dem Zustand des eigenen Bewusstseins ist innerhalb dieses Systems unentscheidbar.[281]

Wechselt man von einer Welt der klassischen Physik in die Moderne, so wird die Situation sogar noch aussichtsloser: Auch die Frage nach dem objektiven Zustand des Gehirn als eines materiellen Systems wird gleichermaßen unentscheidbar, sofern man unter dem Wort „Zustand“ diejenigen Parameter subsumiert, deren gleichzeitige Kenntnis die vollständige Beschreibung eines klassischen Gegenstandes darstellen würde. In der Quantentheorie wird der Begriff des *Zustandes* jedoch nicht für Ergebnisse von Messungen, d.h. für das Faktische verwendet, sondern steht für die Schrödingersche Ψ-Funktion, welche eine Superposition von Möglichkeiten verkörpert. Diese kann man in der Tat exakt kennen, doch lassen sich daraus bekanntlich nur die statistischen Verteilungen möglicher Messergebnisse vorhersagen.

[281] Was hinsichtlich der Frage einer möglichen Beweisbarkeit der Supervenienzthese zu einer ernüchternden Einsicht führt, kann gleichsam ins Positive gewendet als treffende Beschreibung des ambivalenten Verhältnisses des Menschen zu sich selbst thematisch werden – und damit zur Charakterisierung des Mensch-Seins überhaupt dienen. Es wäre dabei z.B. an Plessners Begiff der Exzentrischen Positionalität zu denken.

7.3.1 Das „quantenmechanische“ Gehirn - Freiheit durch Zufall?

Es muss im Rahmen des vorgeschlagenen Modells des Bewusstseins als Innenperspektive eines irreduziblen und holistischen Quantenzustandes des Gehirns auf eine weitverbreitete Kritik eingegangen werden, die sich mit Recht darauf beruft, dass der quantenmechanische Indeterminismus gewissermaßen selbst determinert ist und auch die in ihrem jeweiligen Ausgang unprognostizierbaren Einzelereignisse (Messergebnisse) sich schließlich einer eindeutigen statistischen Verteilung fügen müssen. Bezogen auf das optische Doppelspaltexperiment ist z.B. der genaue Ort, an welchem ein Lichtquant mit dem Film in Wechselwirkung tritt, nicht vorherzuberechnen, doch „wählt“ jedes der Teilchen diesen Ort nach einer durch die Interferenz der Wellen vorgegebnen Wahrscheinlichkeitsfunktion. Sehr viele Lichtquanten erzeugen zusammengenommen ein Interferenzmuster und dessen räumliches Aussehen ist seinerseits festgelegt.

Die durchaus berechtigte Frage ist nun, ob mit dieser statistischen Determiniertheit etwas gewonnen ist. Ist nicht diese in gleichem Maße ungeeignet, ein materielles Korrelat des sich frei wähnenden Subjekts zu sein? – Denn dass *etwas* im Gehirn vor sich geht, während vor dem geistigen Auge Argumente verhandelt und Entscheidungen getroffen werden, und dass diese materiellen Vorgänge ihre Wirkungen beispielsweise in der Muskulatur des Körpers entfalten, lässt sich kaum bestreiten. – Die Antwort muss wohl negativ ausfallen: Ein statistisch determiniertes Gehirn ist keine brauchbare Außenperspektive subjektiver Freiheit. Müssten demnach nicht auch hier die physikalischen Naturgesetze, auch wenn es „nur“ statistische wären, außer Kraft gesetzt sein?

Niels Bohr hat eindringlich betont, dass die mögliche Ausdehnung des Komplementaritätsprinzips auf die Relation zwischen Körper und Geist nicht so interpretiert werden darf, dass der Geist auf die Materie unmittelbaren Einfluss nehmen kann und z.B. die statistischen Verteilungen manipuliert. Eine derartige Idee liefe auf einen psychophysischen Interaktionismus hinaus, den Bohr zu vermeiden sucht: „Wenn man z.B. gemeint hat, daß der Wille sein Wirkungsfeld bei der Regulierung der atomaren Prozessse in den Organismus finden sollte, für welche auf Grund der Atomtheorie nur Wahrscheinlichkeitsgesetze aufgestellt werden können, so handelt es sich um eine Auffassung, die mit der hier angedeuteten Auslegung des psychophysischen Parallelismus unvereinbar ist. Von unserem Standpunkt aus ist ja das Gefühl der Willensfreiheit als ein dem bewußten Leben eigentümlicher Zug zu betrachten, dessen materielle

Parallele in organischen Funktionen gesucht werden muß, die weder einer mechanischen Kausalbeschreibung zugänglich sind, noch irgendeine für die wohldefinierte Anwendung der statistischen Gesetze der Atommechanik hinreichend weit getriebene physikalische Untersuchung zulassen.“[282]

Bohr scheint demnach der Ansicht zu sein, dass eine Überprüfung, ob und inwiefern statistische Gesetze verletzt sein könnten, mit dem Auftreten geistiger Phänomene selbst unvereinbar ist und dass diese beiden komplementären Aspekte, Geist und Materie, sich in ähnlicher Weise verhalten, wie die Konzeptionen von Welle und Teilchen, die in der Beschreibung quantenphysikalischer Systeme *beide* zur Anwendung kommen müssen, ohne *gleichzeitig* darstellbar zu sein. Es könnte demnach grundsätzlich unmöglich sein festzustellen, inwiefern statistische Erwartungen sich in biologischen Organismen anders gestalten, als in nicht-belebten Systemen.

Es gibt jedoch noch einen anderen Gesichtspunkt, der durchaus geeignet wäre, diese Intuition noch zu verstärken. Zu dessen Explikation ist es vonnöten, kurz darauf einzugehen, unter welchen Bedingungen reproduzierbare quantenmechanische Wahrscheinlichkeitsverteilungen entstehen können. Woher stammt z.B. im Doppelspaltexperiment jene tendenzielle Gewichtung *möglicher* Einzelereignisse, deren Summe sich nach einer großen Anzahl *tatsächlicher* Vorkommnisse zu einem eindeutigen Muster verdichtet? Es könnte fast so scheinen, als wüssten die Lichtquanten voneinander und stimmten ihre Aktionen mit den jeweils anderen Teilchen ab, doch die Theorie liefert hierfür eine einfachere Erklärung: Das charakteristische Interferenzmuster stellt sich genau deshalb ein, weil alle Lichtquanten, die die Apparatur passieren, im *gleichen* quantenmechanischen Zustand sind.[283] Sie haben alle die *gleiche* Schrödingersche Ψ-Funktion, die von dem gesamten experimentellen Aufbau abhängig ist, welcher sich während der Durchführung des Experiments nicht ändert. Würde man z.B. ständig den Spaltabstand oder die Distanz zwischen Doppelspalt und Film variieren, so verschwände auch das Interferenzmuster, da dessen räumliche Lage von jenen Parametern unmittelbar abhängig ist. Es würden genau genommen viele unterschiedliche Interferenzmuster erzeugt, die sich alle zu einer diffusen Wolke überlagerten.

---

[282] Bohr (1958), S. 12.

[283] Um dies zu gewährleisten, muss man natürlich mit monochromatischem und kohärentem Licht arbeiten. Alle Lichtquanten müssen die gleiche Wellenlänge (Energie, „Farbe“) haben und sie müssen so emittiert werden, dass ihre zugeordneten Wellenzüge die gleiche räumliche Phasenlage aufweisen (räumliche Kohärenz). Idealerweise werden diese Bedingungen von Laser-Licht erfüllt, doch kann mittels geeigneter Vorbereitung, auch das Licht konventioneller Lichtquellen annähernd in diesen Zustand gebracht werden.

Kann man nun annehmen, dass derartige Bedingungen im Gehirn angetroffen werden können? Offensichtlich nicht. Was dieses System auszeichnet, ist nicht ein statischer Zustand, sondern vielmehr eine hochkomplexe Dynamik, die offensichtlich umso intensiver ausfällt, je „wacher“ das Bewusstsein ist und je anspruchsvoller die geistigen Akte ausfallen. Anhand des Elektroenzephalogramms (EEG) eines Menschen lassen sich Rückschlüsse auf dessen Bewusstseinszustand ziehen (Schlaf, Narkose, Koma etc.) und nicht ohne Grund bedient sich die Neurophysiologie bildgebender Verfahren (f-MRT, PET), die z.B. anhand der lokalen Glukosekonzentration oder der gesteigerten Durchblutung diejenigen Hirnregionen ausfindig machen sollen, die eine gesteigerte Stoffwechselaktivität aufweisen. Allein der Befund, dass ohne diese Dynamik das Bewusstsein erlischt, lässt den Versuch vollkommen aussichtslos erscheinen, im Hirn die Verletzung derjenigen Naturgesetze nachzuweisen, die im Falle eines *stabilen* Systemzustandes und der häufigen *Wiederholung* einzelner Messungen, die Statistik der Resultate eindeutig bestimmen würden.

Genausowenig wie sich Freiheit am Gehirn messen ließe, kann demnach behauptet werden, dass sie physikalisch unmöglich wäre. Wie der Neurophysiologe Wolf Singer davon zu sprechen, dass die Verschaltungen des Hirns uns festlegten und schließlich keiner anders könne als er sei, ist nicht mehr als gehaltlose Metaphysik. – Wahrscheinlich kann er aber nicht anders.

7.3.2 Holistische Hirnzustände: Neurophysiologische Befunde

Es ist nun zu untersuchen, inwiefern sich empirische Belege für die Existenz teilautonomer und holistischer Systemeigenschaften beibringen lassen, die als mögliche Kandidaten für das neuronale Korrelat des Bewusstseins infrage kämen. Dabei soll vor allem die noch weitgehend unverstandene Schwierigkeit beleuchtet werden, wie das Gehirn die von den Sinnesnerven stammenden Daten verarbeitet und auf welche Weise es in der Lage ist, aus der Summe dieser afferenten Impulsmuster einen einheitlichen Bewusstseinszustand zu generieren. Auf die Darlegung der allgemeinen Grundlagen neuraler Informationsleitung und -verarbeitung soll in diesem Rahmen verzichtet werden; der Leser sei auf die große Anzahl einführender Werke verwiesen.

René Descartes hatte bereits im frühen 17. Jahrhundert beobachtet, dass die Nerven, die von den unterschiedlichsten Sinnesorganen ihren Ausgang nehmen, keine morphologischen Unterschiede aufweisen, so dass er auf den Gedanken verfiel, dass sämtliche afferenten und efferenten „Leitungen“ auf denselben physiologischen Prinzipien beruhen müssen.[284] Auf der Grundlage dieser Idee entwickelte er schließlich die These, dass jene Nerven hohle Schläuche seien, durch welche eine sehr dünnflüssige und aus winzigen Korpuskeln bestehende Flüssigkeit zirkuliere, mittels deren dann auf hydraulischem Wege die Wirkungen von der Peripherie des Körpers in das Zentrum des Gehirns gelangen und durch welche in umgekehrter Richtung und dirigiert von dem willentlichen Einfluss der Seele, einzelne Muskeln aufgebläht und in Bewegung versetzt werden können. In diesem Modell des menschlichen Organismus musste es demnach einen zentralen Punkt geben, an dem alle Nervenbahnen zusammenlaufen und an welchem es der Seele möglich ist, sich über die Zustände des Körpers zu unterrichten und diesen mittels willentlicher Beeinflussung der hydraulischen Ströme zu steuern. Bekanntlich glaubte Descartes, in der Zirbeldrüse (Hirnanhangdrüse) die Schnittstelle zwischen Leib und Seele identifiziert zu haben, da sie nach seiner Ansicht die einzige nicht lateralisierte und nur in einfacher Ausfertigung vorhandene Struktur im Zentralhirn sei.

Descartes interaktionistischer Substanzdualismus verlor sehr bald an Überzeugungskraft, doch die damit verbundene Idee einer zentrischen Struktur des Nervensystems war damit keineswegs obsolet. Genauere Analysen der neuronalen Verarbeitung sinnlicher Daten, die

---

[284] Vgl. Descartes, Principia Philosophiae, IV, 198 bzw. Descartes (1992), S. 241.

vor allem im 20. Jahrhundert durchgeführt wurden, schienen sogar darauf hinzudeuten, dass ausgehend von den primären somatosensorischen Arealen auf der Großhirnrinde, an denen die afferenten Nerven des Körpers nach einer Umschaltung im Zwischenhirn schließlich angelangen, eine ganze Abfolge hierarchisch gegliederter Analyseebenen existiert, an denen gezeigt werden kann, dass einzelne Nervenzellen und Zellverbände auf immer spezifischere und komplexere Muster in den Wahrnehmungsdaten reagieren. Mittlerweile am besten untersucht sind dabei die Wege der visuellen Informationen und man kann sagen, dass sich die ursprüngliche Hoffnung, es müsse schließlich ein *höchstes* Verarbeitungszentrum geben, in dem gleichsam die nach bestimmten Merkmalen analysierten und vorsortierten Daten zusammenlaufen und ein einheitliches Ganzes bilden, nicht erfüllt hat. Ausgehend von der Netzhaut der Augen kann man die Ausläufer des Sehnerven bis zum primären visuellen Areal verfolgen, welches sich auf dem im Hinterkopf gelegenen Teil der Großhirnrinde befindet, doch ab dieser Ebene wächst sich das System zu einem weitverzweigten Geflecht unterschiedlicher, parallel verarbeitender und vor allem rekursiv verbundener Neuronengruppen aus: „Es existiert kaum eine Vorwärtsverbindung, die nicht von einer quantitativ mächtigeren Rückwärtsverbindung parallelisiert wird.“[285]

Was am Beispiel des visuellen Systems besonders genau untersucht ist, scheint auch für die Verarbeitungswege anderer Sinnesmodalitäten zu gelten. Vergeblich sucht man nach einer zentralen Einheit, auf die alle Wahrnehmungsdaten hinprojiziert würden und von der man mit Recht erwarten dürfte, dass sie, die gewissermaßen alle Fäden in der Hand hielte, in der Lage wäre, aus der integrativen Verbindung aller Daten einen einheitlichen Bewusstseinszustand zu generieren. Es gibt somit keine genau lokalisierbaren „Bewusstseinsneuronen“, sondern eher gewisse globale Muster der Großhirnrinde, die zumindest als notwendige Bedingung der phänomenalen Wahrnehmung ausgebildet sein müssen, ohne dass begreiflich wäre, wie diese miteinander in Zusammenhang gebracht werden. Diese Schwierigkeit gehört zu den großen Rätseln der Neurophysiologie und firmiert unter dem Namen „Bindungsproblem“.[286]

Zur Lösung dieses Problems sind unterschiedliche Mechanismen vorgeschlagen worden, doch scheint in der gegenwärtigen Diskussion eine von Wolf Singer favorisierte Variante die Oberhand zu gewinnen, da sich zu deren Gunsten bereits empirische Belege vorbringen

[285] Singer (2002), S. 66.
[286] Vgl. Singer (2002), S. 67.

lassen. Singer geht davon aus, „daß die Repräsentation von Inhalten nicht über einzelne hochspezialisierte Nervenzellen erfolgt, sondern über ganze Ensembles von Nervenzellen, die über große Bereiche der Hirnrinde verteilt sein können und sich ad hoc aufgrund der vorhandenen Kopplungen zusammenschließen. Jede einzelne dieser Zellen würde dann nur Teilmerkmale eines bestimmten kognitiven Objektes repräsentieren. In ihrer Gesamtheit aber wären die Antworten der Zellen, die sich an einem Ensemble beteiligen, die nicht weiter reduzierbare Beschreibung eines bestimmten Inhaltes. [...] Wir favorisieren aufgrund experimenteller Hinweise die Hypothese, daß Neuronen in der Hirnrinde, die sich mit der Repräsentation des gleichen Objektes befassen, sich dadurch als zusammengehörig zu erkennen geben, daß sie ihre Aktivität synchronisieren. Die Signatur dieses Ensembles wäre demnach die zeitliche Kohärenz der Aktivität der jeweils teilhabenden Neuronen.“[287]

Was Singer hier als mögliche Lösung des Bindungsproblems präsentiert, ist die zeitliche Synchronisation der neuronalen Entladungsmuster, die etwa in der Größenordnung von 40 Hz, d.h. 40 Entladungen pro Sekunde liegen. Alle Nervenzellen, die das neuronale Korrelat eines einheitlichen Bewußtseinszustandes darstellen sollen, müssen durch einen Prozess der Selbstorganisation ihre Aktionen für kurze Zeit aneinander koppeln. Über das *wie* dieser Selbstorganisation ist wenig bekannt, doch ließe sich durchaus ein quantenmechanisch-holistischer Systemzustand dafür verantwortlich machen, d.h. eine nicht-lokale und instantane Beeinflussung räumlich getrennter Einheiten, die eine kohärente Form ausbilden, die mehr ist als die Summe der Teile und die ihrerseits stabilisierend auf die materiellen Bedingungen ihrer Möglichkeit zurückwirkt, um sich gleichsam selbst über die Zeit zu bringen. Sicher: Selbstorganisationsphänomene könnten auch klassisch erklärt werden und dass hier in der Tat eine nicht-lokale Synchronisation stattfindet, ist nicht mehr als eine These. Wenn man jedoch bereit ist, die quantenmechanische Umgestaltung des physikalischen Realitätskonzepts ernst zu nehmen, so dürften holistische Phänomene keinesfalls ein Exotendasein fristen, sondern zu den grundlegendsten Tatsachen der Welt gehören.

Das wichtigste Argument ist jedoch ein durchaus nicht-physikalisches: Das Bewusstsein selbst ist an Ganzheitlichkeit und Nicht-Lokalität kaum zu überbieten. Es zu zerteilen, hieße es zu zerstören, wie bereits dem tradierten Begriff des „Individuums“ zu entnehmen ist. Ist man an einer *vollständigen* Beschreibung der Welt interessiert, so ist die Existenz

[287] Singer (2002), S. 69.

des Bewusstseins das *erste* und *unmittelbarste* Faktum, an welchem man nicht vorbeikommt, obwohl es gerade im Umkreis der vermeintlich empirisch-objektiven Naturwissenschaften eine institutionalisierte Tradition der Selbstausblendung gibt. Hier, im eigenen Bewusstsein, hat man den Holismus unmittelbar „vor Augen".

Wolf Singers Entdeckung und Erklärung eines quasi nicht-lokalen Synchronisationsphänomens ruht auf dem ontologischen und methodologischen Fundament der klassischen Physik. Sein Subjekt ist und bleibt ein Epiphänomen, das am Gängelband der determinierten Hirnphysiologie geführt wird und sich seine vermeintlichen Freiheiten als pure Illusionen verkaufen lassen muss: „Im Bezugssystem neurobiologischer Beschreibungen gibt es keinen Raum für objektive Freiheit, weil die je nächste Handlung, der je nächste Zustand des Gehirns immer determiniert wäre durch das je unmittelbar Vorausgegangene. Variationen wären allenfalls denkbar als Folge zufälliger Fluktuationen. Innerhalb neurobiologischer Beschreibungssysteme wäre das, was wir als freie Entscheidung erfahren, nichts anderes als eine nachträgliche Begründung von Zustandsänderungen, die ohnehin erfolgt wären, deren tatsächliche Verursachungen für uns aber in der Regel nicht in ihrer Gesamtheit faßbar sind."[288]

Der Wechsel der Perspektive zu holistischen Strukturen ist, wie bereits dargelegt, in der Lage, diese Situation grundlegend zu verändern. Jene Zustände sind gleichermaßen durch materielle Prozesse generiert, wie sie ihrerseits auf diese Materie zurückwirken. Das bewusste Korrelat dieser Zustände, das subjektive Bewusstsein, ist aktiver Moderator seiner Entstehungsbedingungen. Es wirkt, um eine moderne Terminologie zur Anwendung zu bringen, kreative Top-Down-Beeinflussungen aus und diese sind – man erinnere sich der Worte Singers – sogar in vollkommen augenfälliger Weise im Gehirn „verdrahtet": „Es existiert kaum eine Vorwärtsverbindung, die nicht von einer quantitativ mächtigeren Rückwärtsverbindung parallelisiert wird."[289]

Dem ist hier nichts hinzuzufügen.

---

[288] Singer (2002), S. 75.
[289] Singer (2002), S. 66.

7.4. Bewusste Wirklichkeit und die Wirklichkeit des Bewusstseins

Im bisherigen Verlauf der Argumentation wurde versucht, anhand der Entwicklung des physikalischen Weltbildes im 20. Jahrhundert nachzuweisen, dass die Ansprüche empiristisch-reduktionistischer Methodologien in ihrem universellen Deutungsanspruch relativiert werden müssen und dass gerade deren Dekonstruktion der Subjektivität als eines machtlosen und der permanenten Selbsttäuschung erlegenen Epiphänomens materieller Notwendigkeiten nicht mehr gerechfertigt werden kann. Es wurde versucht darzulegen, dass die Sphäre des phänomenalen Bewusstseins gewissermaßen eine teil-autonome Funktion der Natur selbst ist, die in einem komplementären Verhältnis zu den materiellen Bedingungen ihrer Möglichkeit steht. Bezüglich der Dichotomie von Körper und Geist wurde die epiphänomenalistische Interpretation, die von der These des ontologischen Primats der Materie ihren Ausgang nimmt, durch das Muster einer zumindest gleichberechtigten Beziehungsstruktur ersetzt.

Es soll nun die These vertreten werden, dass selbst diese Gleichberechtigung, bei welcher man es als Kritiker reduktionistischer Anthropologien bewenden lassen könnte, aufgrund bestimmter Interpretationen der Quantenphysik zugunsten eines ontologischen Primats des Bewusstseins verschoben werden muss, so dass daraus ein erkenntnistheoretisches Szenario erwächst, welches mit den Grundpositionen der idealistischen Tradition der Philosophie durchaus in enger Verwandschaft steht. Das Besondere an dieser Einsicht ist wiederum, dass sie ihren Ursprung den Bemühungen einer naturwissenschaftlichen Disziplin verdankt, welcher es wie keiner anderen an der rigorosen Trennung zwischen objektiver Wirklichkeit und subjektiver Erkenntnis derselben gelegen ist und welche seit ihren antiken Vordenkern eine auf rein quantitative Relationen reduzierte Idealgestalt der Welt als die eigentliche Realität verstanden haben wollte: „Farbe“, so liest man in einem fast zweieinhalbtausend Jahren alten Fragment des Atomisten Demokrit, „gibt es nur der herkömmlichen Meinung nach und ebenso Süß und Bitter; in Wirklichkeit gibt es nur die Atome und das Leere.“[290]

Es ist nun dieser Sachverhalt, den man als das Grundparadoxon einer objektivierenden Naturbetrachtung überhaupt ansehen kann, und welcher an jener Stelle bereits in aller Klarheit zum Ausdruck kommt. In der Rückführung des Vielfältigen auf einfachste

[290] Demokrit, Frg. 125. Vgl. W. Capelle (1968), S. 438

Prinzipien wird die Welt rational durchschaubar und gleichzeitig ein quasi gesichtsloses Abstraktum. Und bezeichnenderweise findet man hier ebenso schon die Artikulation des Unbehagens, welches aus dieser Zumutung resultiert, denn bei Demokrit wenden sich im Anschluss an besagte Passage die Sinne vorwurfsvoll an den Verstand: „Du armseliger Verstand, von uns hast du deine Gewissheiten genommen und nun willst du uns damit niederwerfen? Dein Sieg ist dein Fall!“[291]

Verlegt man die Genese der neuzeitlichen Naturwissenschaften in das frühe 17. Jahrhundert, so kann zumindest hier von einem derartigen „Fall“ noch keine Rede sein. Im Cartesischen Substanzdualismus wurden die sinnlichen Qualitäten zwar aus der objektiven Welt der *res extensa* entfernt, um diese einer vollständigen Mathematisierung zugänglich zu machen, doch blieb für das Subjekt das Refugium der ontologisch geschützten Seele, in welcher die qualitativen und wertenden Einstellungen vor vernichtenden Relativierungen hinreichend geschützt waren. Bei Descartes ist die Auslagerung der Subjektivität aus dem materiellen Kosmos eine Folge der rationalen, d.h. aus den Prinzipien des Geistes selbst herrührenden Einsicht, dass *res cogitans* und *res extensa* gleichsam *a priori* von derart unterschiedlicher Natur sind, dass sogar das Faktum ihrer offensichtlichen Vereinigung im menschlichen Körper zu einem der größten philosophischen Rätsel avancierte.

Interessanterweise ist nun diese Tendenz der objektivierenden Umgestaltung der Natur auch im Kreise empiristischer und sogar sensualistischer Denker entwickelt worden, die ja außer den immer schon qualitativ gegebenen Sinnesdaten keine anderen Quellen der Erkenntnis zulassen wollten. Die explizite Unterscheidung zwischen den sogenannten „primären“ und „sekundären“ Qualitäten findet sich beispielsweise im Lockeschen *Essay*:

„Diese nenne ich *ursprüngliche* oder *primäre Qualitäten* der Körper, die, wie wir meines Erachtens beobachten können, einfache Ideen in uns erzeugen, nämlich Festigkeit, Ausdehnung, Gestalt, Bewegung oder Ruhe und Zahl. […] solche Qualitäten, die in Wahrheit in den Objekten selbst nichts sind als die Kräfte, vermittels ihrer primären Qualitäten, das heißt der Größe, Gestalt, Beschaffenheit und Bewegung ihrer sinnlich nicht wahrnehmbaren Teilchen, verschiedenartige Sensationen in uns zu erzeugen, wie zum Beispiel Farben, Töne, Geschmacksarten usw. […] nenne ich *sekundäre* Qualitäten.“[292]

---

[291] Demokrit, a.a.O.
[292] Vgl. Locke, Versuch über den menschlichen Verstand, 2, VII. bzw. Locke (2000), Bd. I, S. 148.

Diese Idee der Trennung zwischen objektiv-quantitativer und subjektiv-qualitativer Welt schuf zwar einerseits die Voraussetzungen für die ungemein erfolgreiche naturwissenschaftliche, d.h. im Grunde mathematische Behandlung des Kosmos, denn Sinnesqualitäten selbst sind in ihrem phänomenalen Charakter nicht mathematisierbar, doch bereitete sie andererseits den Boden für eine Identifikation der Realität überhaupt mit der qualitätslosen Idealgestalt derselben, in welcher letztlich kein Platz mehr für Cartesianische Seelen übrig zu sein schien. Das Bewusstsein hatte seine zentrale Stellung in der Wert vollständig eingebüßt, und auch das du Bois-Reymondsche Zugeständnis des *Ignorabimus* änderte nichts an dieser Entwertung. Sein Dasein geriet zu einem sinn- und bedeutungslosen Nebeneffekt des eigentlich realen materiellen Hirnprozesses, der in seiner kausalen Geschlossenheit schlechterdings alles determiniert, was jemals als objektive Wirkung in Erscheinung treten kann.

So rational begründet und methodologisch fruchtbar also jene Unterscheidung zwischen subjektiv-relativen und objektiv-absoluten Erkenntnisgegenständen auch immer sein mochte – sie krankte von Anbeginn ihrer Inkraftsetzung an einer Inkonsequenz, die diejenigen, die der Vorstellung von einer an und für sich existierenden Welt zugeneigt waren und diese für die eigentlich seiende (primäre) Realität erklären wollten, schlechterdings übersehen hatten. Es ist die Einsicht der unvermeidlichen Schwierigkeit, dass auch die Vorstellungen von Raum und Zeit, Kausaliät und primären Qualitäten wie Gestalt und Undurchdringlichkeit, die ja die subjektunabhängigen Zutaten eines vollkommen objektiven Weltmodells sein sollten, letztlich von der erkennenden Subjektivität selbst gemacht bzw. konstituiert sind und eher die Bedingungen widerspiegeln, unter denen deren Erkenntnis und Weltorientierung überhaupt möglich ist, als die tatsächliche Verfasstheit der Wirklichkeit.

Dieser bereits in der kopernikanischen Wende der Erkenntnistheorie Kants vollzogene Wechsel der Perspektive, den man auf die simplifizierte Formel bringen könnte, dass wir die Welt nicht so sehen, wie sie ist, sondern diese für uns ist, wie wir sie sehen, hatte für die naturwissenschaftlich-objektivierende Methodologie zunächst keine Konsequenzen. Mit der Entwicklung der Quantenmechanik im 20. Jahrhundert trat jedoch die Diskrepanz zwischen den Begriffen des Subjekts und deren Anwendbarkeit auf die physikalische Welt zum ersten Mal deutlich zutage, und auch die Möglichkeit,

wissenschaftlich Erkennende und das jeweils Erkannte vollkommen voneinander zu trennen, musste auf grundlegende Weise infrage gestellt werden.

Der zentrale Punkt, an dem sich im Rahmen der Quantentheorie diese erkenntnistheoretischen Schwierigkeiten wie in einem Brennglas bündeln, ist die bis heute ungelöste Frage nach der Natur des ominösen Übergangs vom Wirklichen zum Faktischen, der oftmals auch als „Kollaps“ der Wellenfunktion oder als „Messproblem“ bezeichnet wird. Genau genommen besteht die Quantenmechanik ja aus zwei unterschiedlichen Dynamiken, die im Grunde nicht viel miteinander zu schaffen haben. Der erste Prozess ist die zeitliche Evolution der Schrödingerschen Ψ-Funktion, aus welcher sich die Wahrscheinlichkeitsverteilungen möglicher zukünftiger Messungen ableiten lassen, und die sich grundsätzlich stetig und deterministisch verhält. Der andere Prozess ist der einzelne, diskontinuierliche Messakt, in welchem sich das System auf einen eindeutigen Wert für den infrage stehenden Parameter festlegt. Die ursprüngliche Ψ-Funktion ist damit augenblicklich verschwunden (kollabiert). Sie muss nun durch eine neue ersetzt werden, in welche die durch die Messung erlangte Information eingeht. Eine weitere Messung bringt wiederum diese neue Funktion zum Zusammenbruch, worauf eine weitere Schrödinger-Gleichung formuliert werden muss usw.

Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie geht nun hinsichtlich des Messproblems davon aus, dass alle Beschreibungen von Messgeräten und -ergebnissen im begrifflichen und kategorialen System der alltäglichen Sprache bzw. des Alltagsverstandes formuliert sein müssen, da ansonsten die Physik als Wissenschaft schlechterdings unmöglich sei. Dennoch ist offensichtlich, dass jene unvermeidlichen Begriffe und Kategorien nicht auf die seltsame Form von Realität passen wollen, die den faktisch zu beobachtenden Resultaten zugrundezuliegen scheint. In dieser mangelnden Angemessenheit liegt nach Bohr die eigentliche Ursache dessen, dass wir komplementäre Beschreibungssysteme verwenden und uns mit diskontinuierlichen und nur statistisch vorherzusehenden Quantensprüngen abfinden müssen.

So einleuchtend sich diese Argumentation auch anhören mag: Mathematisch gesehen existiert kein Grund, warum eine bestimmte Apparatur sich als Messgerät auszeichnen sollte, anstatt nicht z.B. selbst nur Gegenstand für eine andere Messung zu sein, und warum dieses Wechselspiel zwischen Messen und Gemessen-Werden sich nicht *ad infinitum* fortspinnen lassen sollte, ohne dass jemals eine Wellenfunktion kollabierte. Nach

dem Formalismus der Theorie treten die zu bestimmenden Objekte mit dem Messgerät grundsätzlich dergestalt in Wechselwirkung, dass beide ein einheitliches verschränktes System ausbilden, ohne dass ein diskontinuierlicher Akt diese Verschränkung spontan auflösen könnte. Um diese mathematisch folgerichtige Idee auf die Spitze zu treiben, hat Erwin Schrödinger sogar das Gedankenexperiment vorgeschlagen, eine lebende Katze zusammen mit einem radioaktiven Atom, einem Detektor (Geigerzähler), der diesen Zerfall registrieren könnte, und eine von diesem Zähler zertrümmerbare Giftflasche in einen hermetisch von der Außenwelt isolierten Kasten zu setzen.[293] Nach der Quantenmechanik müsste sich das ganze System, solange es insgesamt nicht gemessen wird, in einer Superposition der möglichen Zustände befinden, d.h. die Katze müsste sich genau wie der Detektor und das Atom im Status einer Überlagerung beider möglichen Zustände (tot vs. lebendig, zerfallen vs. nicht-zerfallen) befinden. Klingt dies plausibel? Nun, man könnte in der Tat niemals eine derart überlagerte Katze beobachten, denn das Öffnen der Kiste (oder das Durchleuchten mittels Röntgenstrahlung o.ä.) wäre eine Messung und würde das System zu einem eindeutigen Zustand reduzieren (tot *oder* lebendig). Aber was „macht“, dass das Öffnen der Kiste eine Messung wäre, und das Zerfallen oder Nicht-Zerfallen des Atoms in der Kiste nicht? Was würde geschehen, wenn man sich selbst, anstelle der Katze, in die Kiste setzte. Würde man sich selbst als Überlagerung zweier Zustände wahrnehmen?

Der erste, der versuche, dieses Messproblem der Quantenmechanik konsequent zu analysieren, war der Mathematiker John von Neumann. In seinen *Mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik* führte er den Beweis, dass jedwede Kette von Quantenobjekten und Messgeräten, die wiederum zu Messgeräten der Messgeräte werden etc. letztlich und sogar rückwirkend an einer Stelle zu einem eindeutigen Zustand kollabieren muss, an welcher ein bewusster Beobachter ins Spiel kommt und damit quasi als letzte Messstation fungiert.[294] Genau genommen, spielt es sogar gar keine Rolle, an welcher Stelle der Kette man eine Reduktion der Wellenfunktion ansetzt, sofern an deren Ende ein bewusster Beobachter positioniert ist. Die Resultate der Beobachtung sind immer die gleichen. Es ist letztlich so, dass am Ende jeder Kette *notwendig* ein bewusster Beobachter stehen *muss*, denn solange sie nicht beobachtet wird, ist sie in keinem

[293] Vgl. Schrödinger (1935) in Baumann/Sexl (1984), S. 107.
[294] Vgl. von Neumann (1996), S. 222ff.

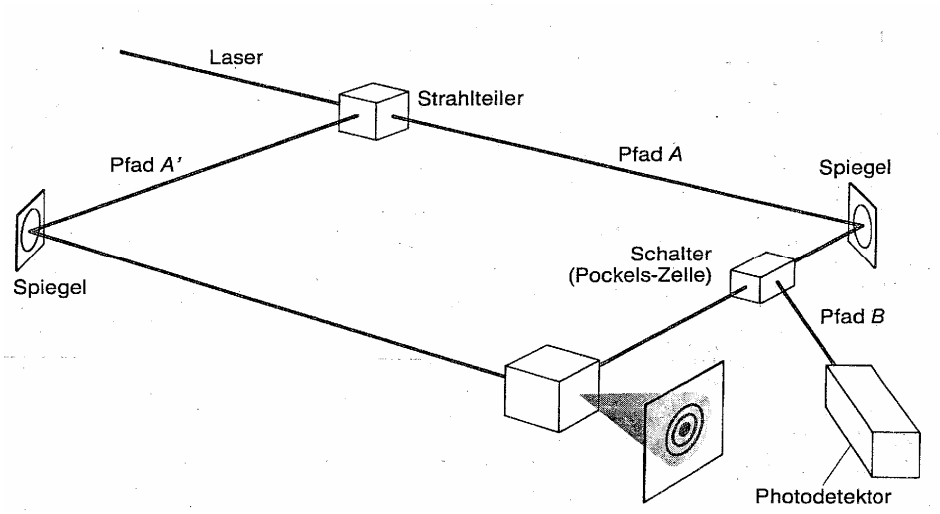
eindeutigen Zustand. Es gibt ja auch keine Möglichkeit herauszufinden, ob die Katze in Schrödingers Kiste lebendig oder tot ist, ohne sie zu beobachten und *wenn* man sie beobachtet, ist sie *entweder* lebendig *oder* tot. Die beiden Szenarien sind, um die Bohrsche Terminologie zu verwenden, komplementär zu einander. Sie entsprechen unterschiedlichen, sich gegenseitig ausschließenden Beobachtungssituationen und eine Paradoxie wird dadurch vermieden, dass es ausgeschlossen ist, beide Aspekte gleichzeitig zu kontrollieren.

Aber jetzt könnte man einwenden, dass es doch völlig abwegig sei anzunehmen, dass eine Katze eine Superposition aus „lebendig“ und „tot“ ausbilde, nur weil sie gerade nicht beobachtet werden kann. Ist es nicht vernünftiger anzunehmen, dass sie eines von beiden *ist*, auch wenn niemand hinsieht?

Bei Katzen ist die Antwort in der Tat nicht ganz einfach. Kleinere Objekte scheinen sich jedoch eindeutig so zu verhalten. Die im Rahmen des EPR-Paradoxons ermittelten empirischen Daten scheinen z.B. tatsächlich nahezulegen, dass diejenigen Attribute an Quantenobjekten, die nach der zugehörigen Ψ-Funktion unbestimmt sein sollen, tatsächlich bis zu einer Messung unbestimmt *sind* und nicht nur unbekannt. Welche im Rahmen eines Versuchs vom Möglichen zum Faktischen wechseln können, ist durch den *gesamten* Versuchsaufbau eindeutig festgelegt und dieser ist wiederum eine Wahl des Experimentators.

In dem oben diskutierten Mach-Zehnder-Interferometer kann man eine dem EPR-Paradoxon analoge Situation herstellen. Statt z.B. eine Barriere fest im oberen Weg zu installieren, kann man warten, bis ein Lichtquant kurz vor dem zweiten Strahlteiler angelangt ist und erst dann entscheiden, ob man eine Welcher-Weg-Information, oder die Interferenz-Eigenschaft bestimmen will. Wenn das Quant sich aber am ersten Strahlteiler bereits für einen der beiden Wege entschieden hat, dann dürfte dieser späte Wechsel der Bedingungen in der Apparatur auf dessen Verhalten gar keinen Einfluss mehr haben.

Man kann bereits erahnen, dass diese Intuition wiederum nicht stimmt. Auch wenn erst im letzten Augenblick entschieden wird, welches Attribut gemessen werden soll, beeinflusst diese Wahl sozusagen rückwirkend, was an Teilen der Apparatur (dem ersten Strahlteiler) zuvor geschehen sein muss. Diese sogenannten delayed-choice-Experimente sind mittlerweile in unterschiedlichsten Varianten durchgeführt worden, von denen eine kurz skizzert sei:



Grafik nach Shimony (1988) in Neuser (1996), S. 75.

Mittels eines sehr schnellen optischen Schalters kann erst sehr spät entschieden werden, ob eine Welcher-Weg-Information erlangt werden soll, oder ob beide Wege zur Interferenz gebracht werden. Da von dieser Entscheidung abhängt, wie sich das Quant am ersten Strahlteiler verhalten soll, ob es einen der beiden Wege als Teilchen oder beide gleichzeitig als Welle nimmt, muss für dieses an der ersten Gabelung entweder ein Blick in die Zukunft möglich sein, oder die spätere Entscheidung am optischen Schalter muss rückwirkend das bereits lange zurückliegende Verhalten am ersten Strahlteiler beeinflussen können.

Es ist nun wiederum angemessener, statt dieser „Zeitreisen“ einfach anzunehmen, dass ein Lichtquant, solange es nicht gemessen wird, weder Welle noch Teilchen ist, sondern tatsächlich hinsichtlich dieser Attribute objektiv und zu jeder Zeit unbestimmt. Ohne Beobachtung, ist dieses Quantenobjekt gar nicht im üblichen Sinne real. Es wäre zwar nicht ganz adäquat zu sagen, dass es ohne Messung überhaupt nichts ist, aber es ist zumindest nichts im gleichen Sinne objektiv Seiendes, wie die Gegenstände der alltäglichen Welt. Die unmittelbare Abhängigkeit seines Seins von den unter Umständen erst sehr spät festgelegten Verhältnissen innerhalb der Apparatur, führt nun wieder zurück auf das unliebsame Messproblem.

Der Formalismus bietet, wie schon angedeutet, keinen Hinweis darauf, dass es ein Messgerät ist, welches eine Möglichkeitsfunktion kollabieren und aus einer *Potentia* eine Wirklichkeit werden lässt, denn dieses Messgerät kann selbst wiederum als Objekt einer anderen Messung angesehen werden usw. Die Kopenhagener Deutung ist somit in diesem Punkt inkonsequent. Eine andere Möglichkeit, die unter den theoretischen Physikern eine

erstaunlich breite Akzeptanz genießt, ist die Annahme, dass die Wellenfunktion eigentlich gar nicht kollabiert. Stattdessen spalte sich das ganze Universum in eine atemberaubende Vielzahl von parallelen Welten auf, in welchen alles, was als Möglichkeit einer Messung real werden könnte, auch tatsächlich realisiert sei. Diese abenteuerlich klingende These ist zwar mathematisch elegant, da es in ihr gar keiner Reduktion der Wellenfunktion bedarf, doch ist sie gelinde gesagt, ein wenig verschwenderisch.

Bis heute ist kein mathematischer Grund entdeckt worden, warum Messgeräte wirkliche Messgeräte sein sollten. Die Kopenhagener-Interpretation legt die Anordnungen *per definitionem* als Messgeräte fest. Die Viele-Welten-Interpretation behauptet, dass es keine realen Messungen gebe, sondern stattdessen Myriarden von parallelen Universen. Es scheint vor diesem Hintergrund durchaus einiges für John von Neumanns These (und die einiger anderer Physiker, wie z.B. Eugene Wigner) zu sprechen, dass es letztlich das *Bewusstsein* eines Subjekts sei, welches die Welt real werden lässt, denn dies ist sogar die Leistung, die ihm, man sollte es nicht für möglich halten, bereits im Rahmen des Weltbildes der klassischen Physik zugekommen ist. Der Versuch, alle sekundären Qualitäten aus der objektiven Welt herauszuhalten, war auch in der klassischen Mechanik schon unmöglich, weil es keine Welt der „nur primären“ Qualitäten geben kann! Selbst die Vorstellung, dass an und für sich Atome existieren, die gegeneinander in elastischer Weise stoßen, bedient sich der Idee der Undurchdringlichkeit, die ein Begriff der Erfahrung ist, der *a posteriori* und unzulässigerweise auf die vermeintlich objektive Welt an sich transferiert wurde.

Man möge aber dennoch einmal annehmen, dass eine solche objektive Welt existierte, die in nichts anderem bestünde, als der Bewegung und den gegenseitigen Kollisionen von Atomen. Wie würde sie „aussehen“? Es gäbe in ihr kein Licht. Sie sich vollkommen dunkel vorzustellen wäre unzulässig, da *schwarz* bereits eine Farbe ist. Sie wäre absolut still, ohne Geruch und Geschmack, ohne taktile Qualitäten, wenn man einmal von der reinen Widerständigkeit absehen würde, von der man streng genommen ja auch nicht sagen könnte, ob es sie gäbe. Kurz: Wenn man konsequent *alles* in Abzug bringen würde, was durch das qualitative Bewusstsein hinzugetan wird, was angeblich keine wirkliche Existenz in den Dingen hat, sondern lediglich eine vom Subjekt generierte Illusion ist, dann wüsste man gar nicht mehr, wovon man sprechen sollte. Es wäre nichts mehr übrig, was den Namen „Realität“ oder besser noch „Wirklichkeit“ auch nur im entferntesten

verdiente. Auch der klassische Physiker würde damit seine eigene Physik *ad absurdum* führen.

Dieser ohnehin schon starke Hinweis auf die zentrale Stellung des Bewusstseins wird in der modernen Physik noch verstärkt. Hier stellt sich heraus, dass sogar diejenigen dynamischen Attribute, deren es zur Objektivierung auch nur eines einzigen klassischen, d.h. an und für sich seiend gedachten Atoms bedürfte, gar nicht existieren (!), ohne dass sie beobachtet werden. Die unbeobachtete quantenmechanische Welt ist gar nicht objektiv *da*. Sie ist sicherlich irgendetwas, d.h. sie hat sicherlich Attribute, die unabhängig vom beobachtenden Subjekt sind, doch ist sie unbestreitbar noch viel weniger real als die Welt der klassischen Atome. Das Bewusstsein hingegen scheint, wenn von Neumann Recht hat, sogar im physikalischen Sinne die Welt erst zu erzeugen. Auf jeden Fall generiert es jedoch *seine* Welt und diese ist das einzige, was jenen Namen verdient. Ohne Bewusstsein gäbe es vielleicht irgendetwas, aber sicherlich keine Welt.

Die Auseinandersetzungen um die Frage nach dem Verhältnis zwischen Bewusstsein und physikalischer Realität sind sicherlich hoch spekulativ und an dieser Stelle detaillierter auf diese Problematik einzugehen, würde den hiesigen Rahmen sprengen. Eines scheint jedoch unbezweifelbar zu sein: das Bewusstsein *hat* eine zentrale Rolle zurückerhalten, die es nicht als Epiphänomen einer vermeintlich ontologisch vorgängigen Materie, sondern als eigenständiges sowie einzig und allein Sinn und Bedeutung stiftendes Agens auszeichnet. Die Welt der Materie, die einst als Inbegriff der Rationalisier- und Objektivierbarkeit angesehen wurde, ist so rätselhaft geworden, dass man gut daran täte, sich an die einzig greifbare Wirklichkeit zu halten, die der eigenen Subjektivität.

„We now believe the world to be All Quantumstuff. The world is one substance. As satisfying as this discovery may be to philosophers, it is profoundly distressing to physicists as long as they do not understand the nature of that substance. For if quantumstuff is all there is and you dont´t understand quantumstuff, your ignorance is complete.“[295]

[295] Herbert (1987), S. 40.

8. Literaturverzeichnis:

Aristoteles: Aristoteles: Über die Seele. Hamburg: Felix Meiner Verlag, 1995.

Aspect (1982): Aspect, Alain / Dalibard, Jean / Roger, Gérad: Experimental Test of Bell´s Inequalities Using Time-Varying Analyzers. In: Physical Review Letters 49 (1982), S. 1804-1807.

Baumann/Sexl (1984): Baumann, Kurt / Sexl, Roman U.: Die Deutungen der Quantentheorie. Braunschweig: Vieweg & Sohn, 1984.

Bell (1989): Bell, John: Speakable and unspeakable in quantum mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

Du Bois-Reymond (1974): Du Bois-Reymond, Emil: Vorträge über Philosophie und Gesellschaft. Herausgegeben von Siegfried Wollgast. Hamburg: Felix Meiner Verlag, 1974.

Born (2003): Born, Max: Die Relativitätstheorie Einsteins. Kommentiert und erweitert von Jürgen Ehlers und Markus Pössel. Berlin u.a.: Springer Verlag, [7]2003.

de Broglie (1923a): de Broglie, Victor: Quanta de lumière, diffraction et interférences. Comptes Rendus 177, 1923, S. 548 ff.

Bohr/Kramers/Slater (1924): Bohr, Niels / Kramers, Hendrik / Slater, John : Über die Quantentheorie der Strahlung. In: Zeitschrift für Physik 24 (1924), S. 69-87.

Bohr (1928): Bohr, Niels: Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik. In: Die Naturwissenschaften 15 (1928), S. 245-257.

Bohr (1935): Bohr, Niels: Kann man die quantenmechanische Beschreibung der Wirklichkeit als vollständig betrachten? Übersetzung des engl. Originals von G. Becker-Bender. In: Baumann/Sexl (1984), S. 87-97. Original: Can quantum-mechanical description of reality be considered complete? In: Physical Review 48 (1935), S. 696-702.

Bohr (1958): Bohr, Niels: Atomphysik und menschliche Erkenntnis. Braunschweig: Vieweg & Sohn, 1958.

Born (1926): Born, Max: Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge.
In: Zeitschrift für Physik 37 (1926), S. 863-867.
Wieder abgedruckt in Baumann/Sexl (1984), S. 48-52.

Capelle (1968): Capelle, Wilhelm: Die Vorsokratiker.
Stuttgart: Alfred Kröner Verlag, 1968.

Crick (1997): Crick, Francis: Was die Seele wirklich ist.
Die naturwissenschaftliche Erforschung des Bewußtseins.
Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 1997.

Cassidy (1992): Cassidy, David C.: Werner Heisenberg und das Unbestimmtheisprinzip.
In: Spektrum der Wissenschaft, Juli 1992.
Wieder abgedruckt in Neuser (1996), S. 42-49.

Descartes (1960): Descartes, René: Discours de la méthode [Französisch – Deutsch].
Hamburg, Felix Meiner Verlag, 1960.

Descartes (1972): Descartes, René: Regeln zur Ausrichtung der Erkenntniskraft.
Hamburg: Felix Meiner Verlag, 1972.

Descartes (1992): Descartes, René: Die Prinzipien der Philosophie.
Hamburg: Felix Meiner Verlag, [8]1992.

de Broglie (1925): de Broglie, Victor: Recherches sur la théorie des quanta. (Dissertation).
Annales de Physique, Zehnte Serie, Band III (1925), S. 22-128.

Einstein (1905a): Einstein, Albert: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. In: Annalen der Physik 17 (1905), S. 132-148. Wieder abgedruckt in: Stachel (1989), Band 2, S. 149ff.

Einstein (1905b): Einstein, Albert: Über die von der molekularkinetischen Theorie geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen.
In: Annalen der Physik 17 (1905), S. 549-560. Wieder abgedruckt in: Stachel (1989), Band 2, S. 224ff.

Einstein (1905c): Einstein, Albert: Zur Elektrodynamik bewegter Körper.
In: Annalen der Physik 17 (1905), S. 891-921. Wieder abgedruckt in: Stachel (1989), Band 2, S. 275ff.

Einstein (1905d): Einstein, Albert: Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig? In: Annalen der Physik 18 (1905), S. 639-641. Wieder abgedruckt in: Stachel (1989), Band 2, S. 311ff.

Einstein (1909): Einstein, Albert: Über die Entwickelung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung. (Vorgetragen in der Sitzung d. physikal. Abteilung der 81. Versammlung Deutscher Naturforscher u. Ärzte am 21.9.1909 in Salzburg). In: Deutsche Physikalische Gesellschaft, Verhandlungen 7 (1909), S. 482-500. Wieder abgedruckt in Stachel (1989), Bd. 2, S. 563ff.

Einstein (1934): Einstein, Albert: Mein Weltbild. Amsterdam: Querido Verlag, 1934.

Einstein/ Podolsky/Rosen (1935): Einstein, Albert / Podolsky, Boris / Rosen, Nathan: Kann man die quantenmechanische Beschreibung der Wirklichkeit als vollständig betrachten? Übersetzung des engl. Originals von G. Becker-Bender. In: Baumann/Sexl (1984), S. 80-86. Original: Can quantum-mechanical description of reality be considered complete? In: Physical Review 47 (1935), S. 777-780.

Einstein (1954): Einstein, Albert: Ideas and Opinions. New York/Avenel, New Jersey: Wings Books, 1954.

d´Espagnat, Bernard: Quantentheorie und Realität. In: Spektrum der Wissenschaft, Januar 1980, S. 68ff. Wieder abgedruckt in Neuser (1996), S. 57-69.

Feynman (1988): Feynman, Richard P.: Vorlesungen über Physik. Band III: Quantenmechanik. München: Oldenbourg Verlag, 1988.

Feynman (2004): Feynman, Richard P.: QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. München: Piper Verlag, ^{10}2004.

Greene (2002): Greene, Brian: Das elegante Universum. Superstrings, verborgene Dimensionen und die Suche nach der Weltformel. Berlin: BvT, Berliner Taschenbuch Verlags GmbH, 2002.

Haeckel (1984): Haeckel, Ernst: Die Welträtsel. – Gemeinverständliche Studien über monistische Philosophie [Nachdruck der 11. Auflage, Leipzig: 1919]. Stuttgart: Alfred Kröner Verlag, 1984.

Hawking (1993): Hawking, Stephen W.: A brief History of Time. From the Big Bang to Black Holes. London u.a.: Bantam Press, 1993.

Heisenberg (1927): Heisenberg, Werner: Über den anschaulichen Inhalt der quantenmechanischen Kinematik und Mechanik. In: Zeitschrift für Physik 43 (1927), S. 172-198. Wieder abgedruckt in Baumann/Sexl (1984), S. 53-79.

Heisenberg (1990): Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie. Stuttgart: Hirzel, [5]1990.

Heisenberg (2001): Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik. München: Piper Verlag, [3]2001.

Herbert (1987): Herbert, Nick: Quantum Reality. Beyond the new Physics. New York: Anchor Books, 1987.

Hermann (1969): Hermann, Armin: Frühgeschichte der Quantentheorie. Mosbach in Baden: Physik Verlag, 1969.

Hermann (2005) Hermann, Armin: Max Planck. Mit Selbstzeugnissen und Bilddokumenten. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, [8]2005.

Hertz (1988): Hertz, Heinrich: Gesammelte Werke (3 Bände). Reprint der Leipziger Ausgabe von 1895. Vaduz / Liechtenstein: Sändig Reprints Verlag, 1988.

Hertz (2002): Hertz, Heinrich: Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt. [Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 263]. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, [2]2002.

Hoffmann/Berz (2001): Hoffmann, C. / Berz, P. (Hrsg): Über Schall.Ernst Machs und Peter Salchers Geschoßfotografien. Göttingen: Wallstein Verlag, 2001.

Kanitscheider (1988): Kanitscheider, Bernulf: Das Weltbild Albert Einsteins. München: Beck, 1988.

Kim (1998): Kim, Jaegwon: Philosophie des Geistes. Wien / New York: Springer, 1998.

Krüger (1970): Krüger, Lorenz (Hrsg.): Erkenntnisprobleme der Naturwissenschaften. Köln / Berlin: Kiepenheuer & Witsch, 1970.

Laplace (1932): de Laplace, Pierre-Simon: Versuch über die Wahrscheinlichkeit. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1932.

Locke (2000): Locke, John: Versuch über den menschlichen Verstand. [2 Bände]. Hamburg: Felix Meiner Verlag, [5]2000.

Lorenz (1983): Lorenz, Konrad: Der Abbau des Menschlichen. München: Piper & Co., 1983.

Meya/Sibum (1987): Meya, Jörg / Sibum, Heinz Otto: Das fünfte Element. Wirkungen und Deutungen der Elektrizität. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 1987.

von Neumann (1996): von Neumann, John: Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Berlin / Heidelberg / New York: Springer, 1996. Nachdruck der Ausgabe Berlin: Springer, 1932.

Neuser (1996): Neuser, W. / Neuser-von Oettingen, K. (Hrsg.): Quantenphilosophie. Heidelberg: Spektrum – Akademischer Verlag, 1996.

Oppenheim/Putnam (1958): Oppenheim, Paul / Putnam, Hilary: Unity of Science as a Working Hypothesis. In: Feigl, H. / Scriven, M. / Maxwell, G. (Hrsg.): Concepts, Theories and the Mind-Body Problem. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1958. Deutsche Übersetzung von Volkhard Scholten in Krüger (1970), S. 339-371.

Penrose (1990): Penrose, Roger: The Emperor´s New Mind. Concerning computers, minds and the laws of physics. New York: Oxford University Press, [3]1990.

Planck (1948): Planck, Max: Wissenschaftliche Selbstbiographie. Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1948.

Planck (1973): Planck, Max: Vorträge und Erinnerungen.
[Reprographischer Nachdruck der 5. Auflage, Stuttgart, 1949.]
Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1973.

Popper (1994): Popper, Karl R.: Objektive Erkenntnis: Ein evolutionärer Entwurf.
Hamburg: Hoffmann und Campe, [2]1994.

Ryle (1969): Ryle, Gilbert: Der Begriff des Geistes. Stuttgart: Philipp Reclam, 1969.

Schrödinger (1935): Schrödinger, Erwin: Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik.
In: Die Naturwissenschaften 23 (1935), S. 807-812, 823-828, 844-849.
Wieder abgedruckt in Baumann/Sexl (1984), S. 98-129.

Schrödinger (2001): Schrödinger, Erwin: Was ist Leben?
Die lebendige Zelle mit den Augen des Physikers betrachtet.
München: Piper Verlag, [5]2001 [Original: Cambridge, 1944].

Shimony (1988): Shimony, Abner: Die Realität der Quantenwelt.
In: Spektrum der Wissenschaft, März 1988.
Wieder abgedruckt in Neuser (1996), S. 70-77.

Singer (2002): Singer, Wolf: Der Beobachter im Gehirn. Essays zur Hirnforschung.
Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2002.

Singer (2004): Singer, Wolf: Keiner kann anders, als er ist.
Artikel in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung vom 8.1.2004.

Stachel (1989): Stachel, John (Editor): The collected Papers of Albert Einstein.
Princeton: Princeton University Press, 1989.

Taylor (1909): Taylor, Geoffrey: Interference fringes with feeble light.
In: Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 15 (1909), S. 114ff.

Wheaton (1983): Wheaton, Bruce R.: The tiger and the shark. Empirical roots of
wave-particle dualism. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1983.

Weinmann (1980): Weinmann, Karl Friedrich: Die Natur des Lichts.
Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1980.

Schilpp (1970): Schilpp, Paul Arthur (Ed.): Albert Einstein: Philosopher-Scientist. La Salle, Illinois: Open Court Publishing Co. / London: Cambridge University Press, [3]1970.

Zeilinger (2003): Zeilinger, Anton: Einsteins Schleier. Die neue Welt der Quantenphysik. München: Beck, [5]2003.