



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Wittgensteins sprachphilosophischer Grenzbegriff im Kontext
Heisenbergs moderner Physik als Stütze einer
zeitgemäßen Physikdidaktik

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer.nat.)

Verfasserin / Verfasser:	Gerfried Wiener
Matrikel-Nummer:	0406264
Studienrichtung (lt. Studienblatt):	A 190 412 299
Betreuerin / Betreuer:	Univ.-Prof. Dr. Romano A. Rupp

Wien, am 20. April 2010

Zusammenfassung

Das Kapitel der modernen Physik nimmt aktuell einen sehr gewichtigen Platz in der Didaktik der Physik ein. Die sprachliche Vermittlung der modernen Physik zeigt Lehrpersonen allerdings sehr rasch ihre Grenzen auf. Wie lässt sich etwas erklären, worüber man gar nicht sprechen kann? Oder - laut Ludwig Wittgenstein - gar nicht sprechen darf!

In dieser Arbeit werden die Ideen, Positionen und Erkenntnisse einerseits Ludwig Wittgensteins und andererseits Werner Heisenbergs - einem der Hauptbegründer der Quantentheorie und damit der modernen Physik - gegenübergestellt, analysiert und zusammengeführt. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse stellen den Ausgangspunkt einer neu entwickelten Didaktik der modernen Physik dar.

Kapitel 1 widmet sich den Biographien Wittgensteins und Heisenbergs. Zusätzlich zu den einzelnen historischen Abrissen findet sich eine verschränkte Auflistung der einzelnen Lebensstationen, welche selten beachtete Gemeinsamkeiten offenbart.

In Kapitel 2 folgt eine Darstellung des Grenzbegriffes bei Wittgenstein, der in Kapitel 3 die Präsentation der Verbindung von Wittgensteins Tätigkeit und der Naturwissenschaft nachgestellt wird.

Kapitel 4 ist der Frage nach der Verbindung von Sprache und Wirklichkeit bei Heisenberg untergeordnet. Nach einer genauen Untersuchung von Induktion, Deduktion, Analogie und eingebürgerten Sprechweisen erfolgt in Kapitel 5 die Zusammenführung von Physik und Philosophie. Hier treffen Wittgensteins Sätze auf Heisenbergs Theorien wobei sie Unterstützung durch Kant und weitere Vertreter des deutschen Idealismus erhalten.

In Kapitel 6 werden die neu gewonnen Erkenntnisse schließlich zusammengeführt und auf die aktuelle Physikdidaktik umgelegt. Es folgt eine ausführliche Lehrplananalyse sowie eine aktuelle Schulbuchanalyse. Eigens ausgearbeitete und erprobte Modellvorschläge zur modernen Physik sowie ein didaktisches Schlussresümee bilden den Abschluss dieser Arbeit.

Summary

The chapter of modern physics takes currently a very important place in the teaching of physics. Explaining modern physics, however, shows teachers very rapidly their limits. How to explain something, you can't speak about? Or speak loudly Ludwig Wittgenstein, you must not speak about!

In this work the ideas, positions and knowledge of Ludwig Wittgenstein and Werner Heisenberg - one of the main founders of quantum theory and thus of modern physics - are compared, analyzed and merged. The findings provide the starting point of a newly developed teaching of modern physics.

Chapter 1 of this thesis is devoted to the biographies of Wittgenstein and Heisenberg. In addition to their individual descriptions, a folded list of their individual life stages is attached, which reveals rarely noticed similarities.

In Chapter 2 a presentation of the frontier concept of Wittgenstein is given, which is followed by the presentation of the connection between Wittgenstein's activity and the natural sciences in Chapter 3.

Chapter 4 deals with the question of the connection between language and reality produced by Heisenberg. After a thorough investigation of induction, deduction, analogy and naturalized ways of speaking, the merging of physics and philosophy is done in Chapter 5. Here Wittgenstein's sentences take on Heisenberg's theory which they receive support from Kant and other representatives of German idealism.

In Chapter 6, the newly gained insights are then joined and passed on to the current physics education. There follows a detailed curriculum analysis and a current textbook analysis. Specially developed and tested model proposals to modern physics as well as a didactic summary form the final conclusion of this work.

Danksagung

Mein erster Dank gilt meinem Diplomarbeitsbetreuer Herrn Univ.-Prof. Dr. Romano A. Rupp, der mich nach einer gemeinsamen naturphilosophischen Diskussion ermutigte, meine damals bereits begonnene Diplomarbeit zugunsten der nun dargestellten Arbeit zu verwerfen. Nicht nur seine von unglaublicher Fachkompetenz geprägten Anmerkungen und Hinweise, sondern auch die Vielzahl an philosophischen Querverweisen, waren mir beim Verfassen meiner Arbeit eine sehr große Hilfe!

Bei meinem langjährigen Studienkollegen Herrn Mathias Tomandl möchte ich mich für die intensive Auseinandersetzung mit quantentheoretischen Problemstellungen in unzähligen Diskussionen im Laufe meines gesamten Studiums und speziell in der Endphase der Fertigstellung meiner Arbeit recht herzlich bedanken!

Ein Großteil der in dieser Arbeit entwickelten didaktischen Konzepte fußt auf Erkenntnissen aus meiner Lehrtätigkeit am GRG Bertha von Suttner - Schulschiff. Daher ergeht ein großer Dank an meine Kolleginnen und Kollegen, die mich immer wieder durch wertvolle Gespräche unterstützt haben. Der größte Dank gebührt in diesem Zusammenhang aber den von mir unterrichteten Schülerinnen und Schülern, die durch ihre Anmerkungen und Hinweise, aber vor allem durch ihre Begeisterung für die Physik, eine große Hilfestellung leisteten!

Der Entschluss zum Physikstudium wurde wesentlich von Frau Mag. Doris Oberlerchner-Bischof und Herrn Dr. Klaus Rom vorbereitet, die mir im Laufe meiner Schulzeit gezeigt haben, wie moderner, inspirierender Unterricht möglich ist. Vielen Dank dafür!

Zum ersten Mal Bekanntschaft mit den Theorien der Quanten machte ich durch Herrn Rainer Tröbinger, dafür und für die vielen nächtelangen Gespräche recht herzlichen Dank!

Schlussendlich gilt mein besonderer Dank allen Mitgliedern meiner Familie, allen voran meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben und auf deren Unterstützung ich immer zählen konnte!

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Summary.....	5
Danksagung	7
Inhaltsverzeichnis	8
1 Einleitung.....	11
1.1 Motivation	11
1.2 Leben und Werke	12
1.2.1 Verschränkte Biographien	12
1.2.2 Zeittafeln	25
2 Wittgensteins Grenze.....	27
2.1 Naturwissenschaftliche Erkenntnis	27
2.2 Von der Grenze.....	29
2.3 Über die Grenze.....	31
2.4 Der Unsinn	33
3 Wittgenstein und die Naturwissenschaft.....	37
3.1 Naturwissenschaftliche Sätze	37
3.2 Physikalische „Weltbeschreibung“	41
3.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Tractatus	43
4 Sprache und Wirklichkeit nach Heisenberg	47
4.1 Von der Sprache	47
4.1.1 Die Anfänge	48
4.1.2 Sprachphilosophischer Ursprung	49
4.2 Wahrheit und Dichtung	52
4.3 Symbolhaftigkeit.....	54
4.4 Widerspruchsfreiheit.....	54
4.4.1 Die eingebürgerte Sprechweise.....	55
4.4.2 Die präzise wissenschaftliche Sprache	57

5 Physik und Philosophie..... 63

5.1	Zwischen Wittgenstein und Heisenberg	63
5.2	Quantenmechanik und Kant'sche Philosophie	67
5.2.1	Analytisch - Empirisch - Synthetisch.....	68
5.2.2	Die Grenzen des Kausalgesetzes	70
5.2.3	Das physikalische Ding an sich	71
5.2.4	Die Kritik am „Ding an sich“	73
5.3	Naturphilosophisches Resümee.....	76

6 Didaktik der modernen Physik 79

6.1	Moderne Physik in der Schule.....	79
6.2	Lehrplananalyse	81
6.2.1	Der aktuelle Lehrplan 2004/05	83
6.2.2	Der vorhergegangene Lehrplan 1989 - 2004/05.....	84
6.3	Schulbuchanalyse	85
6.3.1	Sexl et al.: Physik	86
6.3.2	Jaros et al.: Physik Compact	95
6.3.3	Apolin: Big Bang	101
6.3.4	Erkenntnisse & Rückschlüsse	106
6.4	Modellvorschläge	110
6.4.1	Aufbau der Materie.....	111
6.4.2	Aufbau der Materie II	114
6.4.3	Was ist Licht?.....	117
6.5	Didaktisches Resümee und Zusammenfassung	121

7 Anhang.....125

Bibliographie	125
Angaben zum Autor	130

1 EINLEITUNG

Aber die Wirklichkeit ist schließlich doch
stärker als unsere Wünsche
[Werner Heisenberg]

1.1 Motivation

Die naturwissenschaftlichen Fächer an sich haben aktuell einen sehr schweren Stand im österreichischen Bildungssystem. Lässt man nicht im Chemieunterricht etwas explodieren, oder im Physikunterricht etwas mit Hilfe von Hochspannung schmelzen, gelten diese Fächer als langweilig, schwierig und kaum lebensnah. Hinzu kommt eine breite Akzeptanz für mathematisches Unvermögen - es ist annähernd mondän zuzugeben, die Grundrechenarten nicht mehr „im Kopf“ zu beherrschen, von Kenntnissen der Integral- und Differentialrechnung ganz zu schweigen. Speziell die Physik gilt in den meisten Umfragen an Schulen als unbeliebtester Gegenstand.¹

Immerhin begegnet die Physik dieser Ernüchterung mit dem Kapitel der „modernen Physik“, welche einerseits wie ein leuchtender Rettungsanker für Hoffnung sorgt, allzeit bereit, Schüler/innen über das Erklären der Vorgänge der realen Welt hinaus mit den „neuesten“ Erkenntnissen und Erklärungen für die Physik zu begeistern, andererseits den Lehrpersonen - vollgeladen mit paradoxen, abstrakten Erkenntnissen - ganz brutal die Grenzen der Sprache aufzeigt.

Diese Grenzen der Sprache zeigen eine frappierende Ähnlichkeit mit den Grenzen der Sprache, wie sie bereits Ludwig Wittgenstein in seinem Tractatus logico-philosophicus mit dem berühmten Satz: „Die Grenzen meiner Sprache bedeuten die Grenzen meiner Welt“ festsetzte.

Die Hauptaufgabe dieser Diplomarbeit liegt daher in der Beantwortung der Frage, inwiefern Wittgensteins Sätze zu einer Bereicherung der Physikdidaktik beitragen können. Denn dass die Sprache das wohl wichtigste Werkzeug der Didaktik darstellt, leuchtet ein. Ebenso wird einem der Umstand rasch klar, dass gewisse Formulierungen und Erklärungen der modernen Physik nicht eindeutig sind.

¹ Vgl. Pietschmann, Herbert: Geschichten zur Teilchenphysik, Physiker sind auch nur Menschen, Ibero Verlag, Wien, 2007, S. 7

Durch die Verwendung von alltagssprachlichen Begriffen zur Erklärung von quantentheoretischen Phänomenen werden falsche Bilder erzeugt, die einem Verständnis der modernen Physik nicht zuträglich sind.

Speziell die verwendete Sprache in Schulbüchern in Bezug auf die Relativitätstheorie unterliegt bereits seit längerer Zeit einer genauen Untersuchung.² Mit der nun angestellten Bearbeitung von Quantentheorie und Philosophie soll diese Reihe um einen weiteren Beitrag erweitert werden. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Interdisziplinarität, ausgehend von dem Urverständnis der Naturphilosophie.

Zur näheren Heranführung an die Thematik sind zu Beginn dieser Arbeit kurze Abrisse sowohl Wittgensteins als auch Heisenbergs Leben und Werke dargestellt. Dadurch soll die Basis für ein tiefgehendes Verständnis der weiteren Darstellungen gelegt werden.

1.2 Leben und Werke

1.2.1 Verschränkte³ Biographien

„Sagen Sie ihnen, dass ich ein wundervolles Leben gehabt habe!“⁴ Diese Worte wurden Ludwig Wittgenstein als seine letzten, die er am 29. April 1951 an seine Freunde adressierte, in den Mund gelegt. Zurück liegen beinahe genau 62 Jahre, die es einem schwer machen, seinen letzten Worten Glauben zu schenken.

„Das Zentrale, das Christliche. Wenn jemand sagen würde, ich sei kein Christ gewesen, der hätte nicht Recht. Freilich, wenn jemand sagen würde, ich sei ein Christ gewesen, der würde wohl zu viel sagen.“⁵ sagte Werner Heisenberg wenige Tage vor seinem herannahenden Tode zu Carl Friedrich von Weizsäcker. Er starb am 1. Februar 1976 in München.

Wittgenstein und Heisenberg. Zwei unterschiedliche Zeitgenossen, die viel mehr gemeinsam hatten und miteinander verband, als man auf den ersten Blick für möglich halten würde. Zum besseren Verständnis ihres Wirkens sind nun in weiterer Folge die zwei Biographien angeführt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf fachlichen Überschneidungen sowie prinzipiellen Parallelen.

² Vgl. Apolin, Martin: Die Sprache in Physikschulbüchern unter besonderer Berücksichtigung von Texten zur speziellen Relativitätstheorie. Unveröffentlichte Dissertation, Wien 2002

³ In der Quantentheorie versteht man unter dem Phänomen der Verschränkung den Umstand, dass zwei oder mehrere verschränkte Teilchen nicht mehr durch ihre jeweiligen definierten Zustände beschrieben werden können. Man betrachtet sie nur mehr als Gesamtsystem. Im gleichen Maße sind die hier ineinander verwobenen Biographien zu erachten. Zwar handelt es sich um zwei individuelle Beschreibungen beider Leben, doch zur besseren Herausarbeitung ihrer Gemeinsamkeiten beziehungsweise Unterschiede wurden die zwei Lebensbahnen zumindest hier am Papier zusammengeführt.

⁴ Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 23

⁵ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 38f

1.2.1.1 Ludwig Wittgenstein (1889 - 1951)

Wittgenstein wurde am 26. April 1889 in Wien geboren - knapp zwölf Jahre vor Heisenberg, der am 5. Dezember 1901 in Würzburg das Licht der Welt erblickte. Zu dieser Zeit unterrichteten und forschten Ernst Mach und Ludwig Boltzmann an der Universität Wien. Josef Breuer und Sigmund Freud veröffentlichten 1893 ihren Aufsatz *über den psychischen Mechanismus hysterischer Phänomene*, und legten 1895 die *Studien über Hysterie* nach, wodurch die Geburtsstunde der Psychoanalyse begründet war.⁶ Wien, Hauptstadt der kaiserlichen und königlichen Monarchie der Habsburger, war zur Zeit um die Jahrhundertwende kulturell und wissenschaftlich ein enorm fruchtbares Feld. Außenpolitisch glich Österreich-Ungarn zwar eher bereits einem Schatten seines einstigen Selbst⁷, doch im Inneren herrschte vergnügliche Stimmung. Johann Nestroy's Stücke feierten nicht nur am Hofe sondern auch beim Volk Triumphe⁸, die Kaffeehäuser wurden als Rückzugsangebot vom täglichen Leben dankbar angenommen und der Prater bot Vergnügungen aller Art.⁹ Wittgenstein wuchs in einem gut behüteten Elternhaus auf. Sein Vater, Karl Wittgenstein, arbeitete sich bis zum Zentraldirektor der Prager Eisenbahnindustrie-Gesellschaft hoch, wodurch er sowohl Einfluss als auch Vermögen erlangte - später sich jedoch der teilweise heftigen Kritik an seiner Person beugte, und sich ausschließlich der Pflege seines Vermögens und der Familienharmonie widmete. Gemeinsam mit seiner Frau Leopoldine, geborene Kalmus, achtete er darauf, die kulturelle Vielfalt im Hause Wittgenstein hoch zu halten. So waren Gustav Mahler und Johannes Brahms oft gesehene Gäste, darüber hinaus unterstützte Karl Wittgenstein die Wiener Sezession um Gustav Klimt. Wenngleich der sehr kinderreiche Haushalt - Ludwig Wittgenstein hatte vier Brüder und drei Schwestern - eine sehr harmonische Kinderstube bot, musste die Familie im Laufe der Zeit mehrere Schicksalsschläge hinnehmen, Ludwigs Brüder Hans, Rudolf und Kurt begingen nacheinander Selbstmord. Der Gedanke an den Freitod war für Ludwig Wittgenstein bereits seit seiner Jugend ständig präsent.¹⁰

Trotz seiner eher mageren Erfolge in der Linzer Oberrealschule von 1903 bis 1906 - zuvor war er von Hauslehrern und auch seinem Vater unterrichtet worden - sollte er in Wien bei Boltzmann Physik studieren. Doch nach dessen Selbstmord 1906 ging Wittgenstein an die Technische Hochschule in Berlin-Charlottenburg, der heutigen Technischen Universität Berlin, um seine Ingenieurausbildung zu beginnen. 1908 erfolgte der Wechsel an das College of Technology in Manchester, und nach mehreren Jahren, in denen ihm sein Weg fort von der experimentellen Arbeit über die angewandte Mathematik hin zur reinen Mathematik führte, schloss er 1911 sein Studium ab, um nach einem Gespräch mit Gottlob Frege 1912 zu Bertrand Russell ans Trinity College in Cambridge zu wechseln.¹¹

⁶ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 25

⁷ Vgl. Vocelka, Karl: Österreichische Geschichte, CH Beck Verlag, München, 2. Auflage, 2007, S. 78f

⁸ Vgl. Žmegač Viktor, Škreb Zdenko, Sekulić Ljerka: Kleine Geschichte der deutschen Literatur, Von den Anfängen bis zur Gegenwart, Scriptor Verlag, Frankfurt am Main, 1981, S. 184

⁹ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 24

¹⁰ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 27

¹¹ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 27

Dort beschäftigte er sich zunächst, ganz seinen Mentoren Frege und Russell folgend, mit der Mathematik und Logik. Frege beschreibt den philosophischen Charakter seines Studiums wie folgt:

*Eine gründliche Untersuchung des Zahlbegriffs wird immer etwas philosophisch ausfallen müssen. Diese Aufgabe ist der Mathematik und Philosophie gemeinsam.*¹²

Wittgenstein feierte rasch Erfolge in Cambridge. Welchen positiven Eindruck er auf seine Mitmenschen gemacht haben muss, lässt sich in folgender Bemerkung, die Russell 1912 gegenüber Hermine Wittgenstein, der Schwester des damals 23-jährigen Wittgenstein äußerte, erkennen:

*Wir erwarten, dass der nächste große Schritt in der Philosophie von Ihrem Bruder getan wird.*¹³

Im Herbst 1913 verließ Wittgenstein Cambridge Richtung Norwegen, um sich in der Nähe von Skjolden, am Ende des Sogne-Fjords einzuquartieren. In der Zeit bis 1914 entstanden, unbestreitbar durch die weitläufige Landschaft motiviert, die „Notes on Logic“. Bemerkungen, welche bereits Grundgedanken des Tractatus' beinhalteten.¹⁴ Schon im Frühsommer 1914 kehrte Wittgenstein jedoch nach Wien zurück, und unmittelbar nach Ausbruch des Ersten Weltkrieges meldete er sich, weniger aufgrund nationaler oder kriegsbegeisterter Motive, sondern eher aufgrund einer gewissen *Loyalität gegenüber allen legitimen Gewalten religiöser wie gesellschaftlicher Natur*¹⁵, freiwillig zur österreichischen Armee. Als Soldat und später als Kriegsgefangener bei Monte Cassino - zwischen Rom und Neapel - vollendete er 1918 sein Meisterwerk, den *Tractatus logico-philosophicus*, das einzige philosophische Werk, das er zu seinen Lebzeiten veröffentlichte. Doch bis zu dieser Veröffentlichung war es ein langer steiniger Weg. Zunächst bot er sein Werk dem Jahoda & Siegel Verlag, in dem auch Kraus' *Fackel* erschien, an, doch dieser sagte ebenso wie der Braumüller Verlag ab.¹⁶

Wittgenstein hatte sich zu diesem Zeitpunkt damit abgefunden, dass sein Tractatus doch nicht publiziert werden würde, und teilte dies Russell mit folgendem Argument sehr beruhigend mit:

*Meine Arbeit ist nämlich entweder ein Werk ersten Ranges, oder sie ist kein Werk ersten Ranges. Im zweiten - wahrscheinlicheren - Falle bin ich selbst dafür, dass sie nicht gedruckt werde. Und im ersten ist es ganz gleichgültig ob sie 20 oder 100 Jahre früher oder später gedruckt wird. Denn wer fragt danach ob z.B. Die Kritik der reinen Vernunft im Jahre 17x oder y geschrieben worden ist! Ja, eigentlich brauchte sie in diesem Falle auch nicht gedruckt zu werden. [...]*¹⁷

¹² Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 29

¹³ Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 29

¹⁴ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 31

¹⁵ Diese Aussage geht auf Wittgensteins engen Freund Paul Engelmann zurück, der zudem anmerkt, dass ihm dieses Verhalten gegen alle echte Autorität zur zweiten Natur geworden war und ihm zeitlebens jede revolutionäre Gesinnung, welcher Art immer, einfach „Unanständigkeit“ bedeutete. (Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 32)

¹⁶ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 29

¹⁷ Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 34

Dass es schließlich doch noch zu einer Veröffentlichung kam ist Russell zu verdanken, der das Werk mehreren Verlagen anbot, und es so zu einer ersten fehlerhaften Publikation unter dem Titel „Logisch-philosophische Abhandlung“ in Wilhelm Ostwalds *Annalen der Naturphilosophie*, Bd. 14, H. 3-4, 1921 kam. Der fehlerbereinigte Tractatus erschien als zweisprachige Ausgabe 1922 mit einem Vorwort von Russell bei Routledge & Kegan Paul in London.¹⁸

Die Veröffentlichung des Tractatus‘ stellt eine Zäsur im Leben Wittgensteins dar. Durch ihn hatte er sich prinzipiell von der Philosophie zurückgezogen, er entledigte sich zudem von seiner Erbschaft, die ihm sein 1913 verstorbener Vater hinterlassen hatte, und um die Sache abzurunden, war auch das Imperium der Habsburger bereits zerbrochen. Wittgenstein verabschiedete sich von Wien, der viel zu großen Hauptstadt eines mittlerweile zu kleinen Landes, entledigte sich seines gesamten Hab und Gut und trat eine Tätigkeit als Volksschullehrer in Niederösterreich an. Zunächst erteilte er Unterricht in Trattenbach und Haßbach, später in Puchberg und in Otterthal. Dieser Lebenswandel, weg vom bequemen Universitätsleben hin zum beinahe asketisch anmutenden Leben am Lande spiegelte sich allerdings nicht in der Erfüllung seiner Pflichten wider. Er ließ Tierskelette präparieren, technische Modelle bauen und unternahm von Zeit zu Zeit Exkursionen nach Wien.¹⁹ Dass er dabei auch großen Wert auf eine gewisse Strenge legte, ist angesichts seines geradlinigen Wesens kaum verwunderlich, doch daran sein späteres Scheitern als Volksschullehrer aufzuhängen, beleuchtet wohl nur eines Facette seiner Tätigkeit. Vielmehr muss man beachten, dass diese in die Nachkriegszeit fiel, und die Familien seiner Schüler/innen waren auf die Hilfe ihrer Kinder angewiesen. So ist es nur zu verständlich, dass man seinem Unterricht wenig Verständnis entgegenbrachte. Seine Volksschulkarriere endete nach sechs Jahren 1926, woraufhin er sich für ein halbes Jahr als Gärtnergehilfe im Kloster der Barmherzigen Brüder zu Hüttelsdorf verdingte²⁰, um sich danach, nach einem kurzen Ausflug in die Architektur²¹, inspiriert durch einen ursprünglich als Ferienaufenthalt geplanten Besuch in Cambridge, als Forschungsstudent am Trinity College einzuschreiben. Dieser Zustand war aber nur von kurzer Dauer, sein Tractatus wurde als Doktorarbeit eingereicht, Russell fungierte als Prüfungsvorsitzender, und nach dem Erwerb des Doktorgrades im Sommer 1929 erhielt Wittgenstein zunächst ein Stipendium, um 1930 für fünf Jahre als Research Fellow angestellt zu werden. Grundlage seiner Bewerbung dafür war ein Text, der heutzutage unter dem Titel *Philosophische Bemerkungen* bekannt ist.²² Die neu aufgenommene verstärkte Beschäftigung mit der Philosophie führte bei Wittgenstein zu einem Umdenken. Bekanntestes Beispiel stellen dabei seine 1937 während eines einjährigen Aufenthalts in Norwegen abgefassten *Philosophischen Untersuchungen* dar, in denen er sich klar vom vormals im Tractatus beschrittenen Weg entfernte,

¹⁸ Vgl. Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Reclam 1994, S. 7

¹⁹ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 105

²⁰ Vgl. Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Reclam 1994, S. 7

²¹ Wittgenstein hatte die Zeit als Volksschullehrer auch zur Pflege alter Kontakte genützt. So wurde der Kontakt mit Paul Engelmann, seines Zeichens ein Schüler von Adolf Loos, wieder verstärkt kultiviert. Dieser vermittelte ihm die Möglichkeit, sich am Bau des Hauses für Wittgensteins Schwester Gretl verstärkt einzubinden. Dort fiel er nicht nur durch seine technische Vorbildung auf, sondern vor allem durch außerordentliche Genauigkeit und Kompromisslosigkeit in Planung und Ausführung seiner Arbeiten - den Tractatus in der Hand haltend, hätte man wohl nichts anderes erwartet.

(Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 106f)

²² Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 107f

um so eine neue Denkweise in der Philosophie zu schaffen. 1938 bot er sein neues Werk der Cambridge University Press an, welche das Buch zusammen mit dem Tractatus veröffentlichen wollte, doch Wittgenstein schaffte es zu Lebzeiten nicht, den fertigen Text zu übergeben. Einer der Hauptgründe dafür war die zu dieser Zeit erfolgte Annexion Österreichs durch Deutschland, welche Wittgenstein sofort um die britische Staatsbürgerschaft ansuchen ließ. Zudem lebten noch zwei seiner Schwestern in Wien, welche er 1939 durch Besuche in Wien, Berlin und New York sozusagen „freikaufen“ konnte, und so sicherstellte, dass sie die Nazizeit weitgehend ungeschoren überlebten.²³

1939 wurde er zum Professor für Philosophie ernannt. Bedingt durch den im Herbst 1939 ausbrechenden Zweiten Weltkrieg hatte Wittgenstein, der sich in dieser Zeit in einem Londoner Krankenhaus und in einem medizinischen Labor in Newcastle mit der Forschung im Zusammenhang mit Kriegsverwundungen befasste,²⁴ seine Professur nur von 1945 bis 1947 inne.²⁵ Seine Vorlesungen unterschieden sich dabei kaum von seinen Seminaren, beide trugen wesentlichen Gesprächscharakter, Wittgenstein pflegte die Dialogform, welche sich ja auch im klaren Gegenteil zum Tractatus in den Philosophischen Untersuchungen äußert. Wenngleich sich seine Lehrveranstaltungen sehr großen Zuspruchs rühmen konnten, war Wittgenstein selbst selten zufrieden mit seiner Lehrtätigkeit, wie folgende Beschreibung andeutet:

Beim Lehren der Philosophie bin ich wie ein Stadtführer, der euch zeigt, wie ihr euch zurechtfinden könnt. Ich muss euch von Nord nach Süd, von Ost nach West durch die Stadt führen, von Euston zu Embankment, von Piccadilly zu Marble Arch. Nachdem ich euch oft, in alle Richtungen, durch die Stadt geführt habe, werden wir viele Straßen mehrmals durchlaufen haben - jedes Mal als Teil einer anderen Tour. Am Ende des Ganzen werdet ihr London kennen; ihr werdet euch auskennen wie ein Londoner. Allerdings, ein guter Führer wird euch öfter durch die wichtigeren Straßen als durch Nebenstraßen führen; ein schlechter Führer wird das Gegenteil tun. In der Philosophie bin ich eher ein schlechter Führer.²⁶

Nachdem er 1947 seine Professur aufgab, lebte Wittgenstein eine Zeitlang in Irland in einem Häuschen an der Küste. Dort arbeitete er an dem zweiten Teil seiner philosophischen Untersuchungen, sowie an seinen Bemerkungen *Über Gewissheit* und seinen Bemerkungen *Über die Farbe*, die zum Teil auf die Lektüre von Goethes Farbenlehre zurückgehen. 1949 erkrankte er unheilbar an Krebs, weswegen er noch einmal seine Verwandten in Wien besuchte, und eine letzte Reise nach Norwegen unternahm. Danach zog er bei seinem Arzt, Dr. Bevan, in Cambridge ein, um ja nicht im Krankenhaus zu sterben. Seine letzte Eintragung in *Über Gewissheit* datiert vom 27. April 1951, zwei Tage vor seinem Tod.²⁷ 1953 werden seine philosophischen Untersuchungen posthum veröffentlicht.²⁸

²³ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 110

²⁴ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 110

²⁵ Vgl. Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Reclam 1994, S. 7

²⁶ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 112

²⁷ Vgl. Wittgenstein, Ludwig: Über Gewißheit, Werkausgabe Band 8, Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft, Frankfurt am Main, 1984, S. 257

²⁸ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 113

Wittgenstein bezeichnete sein Leben als wundervoll. In Anbetracht der unglaublichen Ereignisse seiner annähernd 62-jährigen Lebenszeit eine durchaus mutige Aussage. Sein Leben war gezeichnet von einem ständigen Wechsel der Extreme. Einerseits das angenehme Universitätsleben, andererseits die Suche nach vollkommener Einsamkeit. Zwischendurch die zwei dunklen Kapitel der Weltkriege mit der Sorge um die Verwandten. In der Nachschau mag Wittgensteins Leben nicht reich an wundervollen, glücklichen Abschnitten erscheinen, doch ruft man sich die logische, analytische Art Wittgensteins in Erinnerung, lassen sich seine letzten Worte durchaus verstehen. Man kann wohl sagen, Wittgensteins Leben war gerade deswegen wundervoll, als es ein leidenschaftlich geführtes, reiches menschliches Leben war. Alles was Wittgenstein in seinem Leben unternahm machte er gewissenhaft und nach einem inneren Plan. Selbstverständlich war sein Leben auch voller Konflikte und Verluste, doch auf mehr konnte er nicht hoffen. Und Wittgenstein wusste dies wahrscheinlich. Mehr kann man nicht hoffen.

Sofern man gewillt ist aufgrund der analytischen Struktur des Tractatus auf einen analytischen, geradlinigen Charakter Wittgensteins zu schließen, könnte man im selben Atemzug Heisenberg eine gewisse Wankelmütigkeit, eine gewisse Unentschiedenheit zuschreiben. Doch wenngleich die oben angeführten letzten Worte Heisenbergs an v. Weizsäcker eine gewisse Ähnlichkeit mit seiner Unschärferelation erwecken, waren es doch ganz andere Wesenszüge, die Heisenberg auszeichneten, und die so viele Ähnlichkeiten mit Wittgenstein zulassen.

1.2.1.2 Werner Heisenberg (1901 - 1976)

Heisenberg wurde am 5. Dezember 1901 in Würzburg geboren. Seine Kindheit verbrachte er in einem gut behüteten Familienheim gemeinsam mit seinem älteren Bruder Erwin. Heisenbergs Vater, August Heisenberg, unterrichtete am Würzburger Gymnasium, und war als Privatdozent für griechische Philologie an der dortigen Universität angestellt. Auf Vermittlung seines Schwiegervaters, Nikolaus Wecklein, Vater seiner Frau, Anna Wecklein, Rektor des Münchner Maximilians-Gymnasiums, erteilte den frisch habilitierten August Heisenberg 1910 der Ruf an die Münchner Universität, um den einzigen deutschen Lehrstuhl für Byzanzistik zu besetzen. Es erfolgte daher die Übersiedlung nach München, und Erwin und Werner Heisenberg besuchten ab 1911 das von ihrem Großvater geleitete Gymnasium.²⁹ Dort erzielte Heisenberg im Laufe seiner Karriere sehr gute schulische Erfolge, mit 13 Jahren spielte er zudem bereits ausgezeichnet Klavier - eine Leidenschaft, der er sein ganzes Leben nachgehen würde. Ebenso entwickelte sich in dieser Zeit seine grenzenlose Liebe zur Natur. Ähnlich wie Wittgenstein fand auch Heisenberg sehr früh Gefallen an der Mathematik. Als ihm der Schulstoff nicht mehr genügte, brachte ihm sein Vater mathematische Abhandlungen aus der Universitätsbibliothek mit, wodurch er sich ein noch breiteres Wissen aneignen konnte. Nachdem er sich in seinen letzten zwei Schuljahren verstärkt neben der Mathematik auch der Physik widmete, schloss er 1920 mit einer ausgezeichneten Reifeprüfung ab. Zudem bekam er einen Platz in der Maximilianeum-Stiftung, durch welche der bayrische Staat

²⁹ Vgl. Schieman, Gregor: Werner Heisenberg, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 17

besonders begabte, männliche, nichtjüdische und körperlich nicht behinderte Studenten unterstützte. Die letzten Schuljahre standen allerdings im Banne des Ersten Weltkriegs. Heisenbergs patriotischer Vater nahm in den ersten Monaten des Krieges an den Kampfhandlungen teil, später wurden die Räume des Gymnasiums durch die Heeresleitung besetzt, weshalb der spärliche Unterricht notdürftig in Ersatzgebäuden abgehalten wurde. Lehrer wie Schüler wurden zum Kriegsdienst eingezogen. Heisenberg gehörte von 1916 bis 1918 dem „Wehrkraftverein des Maximilians-Gymnasiums“ an, nach dessen Auflösung tat er sich in einer Pfadfindergruppe, welche sich wenig später den so genannten Neupfadfindern anschloss, hervor.³⁰ Diese Verbindung junger Männer suchte hauptsächlich das Erlebnis der Gemeinschaft mit Gleichgesinnten im Einklang mit der Natur. Heisenberg selbst blieb dieser Bewegung auch noch über seine Studienzeit hinaus treu. In seiner wunderschön zu lesenden Autobiographie *Der Teil und das Ganze*, in der er sein Leben und sein Schaffen anhand von nachgezeichneten Dialogen mit den wichtigsten Personen seines Umkreises Revue passieren lässt, beschreibt er seine Leidenschaft:

Um verständlich zu machen, dass in einer Gruppe fröhlicher, unbekümmerter junger Menschen, die der Schönheit der blühenden Natur weit geöffnet waren, solche Gespräche geführt werden konnten, muss vielleicht daran erinnert werden, dass der Schutz durch Elternhaus und Schule, der in friedlichen Epochen die Jugend umgibt, durch die Wirren der Zeit weitgehend verloren gegangen und dass, gewissermaßen als Ersatz, eine Unabhängigkeit der Meinung in ihr entstanden war, die sich ein eigens Urteil auch dort zutraute, wo dafür die Grundlagen noch fehlen mussten.³¹

Nach dem Schulabschluss unternahm Heisenberg mit der - wie er sie nannte - Jugendbewegung³² eine Wanderung durchs Frankenland, erkrankte allerdings schwer, und musste mit hohem Fieber mehrere Wochen das Bett hüten. Diese lange Zeit nutzte er zur Lektüre seiner Bücher, wobei es ihm vor allem ein spezielles Werk angetan hatte. Es handelte sich um ein Buch von Hermann Weyl mit dem Titel „Raum-Zeit-Materie“, welches eine mathematische Darstellung der Prinzipien der Einstein'schen Relativitätstheorie zum Inhalt hat. Die Auseinandersetzung mit diesem schwierigen Methodenwerk bekräftigte seinen bereits zuvor gefassten Entschluss, an der Universität München das Studium der Mathematik aufzunehmen. Doch glücklicherweise - zumindest aus Sicht der Physik - arrangierte sein Vater in den ersten Tagen seines Studiums ein Treffen mit dem Mathematiker Ferdinand von Lindemann, von dem sich Heisenberg versprach, einen Platz in dessen Seminar zu bekommen. Das Gespräch verlief dann allerdings vollkommen anders als geplant, was Heisenberg wie folgt erklärt:

Ich besuchte Lindemann [...] im ersten Stock des Universitätsgebäudes in einem merkwürdig altmodisch ausgestatteten dunklen Raum, der in mir durch die Steifheit seiner Einrichtung etwas beklemmende Gefühle auslöste. Bevor ich noch mit dem Professor, der sich nur langsam erhob, gesprochen hatte, bemerkte ich auf dem Schreibtisch neben ihm kauend ein kleines Hündchen mit schwarzem Fell, das mich in dieser Umgebung ganz unmittelbar an

³⁰ Vgl. Schiemann, Gregor: Werner Heisenberg, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 19

³¹ Heisenberg, Werner: *Der Teil und das Ganze*, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 11

³² Vgl. Heisenberg, Werner: *Der Teil und das Ganze*, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 45

den Pudel in Fausts Studierstube erinnerte. [...] ich bemerkte erst jetzt beim Sprechen, wie unbescheiden meine Bitte eigentlich war. Lindemann, ein alter Herr mit weißem Vollbart, der schon etwas müde aussah, empfand diese Unbescheidenheit offenbar auch, und die leichte Gereiztheit, die ihn ergriff, mag der Grund dafür gewesen sein, dass nun plötzlich das Hündchen auf dem Schreibtisch entsetzlich zu bellen anfang. [...] Ich nannte das Werk von Weyl „Raum-Zeit-Materie“. Unter dem anhaltenden Toben des kleinen schwarzen Wächters schloss Lindemann darauf das Gespräch mit den Worten: „Dann sind Sie für die Mathematik sowieso schon verdorben.“ Damit war ich entlassen.³³

Es folgte eine enttäuschende Unterredung mit seinem Vater, woraufhin Heisenberg den Entschluss fasste, sich der mathematischen Physik zuzuwenden. Auch diesmal lies sein Vater seine Kontakte spielen, und es wurde ein Termin bei dem theoretischen Physiker schlechthin, Arnold Sommerfeld, vereinbart. Diesmal verlief das Gespräch ganz und gar nach den Vorstellungen Heisenbergs:

Sommerfeld empfing mich in einem hellen Zimmer, durch dessen Fenster man im Hof der Universität die Studenten auf den Bänken unter der großen Akazie sitzen sah. [...] aus den ersten Sätzen schien mir eine unmittelbare Güte zu sprechen, ein Wohlwollen für den jungen Menschen, der hier Führung und Rat suchte.³⁴

Sommerfeld erkannte auch recht bald die besondere Begabung Heisenbergs, und überantwortete ihm anspruchsvolle Analysen atomphysikalischer Messdaten. Seine Aufgabe war es, die Energiestufen eines Atoms aufgrund gemessener Wellenlängen zu bestimmen, was nach der damaligen Theorie nicht möglich war. Heisenberg löste dieses Problem binnen zwei Wochen, indem er - zu Beginn seines ersten Semesters! - halbe Quantenzahlen einführte. Sommerfeld war anfangs schockiert, und zweifelte diese Lösung vehement an, doch Heisenberg behielt Recht, und publizierte seine Lösung wenig später gemeinsam mit Sommerfeld.³⁵ Damit war der 19-jährige bereits in die Elite der Forschung vorgerückt. Dieser waghalsige Schritt gründete allerdings auch auf der Bekanntschaft mit Wolfgang Pauli, den er in Sommerfelds Seminar kennen und vor allem schätzen gelernt hatte. Der Austausch mit Pauli hatte für Heisenberg maßgebliche Bedeutung. Wenngleich sich die beiden Physiker deutlich in ihrer Art unterschieden - Heisenberg liebte die Natur, die Berge, den hellen Tag, Pauli hingegen eher die Großstadt, die Kaffeehäuser, die Nächte - verband sie eine ihr Leben lang andauernde Freundschaft. Heisenberg charakterisierte diese wie folgt:

[...] Wolfgang Pauli [...] hat in der ganzen späteren Zeit, so lange er lebte, für mich und für das, was ich wissenschaftlich versuchte, die Rolle des stets willkommenen, wenn auch sehr scharfen Kritikers und Freundes gespielt.³⁶

Im Sommer 1922 kam es zur wohl wichtigsten Begegnung in Heisenbergs Leben. Niels Bohr, der Begründer der Quantentheorie des Atoms, hielt eine Vortragsreihe in Göttingen, der auch der 20-jährige Heisenberg beiwohnte. Nachdem dieser es gewagt hatte, im Anschluss an einen Vortrag

³³ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 30

³⁴ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 31

³⁵ Vgl. Schiemann, Gregor: Werner Heisenberg, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 19

³⁶ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 9

seinen Unmut an der vorherrschenden Atomtheorie kund zu tun, konnte ihm Bohr ad hoc keine befriedigende Antwort geben, und lud ihn daher im Anschluss zu einem Spaziergang auf den Göttinger Hainberg ein. Die außerordentliche Bedeutung dieser Geste lässt sich wohl aus Heisenbergs Worten am besten herauslesen:

*Dieser Spaziergang hat auf meine spätere wissenschaftliche Entwicklung den stärksten Einfluss ausgeübt, oder man kann vielleicht besser sagen, dass meine eigene wissenschaftliche Entwicklung erst mit diesem Spaziergang angefangen hat.*³⁷

Im Laufe dieses Gespräches erfuhr Heisenberg, dass Bohr selbst seiner eigenen Theorie skeptisch gegenüber stand, und den eigens postulierten Bahnbegriff innerhalb des Atoms ebenfalls keinen Glauben mehr schenkte.³⁸ Von da an verband Bohr und Heisenberg eine ausgezeichnete Freundschaft, welche über die Jahre, durch gegenseitige Besuche und gemeinsame Bergtouren, gepflegt und kultiviert wurde. Nach der Mindeststudienzeit von sechs Semestern promovierte Heisenberg mit einer Arbeit über Turbulenzen in der Thermodynamik. Wenngleich Sommerfeld in seinem Gutachten über die Arbeit schrieb, *dass der junge, hochbegabte Verfasser an der Behandlung des gegenwärtigen Problems seine außerordentliche Fähigkeiten von Neuem zeigt: volle Beherrschung des mathematischen Apparates und kühne physikalische Anschauung*³⁹, erhielt er dennoch eine ziemlich schlechte Gesamtbewertung, da ihm der spätere Nobelpreisträger Wilhelm Wien aufgrund seiner schlechten Leistungen in der Experimentalphysik eine mangelhafte Note gegeben hatte.⁴⁰ Ein wohl für jeden Studenten sehr beruhigendes Schicksal.

Es folgte 1923 ein Rockefeller-Stipendium, welches es Heisenberg ermöglichte, als Assistent von Max Born in Göttingen zu arbeiten. Born lobte seinen jungen Kollegen in den höchsten Tönen:

*[...] seine unglaublich schnelle und genaue Auffassungsgabe erlaubte ihm, ohne große Anstrengung eine enorme Arbeit zu leisten. Er war mir eine große Hilfe.*⁴¹

1924 folgte er der Einladung Bohrs und ging nach Kopenhagen, um sich an atomphysikalischen Untersuchungen zu versuchen. Im selben Jahr habilitierte er sich mit diesen Untersuchungen. 1925 setzte er zu seinem wohl größten Wurf an, und begründete die Matrizenmechanik. In seiner Konzeption verzichtete er weitgehend auf physikalische Anschauung, sondern steckte seine ganze Arbeit in die Reproduktion statistischer Größen und in die Einführung neuer Rechenverfahren.⁴²

Explizit betonte er, dass wir glauben eine physikalische Theorie dann anschaulich zu verstehen, wenn wir uns in allen einfachen Fällen die experimentellen Konsequenzen dieser Theorie qualitativ denken können und wenn wir gleichzeitig erkannt haben, dass die Anwendung der Theorie niemals innere

³⁷ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 59f

³⁸ Vgl. Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 60f

³⁹ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 11

⁴⁰ Vgl. Schiemann, Gregor: Werner Heisenberg, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 20

⁴¹ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 11f

⁴² Vgl. Schiemann, Gregor: Werner Heisenberg, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 20

Widersprüche enthält⁴³. Seine weit über die Grenzen der Physik hinaus bekannte Unschärferelation⁴⁴ setzte 1927 einen vorläufigen Schlusspunkt seiner Ausarbeitung der neuen Quantentheorie. Diese erlangte mit Fortdauer der Geschichte Berühmtheit unter dem Titel „Kopenhagener Interpretation“, für welche Heisenberg gemeinsam mit Born und Bohr - nach dessen Institutssitz die Namensgebung erfolgte - verantwortlich zeichnete. Noch im selben Jahr erhielt Heisenberg als jüngster Physikprofessor Deutschlands einen Lehrstuhl für theoretische Physik in Leipzig. Hauptaugenmerk seiner Bemühungen war von da an die Suche nach der oft zitierten „Weltformel“ - eine „simple“ Zusammenführung der Relativitätstheorie mit der Quantentheorie, quasi eine Formel, die alle Bereiche der Physik umfassen sollte - welche allerdings zu Lebzeiten erfolglos blieben.⁴⁵ In einzelnen Bereichen der Atomphysik gelangen ihm hingegen aber noch andere wegweisende Beiträge zur Entwicklung der modernen Theoriebildung, etwa die Erklärung des Ferromagnetismus 1928, gemeinsam mit Pauli die Formulierung der relativistischen Quantenfeldtheorie 1929, sowie sein Neutron-Proton-Modell als Theorie des Atomkerns 1932. Für seine Begründung der Atomphysik erhielt er 1933 rückwirkend für das Jahr 1932 den Nobelpreis für Physik.⁴⁶ Spielten anfangs in Heisenbergs privaten Beziehungen noch die Neupfadfinder eine gewichtige Rolle, pflegte er nun eher den Kontakt im Kreise seiner akademischen Kollegen. Bei einem akademischen Musikabend lernte Heisenberg 1937 Elisabeth Schumacher kennen, welche er drei Monate später heiratete. Gemeinsam hatten sie sieben Kinder, recht viel mehr drang von Heisenbergs Familienleben nicht an die Öffentlichkeit. Auch in seinen Erinnerungen in *Der Teil und das Ganze* erwähnt er seine Familie wenn überhaupt nur beiläufig.

Genauso wie für Wittgenstein stellte auch für Heisenberg die Machtergreifung der Nationalsozialisten und in weiterer Folge der Zweite Weltkrieg einen großen Einschnitt in seinem Leben dar, wenngleich Heisenberg selbst ebenfalls weitgehend unbehelligt blieb. Als Vertreter der modernen Physik geriet er allerdings zwischen 1935 und 1937 in eine bedrohliche Hetzkampagne nationalsozialistischer Physiker unter der Führung des Nobelpreisträgers Johannes Stark. Diese

⁴³ Vgl. Heisenberg, Werner: *Physik und Philosophie*, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 16

⁴⁴ Heisenberg erläutert die Unschärferelation in seinem Werk „*Physikalische Prinzipien der Quantentheorie*“ anhand einer etwaigen Beobachtung eines Elektrons im Atom durch ein Photon wie folgt: „Die Wellenlänge und Frequenz des auf das Elektron fallenden Lichtes sei λ bzw. ν . Die Genauigkeit der Ortsmessung in der x-Richtung beträgt dann nach den Gesetzen der Optik $\Delta x \approx \lambda / \sin \varepsilon$. Zur Ortsmessung muss mindestens ein Lichtquant am Elektron gestreut werden und durch das Mikroskop ins Auge des Beobachters gelangen; durch dieses ein Lichtquant erhält das Elektron einen Comptonrückstoß der Größenordnung $h\nu / c$. Der Rückstoß ist nicht genau bekannt, da die Richtung des Lichtquants innerhalb des Strahlenbündels (vom Öffnungswinkel ε) unbekannt ist.

Also gilt für die Unsicherheit des Rückstoßes in der x-Richtung $\Delta p_x = \sin \varepsilon \cdot h\nu / c$ und es folgt die Kenntnis der Elektronenbewegung nach dem Experiment $\Delta p_x \cdot \Delta x \approx h$.

Gegen diese Herleitung lassen sich zunächst noch Einwände erheben: Die Unbestimmtheit des Rückstoßes hat ja darin seinen Grund, dass es unbekannt ist, welchen Weg innerhalb des Strahlenbündels das Lichtquant zurücklegt. Man könnte also versuchen, diesen Weg dadurch festzulegen, dass man das ganze Mikroskop beweglich anordnet und den Rückstoß misst, den das Mikroskop vom Lichtquant erhält. Dies wird jedoch nichts zur Umgehung der Unbestimmtheitsrelation helfen; [...]“

(Heisenberg, Werner: *Physikalische Prinzipien der Quantentheorie*, S. Hirzel Verlag, Leipzig, 2. Auflage, 1941, S. 16)

Mittlerweile gilt folgende Relation als grundsätzlich kleinste erreichbare Unbestimmtheit: $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar / 2$.

(Vgl. Pietschmann, Herbert: *Quantenmechanik verstehen, Eine Einführung in den Welle-Teilchen-Dualismus für Lehrer und Studierende*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2003, S. 27)

⁴⁵ Vgl. Schiemann, Gregor: *Werner Heisenberg*, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 21

⁴⁶ Vgl. Schiemann, Gregor: *Werner Heisenberg*, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 22

verwarnten sich gegen die „jüdische Physik“ Einsteins und ebenso gegen die Arbeit der „weißen Juden“, zu denen sie auch Heisenberg zählten. Heisenberg konnte sich gegen Angriffe auf seine Person aber durch eine Richtigstellung - in der er allerdings Einstein nicht als Begründer der Relativitätstheorie nennen konnte - wehren, seine Gegner erreichten aber, dass ihm die Nachfolge Sommerfelds - trotz seines ersten Platzes auf der Berufsliste der Fakultät - versagt blieb.⁴⁷ Heisenberg beschrieb seine Sicht der Dinge um 1933 mit überaus dramatischen Worten:

Das „goldene Zeitalter der Atomphysik“ ging nun schnell seinem Ende entgegen. In Deutschland wuchs die politische Unruhe. Radikale Gruppen von rechts und links demonstrierten auf den Straßen, bekämpften sich mit Waffen in den Hinterhöfen der ärmeren Stadtviertel und agitierten gegeneinander in öffentlichen Versammlungen. Fast unmerklich breitete sich die Unruhe und mit ihr die Angst auch im Universitätsleben und in den Fakultätssitzungen aus. Eine Zeitlang versuchte ich die Gefahr von mir wegzuschieben, die Auftritte auf den Straßen zu ignorieren. Aber die Wirklichkeit ist schließlich doch stärker als unsere Wünsche [...].⁴⁸

Mit dem Ausbruch des Zweiten Weltkrieges bewahrheiteten sich Heisenbergs Befürchtungen. Gemeinsam mit anderen Wissenschaftlern wurde er im September 1939 durch einen Einberufungsbefehl zum so genannten *Uranprojekt* verpflichtet. Ihre Aufgabe war es, die Möglichkeiten der zivilen und vor allem militärischen Nutzung der ein Jahr zuvor entdeckten Kernspaltung zu erforschen. Eine ähnliche Aufgabe wurde auch v. Weizsäcker auferlegt, was die gemeinsame Zeit in Berlin erträglicher machte. Heisenberg beschreibt eines der ersten gemeinsamen Gespräche dieser Zeit wie folgt:

Du bist also auch in unserem „Uranverein“ [...] dann hast du sicher schon viel darüber nachgedacht, was wir mit der Aufgabe, die uns hier gestellt wird, anfangen sollen. Zunächst handelt es sich ja um sehr interessante Physik, und wenn Frieden wäre und es um nichts anderes ginge, so würden wir uns wohl alle freuen, an einem Problem von solcher Tragweite mitzuarbeiten. Aber nun ist Krieg, und alles was wir tun, kann für uns oder für andere in äußerste Gefahren führen. Wir müssen uns also genau überlegen, was wir tun.⁴⁹

Binnen kürzester Zeit verfasste Heisenberg einen umfangreichen Bericht, in dem er eine prinzipielle Realisierung der Energiegewinnung, unter anderem auch zum Zwecke einer Atombombe, unterstrich. Allerdings schätzte er persönlich die Bedingungen zur Herstellung einer solchen als derart unrealistisch ein, dass er nicht von einer rechtzeitigen Fertigstellung einer Atombombe überzeugt war. Inwiefern diese Einschätzung tatsächlich seiner persönlichen Meinung entsprach, oder vielleicht doch strategisch motiviert war, lässt sich nur vermuten, Heisenberg selbst schreibt über seine Entscheidung:

[...] waren wir uns also jedenfalls klar darüber, dass die Herstellung von Atombomben nur mit einem ungeheuren technischen Aufwand möglich sein würde. [...] Wir wussten um diese

⁴⁷ Vgl. Schiemann, Gregor: Werner Heisenberg, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 21f

⁴⁸ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 174

⁴⁹ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 235f

Zeit, dass man grundsätzlich Atombomben machen kann, und kannten ein realisierbares Verfahren, wir haben aber den dazu nötigen technischen Aufwand eher für noch größer gehalten, als er dann tatsächlich war.⁵⁰

1942 wurde die Unterstützung der Forschung durch die Heeresleitung radikal zurückgefahren, sodass an eine Realisierung der militärischen Nutzung nicht mehr zu denken war. Heisenberg forschte weiterhin, wenngleich mit verringerten Mitteln, an den Möglichkeiten der Kernspaltung. Im selben Jahr wurde er auch an die Berliner Universität berufen. Als 1943 die Bombenangriffe auf Berlin zunahmen, zog ein Teil des Berliner Kaiser-Wilhelm-Instituts nach Hechingen bei Tübingen um. Bis zum Ende des Krieges kam es aber zu keiner kontrollierten Kettenreaktion.⁵¹ In den letzten Kriegstagen wurde Heisenberg gemeinsam mit neun weiteren Physikern - unter anderem Otto Hahn, Max von Laue, Walter Gerlach, Carl Friedrich v. Weizsäcker⁵² - festgenommen⁵³, und ab Anfang Juli 1945 auf dem englischen Landsitz Farm Hall interniert. Der britische Geheimdienst hörte deren Gespräche ab, die sie weitgehend isoliert von der Außenwelt führten. Erst 1992 wurden diese Protokolle veröffentlicht. Sie bezeugen vor allem Überraschung und Betroffenheit über den Abwurf der ersten Atombombe der Amerikaner, selbstverständlich auch Neid. Heisenberg kommentiert die bittere Nachricht:

Ich wollte diese Nachricht zunächst nicht glauben; [...] Ich fand es auch psychologisch unplausibel, dass die mir so gut bekannten Atomphysiker in Amerika alle Kräfte für ein solches Projekt eingesetzt haben sollten, [...] Erst am Abend, als der Berichterstatte im Rundfunk den riesigen technischen Aufwand schilderte, der geleistet worden sei, musste ich mich mit der Tatsache abfinden, dass die Fortschritte der Atomphysik, die ich 25 Jahre lang miterlebt hatte, nun den Tod von weit über hunderttausend Menschen verursacht hatten.⁵⁴

Anfang 1946 wurde Heisenberg freigelassen und erhielt kurz darauf von den britischen Besatzungsbehörden die Erlaubnis, das Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in dem dafür vorgesehenen Göttingen neu zu eröffnen. 1958 übersiedelte dieses Institut nach München, Heisenberg übte bis 1970 die Funktion des Institutsdirektors aus. Von 1953 bis 1975 war er zudem auch Präsident der Alexander von Humboldt-Stiftung. Erst wenige Monate vor seinem Tod, von seinem Krebsleiden bereits schwer gezeichnet, legte er sein Präsidentenamt nieder.⁵⁵ Werner Heisenberg starb am 1. Februar 1976 im Alter von 74 Jahren in seinem Münchner Heim.⁵⁶

⁵⁰ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 245

⁵¹ Vgl. Schiemann, Gregor: Werner Heisenberg, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 25

⁵² Vgl. Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 262

⁵³ „Festgenommen“ klingt in diesem Zusammenhang so hart, tatsächlich gereichte es viel mehr einer Erlösung, wie Heisenberg später schreiben sollte: „Als am 4. Mai der amerikanische Oberst Pash mit einigen Soldaten in unser Haus eindrang, um mich gefangen zu nehmen, hatte ich ein Gefühl, wie es etwa ein zu Tode erschöpfter Schwimmer haben mag, der zum ersten Mal wieder den Fuß auf festes Land setzt.“

(Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 261)

⁵⁴ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 263

⁵⁵ Vgl. Schiemann, Gregor: Werner Heisenberg, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 29

⁵⁶ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 39

Für Heisenberg war die Physik ebenso wie für Wittgenstein untrennbar mit der Philosophie verbunden. So glaubte er, dass *gute Physik unbewusst durch schlechte Philosophie verdorben werden kann*⁵⁷. Bereits mit der Begründung der Quantentheorie und vor allem in der Zeit danach bemühte er sich vehement um die Klarstellung aller philosophischen Konsequenzen, welche sich aus der neu begründeten modernen Physik ergaben. Noch vor dem Ende des Zweiten Weltkrieges verfasste Heisenberg neben seinen physikalischen Arbeiten ein Werk, welches posthum unter dem Titel *Ordnung der Wirklichkeit* veröffentlicht wurde. In einem privaten Brief an seine Frau aus dem Jahre 1943 bezeichnet er dieses Manuskript als seine „Privatphilosophie“. Darin entwirft er, aufbauend auf seinen physikhistorischen und erkenntnistheoretischen Überlegungen, ein hierarchisch gegliedertes Weltbild, in dem die subjektive Erkenntnis die wichtigste Rolle spielt, ohne eine ausschließliche Geltung zu beanspruchen.⁵⁸ Betrachtet man das Bild Heisenbergs, welches durch Erzählungen seiner Freunde und Kollegen und durch seine selbst verfassten Werke entstand, kann man wohl mit Fug und Recht behaupten, dass Heisenberg ein harmonisches, abgeschlossenes Weltbild vor sich hatte. Wissenschaft entstand für ihn in Diskussionen, wobei er die Standpunkte seiner Kritiker ernst nahm, und sich selbst vor extremen Formulierungen hütete.⁵⁹ Eine Methode, welche anscheinend verlässlich Fruchtbarkeit mit sich bringt.

⁵⁷ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 37

⁵⁸ Vgl. Schiemann, Gregor: Werner Heisenberg, CH Beck Verlag, München, 2008, S. 25

⁵⁹ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 38

1.2.2 Zeittafeln

1889	Wittgenstein wird am 26. April in Wien geboren.
1901	Heisenberg wird am 5. Dezember in Würzburg geboren.
1903-1906	Wittgenstein besucht die Oberrealschule in Linz.
1906	Wittgenstein beginnt sein Studium an der TH Berlin-Charlottenburg.
1908	Wittgenstein wechselt ans College of Technology in Manchester.
1911-1920	Heisenberg besucht das Maximilians-Gymnasium in München.
1912	Wittgenstein geht zu Russell ans Trinity College in Cambridge.
1914	Ausbruch des Ersten Weltkriegs.
1916-1918	Heisenberg ist aktives Mitglied des Wehrkraftvereins, anschließender Übergang zu den Neupfadfindern.
1918	Wittgenstein gerät in italienische Gefangenschaft, verfasst einen Prototyp des <i>Tractatus</i> ‘.
1920	Heisenberg beginnt sein Studium an der Ludwig-Maximilians-Universität München als Stipendiat der Maximilianeums-Stiftung. Wittgenstein arbeitet als Volksschullehrer, später als Gärtner.
1922	Wittgensteins <i>Tractatus logico-philosophicus</i> wird veröffentlicht. Heisenberg veröffentlicht mit Sommerfeld seine erste physikalische Arbeit: „Zur Quantentheorie der Linienstruktur und der anomalen Zeemaneffekte“.
1923	Heisenberg promoviert mit einer Arbeit zur Hydrodynamik.
1924	Heisenberg habilitiert sich mit einer Arbeit zum anomalen Zeemaneffekt.
1925	Heisenberg begründet die Quantenmechanik mit „Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen“.
1927-1942	Heisenberg arbeitet als Ordinarius für theoretische Physik an der Universität Leipzig.
1928	Heisenberg veröffentlicht seine Erklärung des Ferromagnetismus und hält seinen ersten erkenntnistheoretischen Vortrag: „Erkenntnistheoretische Probleme der modernen Physik“.
1929	Wittgenstein besucht Cambridge und kehrt zur Philosophie zurück, sein <i>Tractatus</i> fungiert als Doktorarbeit. Heisenberg veröffentlicht gemeinsam mit Wolfgang Pauli die relativistische Quantenfeldtheorie.
1930	Wittgenstein formuliert seine <i>Philosophischen Bemerkungen</i> , und erhält ein Research Fellowship am Trinity College.
1932	Heisenberg begründet mit Hilfe des Neutron-Proton-Modells die Theorie der Kernkräfte.
1933	Heisenberg erhält den Physik-Nobelpreis für das Jahr 1932 „für die Begründung der

	Quantenmechanik, deren Anwendung zur Entdeckung der alltropen Formen des Wasserstoffs geführt haben“.
1936	Heisenberg muss eine erste Verteidigung gegen den Vorwurf, Vertreter der „jüdischen Physik“ zu sein, als „Deutsche und Jüdische Physik“ formulieren.
1937	Heisenberg heiratet Elisabeth Schumacher.
1939	Wittgenstein wird britischer Staatsbürger. Reisen nach Wien, Berlin und New York, um den Schutz seiner Familie in Wien zu organisieren. Ausbruch des Zweiten Weltkrieges im September. Heisenberg wird zur Arbeit am Uranprojekt verpflichtet. Erstellung des ersten geheimen Berichtes „Die Möglichkeit der technischen Energiegewinnung aus der Uranspaltung“.
1939-1944	Wittgenstein arbeitet in einem Krankenhaus in London und forscht später in einem Labor in Newcastle.
1942-1945	Heisenberg fungiert sowohl als Direktor am Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Berlin, als auch als Ordinarius an der Universität Berlin.
1944	Wittgenstein kehrt nach Cambridge zurück.
1945	Heisenberg wird in Urfeld festgenommen.
1945-1946	Heisenberg wird im englischen Landsitz Farm Hall interniert.
1946-1958	Heisenberg übernimmt nun in Göttingen die Funktion des Direktors des Kaiser-Wilhelm-Instituts. (Später: Max-Planck-Institut)
1946	Heisenberg lässt sich in Göttingen nieder.
1947	Wittgenstein legt seine Professur nieder.
1949-1951	Heisenberg ist Präsident des Deutschen Forschungsrates.
1951	Wittgenstein stirbt am 29. April in Cambridge.
1952	Heisenberg ist Mitbegründer des Europäischen Kernforschungszentrums CERN bei Genf.
1953	Wittgensteins <i>Philosophischen Untersuchungen</i> erscheinen posthum.
1957	Heisenberg nimmt an der Göttinger Erklärung gegen die nukleare Bewaffnung der Bundeswehr teil.
1958-1970	Heisenberg ist Direktor des Max-Planck-Instituts für Physik und Astrophysik in München.
1958	Heisenberg übersiedelt mit seiner Familie nach München.
1959	Heisenberg publiziert sein interdisziplinäres Werk <i>Physik und Philosophie</i> .
1969	Heisenberg veröffentlicht seine Autobiographie <i>Der Teil und das Ganze</i> .
1976	Heisenberg stirbt am 1. Februar in München.

2 WITTGENSTEINS GRENZE

Regel: Man bleibt in der Grenzkontrastbehandlung
stets auf ein und derselben Seite der Linie.
[Paul Klee]

2.1 Naturwissenschaftliche Erkenntnis

Das nun folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Frage nach Wittgensteins sprachphilosophischen Grenzbegriff. Dazu werden zunächst die prinzipiellen Grenzen menschlicher Erkenntnis herausgearbeitet, um sich danach diesen Grenzen zu nähern. Inwiefern sind diese Grenzen verschiebbar, in welchem Ausmaße sind sie festgesetzt? Nach Behandlung dieser Fragen wird ein Blick über die Grenzen gewagt. Dass dieses Unterfangen aber nur begrenzt gewinnbringend sein kann, wird abschließend mit der Erklärung des Unsinnns erläutert.

Naturwissenschaftliche Erkenntnis ist die Quintessenz jeglicher Forschung und aller naturwissenschaftlicher Bemühungen. Allgemein-öffentliche Anerkennung wird dieser Erkenntnis allerdings erst zu Teil, wenn sie das Kriterium der Reproduzierbarkeit erfüllt, wobei im konkreten Fall der Naturwissenschaft diese Rolle das Experiment übernimmt. Nun ist naturwissenschaftliche Erkenntnis aber prinzipiellen Schranken und Grenzen unterworfen.⁶⁰

Eine erste, natürliche Grenze ergibt sich bei der Durchführung eines Experiments. Dabei beschränken einen die technisch gegebenen Möglichkeiten. Diese *technologische Grenze* ist definitiv nicht festgesetzt, sondern wird - im Gegenteil - durch naturwissenschaftlichen Fortschritt ständig weiter zurück geschoben. Bedingt durch diesen Umstand kommt dieser Grenze sicherlich eine Sonderposition innerhalb der Naturwissenschaft zu. Erfüllt es einen doch mit Zuversicht, dass vieles, was in der Vergangenheit jenseits dieser Grenze lag, durch technische Weiterentwicklung zugänglich gemacht wurde.

Im Übergang von der klassischen Physik hin zur modernen Physik begegnet man in weiterer Folge einer zweiten Grenze, welche in keiner Weise einen Grund zur Zuversicht liefert, da sie gegen jeglichen technologischen Fortschritt resistent ist, und ausschließlich durch die Natur der Physik

⁶⁰ Vgl. Pietschmann, Herbert: Die drei Grenzen physikalischer Erkenntnis, *Philosophia Naturalis* 12, 1978, S. 90f

selbst begründet wird. Diese *methodologische Grenze*⁶¹ findet sich sprachlich haargenau in der Erkenntnis der Lichtgeschwindigkeit als universale Grenzgeschwindigkeit, genauso wie die Heisenberg'sche Unschärferelation die Grenze des Messbaren bedingt. Paul A.M. Dirac sagte über diese Grenze:

*Es gibt eine Grenze für die Feinheit unserer Beobachtungskraft und die Kleinheit der begleitenden Störung - eine Grenze, welche in der Natur der Dinge liegt und die niemals durch verfeinerte Techniken überschritten werden kann.*⁶²

Jenseits dieser beiden Grenzen, in einem Gebiet, in dem die logischen Axiome und die Befunde der Experimente endend wollen sind, verläuft die dritte und - naturphilosophisch gesehen - spannendste Grenze. Alles was „grundsätzlich“ nicht erfasst werden kann, und sich jeglichen Denkraumen verwehrt, liegt hinter dieser *ontologischen Grenze*⁶³. Durch sie erfährt die Partnerschaft von Philosophie und Naturwissenschaft ihren Ritterschlag, denn nur gemeinsam lässt sich dieser Grenzwall in Angriff nehmen. Wer wessen Steigbügelhalter sein soll, entscheidet sich von Fall zu Fall. Carl Friedrich von Weizsäcker schlug dahingehend vor:

*Das Verhältnis der Philosophie zur so genannten positiven Wissenschaft⁶⁴ lässt sich auf die Formel bringen: Philosophie stellt diejenigen Fragen, die nicht gestellt zu haben die Erfolgsbedingung des wissenschaftlichen Verfahrens war. Damit ist also behauptet, dass die Wissenschaft ihren Erfolg unter anderem dem Verzicht auf das Stellen gewisser Fragen verdankt. Diese sind insbesondere die eigenen Grundfragen des jeweiligen Fachs.*⁶⁵

Der Schluss „Um in der Naturwissenschaft erfolgreiche, messbare, nachvollziehbare Resultate zu erlangen, muss man gewisse Probleme, Widersprüche außen vor lassen.“ wird einem förmlich nahegelegt. Dieses außen Vorlassen ist aber nicht mit einer Resignation vor gewissen Grenzen gleichbedeutend. Vielmehr ist darunter ein Akzeptieren zu verstehen, welches für den weiteren naturwissenschaftlichen Prozess sinnvoll ist.

An dieser Stelle lassen wir Ludwig Wittgenstein die Bühne der Grenzdebatte betreten, und ihn einen kurzen Blick auf die bisherige Grenzsammlung werfen:

- Technologische Grenze der Erkenntnis
- Methodologische Grenze der Erkenntnis
- Ontologische Grenze der Erkenntnis

⁶¹ Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 117

⁶² Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 117f

⁶³ Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 118

⁶⁴ Eine positive Wissenschaft ist im Gegensatz zu einer normativen Wissenschaft (zB Ethik, Pädagogik) eine Wissenschaft, die unabhängig von metaphysischen und religiösen Vorgaben ist und sich auf eine praktische Aufgabe bezieht. Sie beschreibt, was ist, und nicht, was sein soll (Postulat der Werturteilsfreiheit von Max Weber).

⁶⁵ Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 115

2.2 Von der Grenze

Wittgenstein ist kein Dienstleister. Will man ihm dabei zuschauen, wie er dem Denken seine Grenze zieht, blockt er sofort ab, und alsbaldig stellt sich Ernüchterung ein:

5.6

Die Grenzen meiner Sprache bedeuten die Grenzen meiner Welt.

5.61

Die Logik erfüllt die Welt; die Grenzen der Welt sind auch ihre Grenzen.

Wir können also in der Logik nicht sagen: Das und das gibt es in der Welt, jenes nicht.

Das würde nämlich scheinbar voraussetzen, daß wir gewisse Möglichkeiten ausschließen, und dies kann nicht der Fall sein, da sonst die Logik über die Grenzen der Welt müßte; wenn sie nämlich diese Grenzen auch von der anderen Seite betrachten könnte.

Was wir nicht denken können, das können wir nicht denken; wir können also auch nicht sagen, was wir nicht denken können.⁶⁶

Um dem Denken eine Grenze ziehen zu können, müssten wir uns also von beiden Seiten der Grenze nähern können, vom Denkbaren, und eben auch von dem, was sich nicht denken lässt. Unterwerfen wir dazu Wittgensteins allgemeine Vorstellung einer Grenze, im Zuge einer schärferen Betrachtung und Präzisierung, einer genaueren Analyse.

Wittgensteins Grenzbegriff haftet stark der üblichen Vorstellung eines Feldes an. Ein Feld, welches durch eine Grenze geteilt wird, wodurch zwei Gebiete abgesteckt werden. Zunächst ein Gebiet, welches man eben zu begrenzen suchte, und - durch die Grenze selbst - ein dahinter liegendes Gebiet. Sozusagen ein Jenseits.⁶⁷

Eine Grenze und ein „Dahinter“ sind also untrennbar miteinander verbunden. Wenig verwunderlich - suchen wir Menschen ja ständig sprichwörtlich „was dahinter steckt“. Auch wenn man einen Schritt weiter geht, und sich die Grenze nun als eine hohe Mauer vorstellt, gibt es zwar kein sichtbares Jenseits mehr, aber dennoch eine Grenze. Wir nehmen die Mauer nicht nur als Mauer wahr, sondern auch als Grenze. Nun könnte man kritisch anmerken, dass sich dies ausschließlich darin begründet, dass wir etwas von jenseits der Mauer in Erfahrung bringen können - einen Ton, einen Geruch. Aber selbst wenn wir uns aller anderen Dimensionen der Wahrnehmung entledigen, und nur mehr die Mauer wahrnehmen, gebrauchen wir dennoch den Begriff der Grenze, insofern, als dass wir uns ein Jenseits *dazu denken!*⁶⁸

Betrachten wir erneut unsere Mauer, unseren Grenzwall. Im vorigen Beispiel haben wir sie uns als so hoch gedacht, als dass man sie gerade nicht überblicken kann. Nimmt man an, man nähert sich ihr erneut, doch diesmal wird einem gesagt, dass diese Mauer unendlich dick sei - es also von hier weg durch das ganze Universum nur mehr diese Mauer gibt - und man akzeptiert dies als Tatsache, so erklärt man sich bereit, diese Mauer als eine ohne Jenseits anzusehen. Somit erkennt man ihr auch

⁶⁶ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 36

⁶⁷ Vgl. Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 35

⁶⁸ Vgl. Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 36

sofort jeden Grenzstatus ab. Dennoch wird man darauf beharren wollen, an einer Grenze zu stehen. Man wird versuchen, Alternativen zu finden. Etwas anderes, was durchaus über ein Jenseits verfügt, soll dann die Grenze darstellen. Im konkreten Beispiel bietet sich dafür die einem zugewandte Oberfläche der Mauer an, wenngleich sie nicht von selber Qualität wie die Mauer ist, da sie ja nicht selbstständig existiert: Wird die Mauer abgerissen, verschwindet mit ihr auch die Oberfläche. Doch das mag einen gar nicht so stören. Die Oberfläche spielt im eigentlichen Sinne gar nicht eine physische Rolle, sondern mehr die eines idealen geometrischen Gebildes, eines Platzhalters. Genauso verfährt man ja auch auf der Erde, wenn man z.B. zwei Staaten voneinander durch einen Fluss trennt. Mit der Mitte des Flusses verbindet man dann nicht unbedingt eine reale Entität, sondern vielmehr eben einen geometrischen Ort. Die Bojen, welche im Fluss schwimmen, sind nicht die Grenze selbst, sondern versinnbildlichen diese als Markierungen. *Wieder wird nahe gelegt, die Grenze als etwas nur Gedachtes anzusehen*⁶⁹.

Eben dieses Sachverhalts nahm sich bereits Aristoteles im dritten Buch der Metaphysik an, indem er hervorhob, dass Grenzen - realisiert durch Punkte, Linien, Flächen - nicht vom selben Charakter sein können, wie die Körper, die durch sie begrenzt werden. Er argumentiert auf folgende Weise:

*Es scheint nämlich, daß die Wesenheit, wenn sie nach früherem Nicht-sein nunmehr ist oder nach vorherigem Sein späterhin nicht ist, dieses durch Vermittlung des Entstehens oder Vergehens erleide; die Punkte aber und Linien und Flächen können weder werden noch vergehen, obgleich sie bald sind, bald nicht sind. Wenn nämlich zwei Körper sich berühren oder trennen, so sind zugleich mit der Berührung die Grenzen eins, zugleich mit der Trennung zwei; so daß bei der Berührung die eine nicht mehr ist, sondern vergangen ist, bei der Trennung aber die sind, welche vorher nicht waren. Ein Werden findet dabei nicht statt, denn der unteilbare Punkt kann ja nicht in zwei geteilt werden.*⁷⁰

Aristoteles spricht hier sehr elegant einen heiklen Punkt in der Grenzdebatte an. Die Grenze eines dreidimensionalen Quaders ist eine zweidimensionale Fläche, seiner Oberfläche. Die Grenze dieser Fläche ist eine eindimensionale Linie. Die Grenze dieser Linie stellen nulldimensionale Punkte dar. Diese Grenzen „entstehen“ aber erst durch die Festsetzung der Grenze. Aristoteles beschreibt, dass durch Berührung zweier (dreidimensionaler) Körper eine (zweidimensionale) Grenze zwischen ihnen besteht. Trennt man die zwei Körper voneinander, besitzt jeder für sich eine (zweidimensionale) Grenze.

Folgt man dem von Aristoteles bewanderten Pfad hin zur Erkenntnis, dass geometrische Gegenstände ihre Besonderheit nur in Bezug auf einen sie behandelnden Verstand haben, endet man in der Einsicht, dass bereits Aristoteles die Grenze als ein Produkt des Denkens angenommen hat. An der Feststellung einer Grenze ist also nicht nur die Wahrnehmung beteiligt, sondern ebenso ein gewisses „Hinzu-Denken“. Man sieht zwar eine Grenze, aber die Unteilbarkeit dieser, sowie das Dahinter werden erst dazu gedacht.

⁶⁹ Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 36

⁷⁰ Aristoteles, drittes Buch der Metaphysik, 14. Aporie

2.3 Über die Grenze

Wendet man allerdings dieses Bild auf die Begrenzung des Denkens selbst an, stellt sich in der Folge die Paradoxie ein, dass man zur Vorstellung der Grenze zugleich „über sie hinaus“ denkt. Wittgenstein tritt dieser Problematik standhaft entgegen, indem er ein anderes Feld zu Grunde legt, das sich jenseits der zu ziehenden Grenze erstreckt und so an dem ursprünglichen Bild festhalten kann. *Die Grenze wird also nur in der Sprache gezogen werden können...*⁷¹ Der Gedanke und dessen Ausdruck sind also untrennbar miteinander verbunden. Was ist nun aber ein „Ausdruck eines Gedankens“? Durch welches Regelsystem lässt sich eine eindeutige Kategorisierung produzieren, um der Gesamtheit der Gedanken auf die Spur zu kommen, und in weiterer Folge auf ihre Grenze zu stoßen?

3.1

*Im Satz drückt sich der Gedanke sinnlich wahrnehmbar aus.*⁷²

Einen Gedanken können wir also nur sprachlich hervorbringen. Durch die Verlagerung der Grenze in das Feld der Sprache stellt Wittgenstein hohe Ansprüche an den sprachlichen Ausdruck! So soll dieser alle wesentlichen Züge aufweisen, durch welche bereits der Gedanke festgelegt ist:

3.2

*Im Satze kann der Gedanke so ausgedrückt sein, daß den Gegenständen des Gedankens Elemente des Satzzeichens entsprechen.*⁷³

3.141

*Der Satz ist kein Wörtermisch. - (Wie das musikalische Thema kein Gemisch von Tönen.)
Der Satz ist artikuliert*⁷⁴

Ein Satz, in dem sich ein Gedanke sprachlich ausdrückt, besteht also aus miteinander verbundenen Elementen, die die Struktur des Gedankens 1:1 abbilden. Dieses „Ausdrücken“ ist allerdings auch nur als eine bloße Tätigkeit anzusehen, welche in keiner Weise mit dem „Stoff“ - aus dem der auszudrückende Gedanke bestehen mag - verwandt sein soll.⁷⁵ Ebenso findet sich im „Ausdruck des Gedankens“ auch keine Intention für eine Ursache oder Wirkung wieder, ganz im Gegenteil wie etwa dort, wo man sagt: Ein unvermuteter Schmerz oder eine Überraschung findet Ausdruck in einem Schrei. Einzige Notwendigkeit ist eben die baugleiche Rekonstruktion der Gedankenbausteine durch die Satzzeichen-Bauklötze.

⁷¹ Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 37

⁷² Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 14

⁷³ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 15

⁷⁴ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 14

(latein. articulare „gliedern“, „deutlich sprechen“), unter der Artikulation versteht man die Bildung menschlicher Sprechlaute, also den Sprechvorgang.

⁷⁵ Vgl. Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 39

Aus dieser Forderung wird ersichtlich, dass der *Satz an sich* noch gar nicht den Gedanken ausdrückt, sondern dies erst abstrakt durch die Struktur des Satzes geschieht! Dies mag zunächst etwas suspekt anmuten, wird aber dadurch klarer, wenn man sich vor Augen führt, dass ein Satz - Wittgensteins sinnlicher Ausdruck - auf verschiedene Arten realisiert werden kann. Man kann einen Satz z.B. aussprechen oder aufschreiben. Jede Art und Weise der jeweiligen „Satz-Produktion“ beinhaltet eigene Eigenschaften und stellt eigene Forderungen an den Satz, aber das, was allen Produktionen gemeinsam ist, das bildet einen *wesentlichen Zug*:

3.34

Der Satz besitzt wesentliche und zufällige Züge.

Zufällig sind die Züge, die von der besonderen Art der Hervorbringung des Satzzeichens herrühren.

Wesentlich diejenigen, welche allein den Satz befähigen, seinen Sinn auszudrücken.

3.341

*Das Wesentliche am Satz ist also das, was allen Sätzen, welche den gleichen Sinn ausdrücken können, gemeinsam ist. [...]*⁷⁶

Sätze, die auf den ersten Blick womöglich verschieden aussehen, können bei näherer Betrachtung also die relativ allgemeine Beziehung, die einen Satz zum Ausdruck des Gedankens macht, doch gemeinsam haben. Wittgenstein verfeinert diese Thematik noch um ein weiteres Detail insofern, als dass er eine weitere Unterscheidung einführt:

3.31 Jeden Teil des Satzes, der seinen Sinn charakterisiert, nenne ich einen Ausdruck (ein Symbol).

(Der Satz selbst ist ein Ausdruck)

Ausdruck ist alles, für den Sinn des Satzes Wesentliche, was Sätze miteinander gemein haben können. [...]

*3.32 Das Zeichen ist das sinnlich Wahrnehmbare am Symbol.*⁷⁷

Somit benennt er mit dem Begriff „symbolisch“ die wesentlichen Züge am Ausdruck, und mit dem Begriff „zeichenhaft“ die unwesentlichen Züge am Ausdruck, um im selben Atemzug auch noch seine Terminologie dahingehend zu verfeinern, dass überhaupt nur die wesentlichen (symbolischen) Züge des Satzes Ausdruck genannt werden. Der Satz „Der Satz ist der Ausdruck des Gedankens“ ist durch diese Definition und Begrenzung des Begriffs „Ausdruck“ einigermaßen bestimmt.

Doch sich bereits hier zufrieden zu geben verhindert das Brennen unter den Fingernägeln. Immer noch pocht die Frage: Was liegt hinter dem Ausdruck des Gedankens? Wie soll man dieses, welches nach der Sprache „dahinter“ liegt, bezeichnen? Was macht da als „andere Seite“ der Grenze die Grenze erst zur Gänze zur Grenze? Wittgenstein sagt recht rüde im Vorwort: „Die Grenze wird also nur in der Sprache gezogen werden können und was jenseits der Grenze liegt, wird einfach Unsinn sein.“⁷⁸ Bis zu einem gewissen Punkt ist es uns also möglich, Aussagen zu tätigen oder Behauptungen aufzustellen, welche einer Funktion der Sprache gerecht werden und sinnstiftend wirken. Überquert

⁷⁶ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 18

⁷⁷ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 16

⁷⁸ Vgl. Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 40

man aber diesen Punkt, diese Grenze, tätigt man zwangsläufig unsinnige Aussagen. Dabei muss man sich allerdings Seidenhandschuhe überziehen, will man sich daran machen, Wittgensteins „Unsinn“ aufzudecken. Dieser existiert einzig und allein in der Sprache. Ihm entspricht kein unsinniger Gedanke, der durch sprachlichen Unsinn ausgedrückt wird! Eben wegen der Undenkbarkeit des Unsinnns tritt dieser an die Stelle einer Begrenzung des Denkens.

Doch wie kommt es nun zum Unsinn in der Sprache? Wittgenstein hat ja bereits offen gelegt, dass der Ausdruck eines Gedankens ausschließlich aus der folgerichtigen Anordnung sprachlicher Elemente besteht. Ein Scheitern bei dieser Anordnung, z.B. dadurch, dass man gewissen Elementen nicht die notwendige Bedeutung gibt, hat einen „Unsinn“ zur Folge:

5.4733

*Frege sagt: Jeder rechtmäßig gebildete Satz muß einen Sinn haben; und ich sage: Jeder mögliche Satz ist rechtmäßig gebildet, und wenn er keinen Sinn hat, so kann das nur daran liegen, daß wir einigen seiner Bestandteile keine Bedeutung gegeben haben. (Wenn wir auch glauben, es getan zu haben.) [...]*⁷⁹

Folgt man der Konzeption, dass nämlich die Grenze für den Ausdruck des Gedankens bereits die Grenzziehung für das Denken selbst zur Folge hat, vermag man Wittgensteins Begeisterung nachzuspüren. Ist eine solche Grenze erst einmal festgesetzt, gibt es keine Möglichkeit mehr, mit Hilfe eines sinnvollen Satzes eine Aussage über sie zu tätigen. Dieser Satz müsste ja sowohl über das, was Ausdruck des Gedankens ist, als auch über das, was jenseits davon liegt - den Unsinn - eine Behauptung machen. Nun lässt sich dem Unsinn aber eben keine Bedeutung geben, welche jemals Bestandteil eines sinnvollen Satzes werden kann, wodurch die Grenze fest einbetoniert scheint.

2.4 Der Unsinn

Halten wir zu Beginn kurz Rückschau und betrachten:

3.1

Im Satz drückt sich der Gedanke sinnlich wahrnehmbar aus.

Der Einfachheit halber verkürzen wir diesen Satz zu:

*[A] Der Satz drückt den Gedanken aus.*⁸⁰

Dieser Satz lässt sich in drei Hauptbestandteile zerlegen: in das Zeichen „Satz“, das Zeichen „Gedanke“ und das Zeichen „ausdrücken“ (jeweils in grammatikalisch richtiger Form). Versucht man nun, diese Zeichen hinsichtlich ihrer Bedeutung zu analysieren, stößt man rasch auf Schwierigkeiten. Was bedeutet „Gedanke“? Ein klares Urteil lässt sich mit den momentanen Möglichkeiten nicht

⁷⁹ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 33

⁸⁰ Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 44

fällen, fest steht aber zunächst, dass ein Gedanke aus mehreren Elementen besteht, die in gewisser Weise miteinander in Verbindung stehen. Wittgenstein verwendet dafür den Begriff Komplex, welches ein Analyse-Programm notwendig macht, um den Begriff zu zerlegen:

2.0201

*Jede Aussage über Komplexe läßt sich in eine Aussage über deren Bestandteile und in diejenigen Sätze zerlegen, welche die Komplexe vollständig beschreiben.*⁸¹

3.24

Der Satz, welcher vom Komplex handelt, steht in interner Beziehung zum Satze, der von dessen Bestandteil handelt.

*Der Komplex kann nur durch seine Beschreibung gegeben sein, und diese wird stimmen oder nicht stimmen. [...] Daß ein Satzelement einen Komplex bezeichnet, kann man aus einer Unbestimmtheit in den Sätzen sehen, worin es vorkommt. [...]*⁸²

Zerlegen wir in diesem Sinne also das Zeichen „Gedanke“, so sollte uns dies zumindest einen Satz liefern. Sofern es ein sinnvoller Satz ist, drückt dieser selbst auch wieder einen Gedanken aus. Der „Gedanke“ wird also durch „Ausdruck des Gedankens“ ersetzt. Mit dem Zeichen „Satz“ verfährt man auf gleicher Weise, da es ja dieselbe Bedeutung hat, eben den Ausdruck eines Gedankens. Infolgedessen lässt sich [A] überführen in:

*[B] Der Ausdruck des Gedankens drückt den Ausdruck des Gedankens aus.*⁸³

Zugegeben, dieser Satz sieht noch nicht wie ein Schritt in die richtige Richtung aus, aber die echten Probleme kommen erst, nämlich mit dem Zeichen „ausdrücken“. In [A] erfüllte seine Bedeutung die Aufgabe eine Beziehung zwischen „Satz“ und „Gedanke“ zu definieren. Aber in welcher Beziehung steht nun der „Ausdruck des Gedankens“ zu sich selbst? In der Alltagssprache finden sich sofort eine Reihe von Beziehungen, in denen etwas zu sich selbst steht: Ein Affe kratzt sich am Bauch, ein Kind betrachtet seine Hände. Aber sind diese Beziehungen notwendig? (Für „ausdrücken“ scheiden diese Möglichkeiten ohnehin automatisch aus, da sich ein Satz wohl kaum am Bauch kratzen wird - und wenn, wäre zumindest in diesem Fall klar, dass dieser Satz Unsinn ist.) Das Zeichen „ausdrücken“ verlangt also anscheinend nach einer Identität, einer Eindeutigkeit, was Wittgenstein aber sofort unterbindet:

6.2322

*Die Identität der Bedeutung zweier Ausdrücke läßt sich nicht behaupten. Denn um etwas von ihrer Bedeutung behaupten zu können, muß ich ihre Bedeutung kennen: und indem ich ihre Bedeutung kenne, weiß ich, ob sie dasselbe oder verschiedenes bedeuten.*⁸⁴

Identität ist also nur scheinbar eine bestimmte Beziehung, in Wahrheit kann ihr in keinem Satz eine Bedeutung gegeben werden. Der Satz [A] stellt sich als Unsinn heraus.⁸⁵ Diese Erkenntnis trifft wie

⁸¹ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 10

⁸² Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 15f

⁸³ Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 45

⁸⁴ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 40

ein nasser Waschlappen. Wittgenstein widerlegt seine Sätze durch seine Sätze selbst? Natürlich könnte man diesem Dilemma entkommen, wenn man sein Hauptaugenmerk auf eine scharfe Unterscheidung von einem Namen und dem, was er bezeichnet, legt. Vor allem natürlich auf das Zeichen „Gedanke“ und dem, was schlussendlich ein Gedanke ist. Aber damit würde man Wittgenstein vermutlich Unrecht tun. Schließlich schreibt er selbst im oft zitierten und noch viel öfter kontrovers interpretierten Schlussbild von der Leiter:

6.54

*Meine Sätze erläutern dadurch, daß sie der, welcher mich versteht, am Ende als unsinnig erkennt, wenn er durch sie - auf ihnen - über sie hinausgestiegen ist. (Er muß sozusagen die Leiter wegwerfen, nachdem er auf ihr hinaufgestiegen ist.)
Er muß diese Sätze überwinden, dann sieht er die Welt richtig.⁸⁵*

Ohne sich zu sehr in die Reihe jener einzugliedern, die diesen Schluss auf ihre Art und Weise interpretieren, und auch ohne sich explizit vorzustellen, was passiert, wenn man die Leiter umstößt, auf der man gerade noch stand, vermittelt Wittgensteins „reductio ad absurdum“⁸⁷ doch eine gewisse Hoffnung. So ist sie nicht als Selbstkritik aufzufassen, sondern viel mehr als der Schlussstein des von Wittgenstein geschaffenen Gebäudes der logischen Argumentation. Die Philosophie kann nur in Erläuterungen bestehen - philosophische Sätze werden zu Notbehelfen degradiert. *Der Leser wird so auf sich selbst gestellt, das Buch erfüllt quasi die Rolle einer Geburtshilfe.*⁸⁸

Unsinn ist Unsinn. Den selbigen Wert liefert ausschließlich dessen Aufdeckung. Genauso verfährt Wittgenstein - die Erläuterung liefert sich der Leser erst durch die Entdeckung, dass Wittgensteins Sätze unsinnig sind. Betrachten wir zum Vergleich folgenden Satz:

[C] Schurli knatzt Berg leiser Quotient.

In [C] erkennt man sofort die Unsinnigkeit des Satzes, was in [A] nicht so schnell von Statten ging. Ganz im Gegenteil, zunächst ist man noch versucht einen tieferen Sinn dahinter zu vermuten. Die Ähnlichkeit von [A] mit einem durchaus sinnvollen Satz wie z.B. „Wittgenstein drückt eine Zitrone aus.“ spielt dabei eine wesentliche Rolle. Der Vergleich mit sinnvollen Sätzen aus dem Alltag erschwert im konkreten Fall die Aufdeckung des Unsinnns. Man wird gezwungen nach der verborgenen Grenze zwischen Sinn und Unsinn zu suchen:

*Die Unsinnigkeit von [A] - oder Wittgensteins 3.1 - aufzudecken, im Kontrast zu [C], bedeutet die Grenze zwischen dem Ausdruck von Gedanken und dem Unsinn an einer anderen, un vermuteten Stelle zu ziehen, an der richtigen Stelle. Und das ist die Absicht Wittgensteins und der Grund dafür, daß er diese unsinnigen Sätze geschrieben hat und keine anderen.*⁸⁹

⁸⁵ Vgl. Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 45

⁸⁶ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 45

⁸⁷ Vgl. Bezzel, Chris: Wittgenstein, Grundwissen Philosophie, Reclam 2007, S. 71

⁸⁸ Vgl. Raatzsch, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008, S. 94

⁸⁹ Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 46

Verfolgt man die Unsinnigkeit des Satzes 3.1, so folgt man gleichermaßen der Intention Wittgensteins⁹⁰. Wir können ihn verstehen, aber nicht seine Sätze. Und im Betrachten seines Scheiterns rücken wir der Grenze zwischen Sinn und Unsinn ständig näher. Wenngleich wir wissen, dass wir diese Einsicht nicht in einem Satz ausdrücken können, ohne sie selbst zu entwerten. Wir müssen es dabei belassen, meint Wittgenstein, dass sie sich zeigt. Vieles Wichtige lässt sich nun mal nicht auf sinnvolle Weise sagen. Dies einzusehen und zu akzeptieren bedeutet nicht mehr, als jene Grenze zu respektieren, welche in der Sprache den Ausdruck der Gedanken vom Unsinn trennt. Wittgenstein formuliert die Konsequenzen dieser Auffassung folgendermaßen:

6.53

*Die richtige Methode der Philosophie wäre eigentlich die: Nichts zu sagen, als was sich sagen läßt, also Sätze der Naturwissenschaft - also etwas, was mit der Philosophie nichts zu tun hat -, und dann immer, wenn ein anderer etwas Metaphysisches sagen wollte, ihm nachzuweisen, daß er gewissen Zeichen in seinen Sätzen keine Bedeutung gegeben hat.*⁹¹

⁹⁰ Ein ähnliches Beispiel liefert auch die Physik. Das „Hookesche Gesetz“ beschreibt die Veränderung elastischer Körper unter dem Einfluss einer Kraft; es besagt:

„Die Ausdehnung ist proportional der Kraft.“

In dieser Allgemeinheit gilt das Hookesche Gesetz allerdings nicht, denn sobald die Kraft einen gewissen Grenzwert überschreitet, beginnt die Fließzone, in welcher die Proportionalität nicht mehr gegeben ist. Darum muss man hinzufügen:

„Im Hookeschen Bereich ist die Ausdehnung proportional der Kraft.“

Der Hookesche Bereich ist aber gerade dadurch definiert, dass dort das Hookesche Gesetz gilt. Streng genommen müsste man das Hookesche Gesetz also folgendermaßen definieren:

„Dort, wo die Ausdehnung proportional der Kraft ist, ist die Ausdehnung proportional der Kraft.“

Logisch gesehen ein deutlicher Zirkel!

(Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 155)

⁹¹ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 44f

3 WITTGENSTEIN UND DIE NATURWISSENSCHAFT

Andrea: Aber sie haben mir alles bewiesen.
Galilei: Nur, dass es so sein kann. Du verstehst,
die Hypothese ist sehr schön,
und es spricht nichts dagegen
Andrea: Ich möchte auch Physiker werden, Herr Galilei.
[Bertolt Brecht: „Leben des Galilei“]

3.1 Naturwissenschaftliche Sätze

Die Sätze der Naturwissenschaft sagen laut Wittgenstein also nur das, was sich sagen lässt. Man formuliert demnach Sätze, mit denen man die Naturwissenschaft beschreibt - man formuliert naturwissenschaftliche Theorien. Dabei ist allerdings das Ineinandergreifen von Wort und Tat wesentlich, wie bereits Faust erkannte:

Faust:
Geschrieben steht: „Im Anfang war das Wort!“
Hier stock' ich schon! Wer hilft mir weiter fort?
Ich kann das Wort so hoch unmöglich schätzen,
Ich muss es anders übersetzen, [...]
Mir hilft der Geist! Auf einmal seh' ich Rat
Und schreibe getrost: Im Anfang war die Tat!⁹²

Die Struktur naturwissenschaftlicher Sätze lässt sich anhand einer bereits nieder-geschriebenen Theorie analysieren. Schlägt man z.B. ein Lehrbuch für Elektrostatik auf, um die Theorie des elektrischen Feldes zu erkunden, findet man neben Abbildungen und Diagrammen hauptsächlich mathematische Gleichungssysteme und einen erklärenden Text. Die mathematischen Gleichungen bedingen sich einander und lassen sich logisch sowohl von oben nach unten als auch von unten nach oben nachvollziehen. Man findet in ihnen die Anwendung der gängigen mathematischen Prozeduren: es wird addiert, multipliziert, integriert, differenziert und so weiter. Des weiteren

⁹² Friedenthal, Richard: Goethes Werke in zwei Bänden, Erster Band, Faust - Der Tragödie erster Teil, Dromersche Verlagsanstalt München Zürich, 1957, S. 750

werden Abkürzungen eingeführt und in die Gleichungen eingefügt - das gesamte, diesen Rechenoperationen zugrundeliegende Regelwerk kann in Theoriebüchern nachgeschlagen werden - wodurch mathematische Ergebnisse hergeleitet werden. Die mathematischen Gleichungen bilden im Wesentlichen die Mathematik ab, *wobei diese als die Disziplin verstanden wird, die sich nichts anderes überlegt, als was alles mit den Axiomen der Logik vereinbar gedacht werden kann. „Bewiesen“ ist eine mathematische Behauptung genau dann, wenn gezeigt wird, dass sie diese Bedingung erfüllt.*⁹³ Dem Gleichungssystem kommt also nicht die tragende Rolle des Lehrbuchs zu, sondern der verbindende Text, welcher erst die Anweisungen gibt, was mathematisch geschehen soll, spielt sozusagen die Hauptrolle. Des Weiteren informiert dieser den Leser über die konkrete Bedeutung der Symbole und Abkürzungen. Beispielsweise erklärt er, dass der fett gedruckte Buchstabe **F** die Kraft bezeichnet, die auf ein Probeteilchen wirkt, das die Ladung q trägt. Darüber, dass es dabei die Beschleunigung **a** erfährt, gibt er ebenfalls Aufschluss. Was ist nun aber das Charakteristische für diese physikalische Theorie? Welche Bedingungen lassen sich für naturwissenschaftliche Sätze ableiten?

Eine erste Beobachtung ist, dass sich eine Theorie offensichtlich auf eine oder mehrere Vorthorien bezieht. Im konkreten Beispiel der Elektrostatik sind das die Mechanik und die Theorie von Raum und Zeit. Die Mechanik selbst fußt ebenso auf der Theorie von Raum und Zeit, welche allerdings ihrerseits keine Vorthorie bedingt, sondern als solche begründet ist. Man erkennt, dass die physikalischen Theorien hierarchisch aufgebaut sind. Diese Hierarchie kann allgemein wie folgt aufgegliedert werden⁹⁴:

Grundbereich GB: Dieser Bereich der Wirklichkeit enthält die Fakten, d.h. die experimentellen Ergebnisse, die mit den Mitteln der Vorthorie beschrieben, aber nicht erklärt und begründet werden können. In der Elektrostatik ist das beispielsweise die beschleunigte Bewegung eines geladenen Punktteilchens. Beschleunigungen werden bereits in den Vorthorien mit Hilfe von Zeit- und Längenintervallen ausgemessen und auf das Vorliegen einer realen Kraft zurückgeführt. Eine Ursache für diese Kraft wird dabei aber nicht angegeben. Der Grundbereich liegt im Wirklichkeitsbereich der Vorthorien.

Die physikalische Theorie selbst ist durch zwei Grundelemente charakterisiert:

einen **mathematischen Teil MT**, der aus mathematischen Größen (z.B. den Vektoren **F** und **E**), Definitionen, Gleichungen, Umformungen, Lösungsprozeduren, Beweisen, mathematischen Existenzsätzen, usw. besteht, und **Abbildungsprinzipien AP**, die oft auch als Korrespondenzregeln bezeichnet werden und den Grundbereich GB und Teile des mathematischen Teils MT aufeinander beziehen. Durch sie werden zugleich Aussagen aus dem Grundbereich GB, etwa experimentelle Ergebnisse, aber auch Präparationsverfahren, mit Aussagen des mathematischen Teils MT verknüpft.

⁹³ Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 31

⁹⁴ Audretsch, Jürgen: Die sonderbare Welt der Quanten, C.H. Beck oHG, München 2008, S. 27f

Im konkreten Beispiel wird der Vektor **F**, gemeint ist die mathematische Größe, mit der, beispielsweise durch eine Feder ausgemessenen, Kraft des Grundbereiches verknüpft. Der Vektor des elektrischen Feldes **E** bleibt demgegenüber eine mathematische Größe, die keine Entsprechung in der Wirklichkeit des Grundbereiches hat.

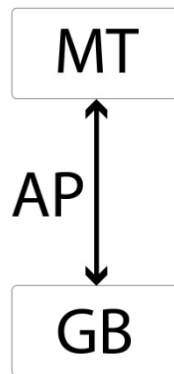


Abbildung 3-1: Die Abbildungsprinzipien AP beziehen den mathematischen Teil MT einer physikalischen Theorie auf deren Grundbereich GB.

Man geht also von einem Grundbereich aus, welcher die Elemente einer unmittelbaren Wirklichkeit - verknüpft mit handwerklichen Handlungsanweisungen - enthält. Erst dadurch, dass die Abbildungen zu den mathematischen Relationen hinzukommen, und vereint durch einen Text erklärt werden, entsteht eine physikalische Theorie. Wittgenstein unterstreicht dies folgendermaßen:

6.3431

*Durch den ganzen logischen Apparat hindurch sprechen die physikalischen Gesetze doch von den Gegenständen der Welt.*⁹⁵

Die Abbildungsprinzipien spielen quasi dann eine Rolle, wenn man z.B. mit der einen Hand auf das Symbol *t* auf dem Papier und mit der anderen Hand auf die Uhr, die nach gewissen Handlungsanweisungen gebaut wurde, zeigt. Um eine Theorie zu interpretieren muss man die Abbildungsprinzipien angeben, welche die Variablen und Rechengrößen des mathematischen Teils dieser Theorie mit der Wirklichkeit verknüpft. Man gibt also für einige mathematische Symbole ihre physikalischen Entsprechungen an, und behauptet, dass es sich dabei um die physikalische Wirklichkeit handelt. Ohne diese Interpretation können wir nur von einer mathematischen Theorie sprechen, nicht aber von einer physikalischen.

Ausschließlich Abbildungsprinzipien zu verwenden, welche sich nur auf den Grundbereich - dessen Elemente als existent angenommen werden - beziehen, mag zwar die Sehnsucht nach einem sicheren Hafen stillen, doch gleichzeitig büßt man die Möglichkeit ein, sich zu neuen Ufern aufzumachen. Daher lässt sich der Wirklichkeitsbereich erweitern. Betrachtet man erneut die Elektrostatik, indem man sie ausschließlich dahingehend interpretiert, als dass man nur

⁹⁵ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 41

Abbildungsprinzipien verwendet, die den mathematischen Teil mit dem Grundbereich verknüpfen, so bedeutet das, dass nur Längen, Zeiten, Kräfte, Beschleunigungen, Ladungen usw. als wirklich angesehen werden, nicht aber z.B. das elektrische Feld. Man spricht von einer *Minimalinterpretation*⁹⁶ der Elektrostatik.

Erweitert man das reduzierte Wirklichkeitskonzept des Grundbereiches, nimmt man zwar in Kauf, gewisse Elemente der Wirklichkeit nicht mehr direkt beweisen zu können, dafür vermag man aber überhaupt mit diesen Elementen zu arbeiten. Insofern erweist es sich als praktikabel, das elektrische Feld als real anzusehen. Diese Anschauung lässt sich wie folgt behaupten: Mit der einen Hand zeigt man auf das Symbol **E** in dem mathematischen Gleichungssystem und mit der anderen Hand auf einen Punkt in der Nähe einer Masse. Dass genau dort das elektrische Feld existiert, begründet man dann durch die vorliegende Ladung der Masse. Dieses so postulierte elektrische Feld lässt sich zwar weder angreifen, anschauen, schmecken, riechen und so weiter, aber es existiert. Einen direkten Beweis dafür kann man zwar nicht erbringen, doch durch die Kräfte, die es auf Ladungen ausübt, ist eine indirekte Feststellung möglich. Das elektrische Feld ist so Teil einer über die unmittelbare Wirklichkeit hinausgehenden erschlossenen Wirklichkeit. Man spricht von der *Standardinterpretation*⁹⁷ der Elektrostatik.

Diese Interpretationsform hat zu Folge, dass der Wirklichkeitsbereich über den Grundbereich hinaus erweitert wird. Abbildungen, die darüber hinausgehen, werden als **hypothetische Abbildungsprinzipien hAP** bezeichnet, welche auf den **erschlossenen Wirklichkeitsbereich eWB** abzielen⁹⁸.

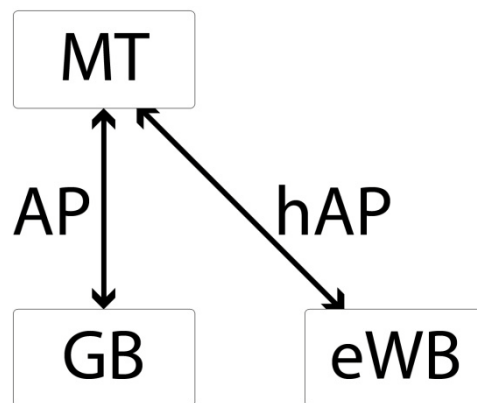


Abbildung 3-2: Die Abbildungsprinzipien AP beziehen den mathematischen Teil MT einer physikalischen Theorie auf deren Grundbereich GB. Die hypothetischen Abbildungsprinzipien hAP können hinzugenommen werden. Sie stellen dann die Korrespondenz mit dem erweiterten Wirklichkeitsbereich eWB her.⁹⁹

⁹⁶ Vgl. Audretsch, Jürgen: Die sonderbare Welt der Quanten, C.H. Beck oHG, München 2008, S. 29

⁹⁷ Vgl. Audretsch, Jürgen: Die sonderbare Welt der Quanten, C.H. Beck oHG, München 2008, S. 30

⁹⁸ Vgl. Audretsch, Jürgen: Die sonderbare Welt der Quanten, C.H. Beck oHG, München 2008, S. 30

⁹⁹ Vgl. Audretsch, Jürgen: Die sonderbare Welt der Quanten, C.H. Beck oHG, München 2008, S. 28

3.2 Physikalische „Weltbeschreibung“

Zur heiklen Frage, ob die von uns beschriebene Wirklichkeit auch tatsächlich die Wirklichkeit ist, äußert sich Wittgenstein insofern, als dass er beliebig viele Beschreibungen der Welt gelten lässt. Jede einzelne Beschreibung ist dann aber nur eine Ausdrucksmöglichkeit unter vielen:

6.341

Die Newtonsche Mechanik z.B. bringt die Weltbeschreibung auf eine einheitliche Form. Denken wir uns eine weiße Fläche, auf der unregelmäßige schwarze Flecken wären. Wir sagen nun: Was für ein Bild immer hierdurch entsteht, immer kann ich seiner Bedeutung beliebig nahe kommen, indem ich die Fläche mit einem entsprechend feinen quadratischen Netzwerk bedecke und nun von jedem Quadrat sage, daß es weiß oder schwarz ist. Ich werde auf diese Weise die Beschreibung der Fläche auf eine einheitliche Form gebracht haben. Diese Form ist beliebig, denn ich hätte mit dem gleichen Erfolge ein Netz aus dreieckigen oder sechseckigen Maschen verwenden können. Es kann sein, daß die Beschreibung mit Hilfe eines Dreiecks-Netzes einfacher geworden wäre; das heißt, daß wir die Fläche mit einem gröberen Dreiecks-Netz genauer beschreiben könnten als mit einem feineren quadratischen (oder umgekehrt) usw.

Den verschiedenen Netzen entsprechen verschiedene Systeme der Weltbeschreibung. Die Mechanik bestimmt eine Form der Weltbeschreibung, indem sie sagt: Alle Sätze der Weltbeschreibung müssen aus einer Anzahl gegebener Sätze - den mechanischen Axiomen - auf eine gegebene Art und Weise erhalten werden. Hierdurch liefert sie die Bausteine zum Bau des wissenschaftlichen Gebäudes und sagt: Welches Gebäude immer du aufführen willst, jedes mußt du irgendwie mit diesen und nur diesen Bausteinen zusammenbringen.

(Wie man mit dem Zahlensystem jede beliebige Anzahl, so muss man mit dem System der Mechanik jeden beliebigen Satz der Physik hinschreiben können.)¹⁰⁰

Die jeweilige Qualität der gewählten Beschreibung lässt Wittgenstein dabei außer Acht. Nicht wie man die Welt prinzipiell beschreibt, sondern dass man die Welt beschreibt ist relevant, wobei sich dafür einzelne Beschreibungen besser eignen als andere:

6.342

Und nun sehen wir die gegenseitige Stellung von Logik und Mechanik. (Man könnte das Netz auch aus verschiedenartigen Figuren etwa aus Dreiecken und Sechsecken bestehen lassen.) Daß sich ein Bild, wie das vorhin erwähnte, durch ein Netz von gegebener Form beschreiben läßt, sagt über das Bild nichts aus. (Denn dies gilt für jedes Bild dieser Art.) Das aber charakterisiert das Bild, daß es sich durch ein bestimmtes Netz von bestimmter Feinheit vollständig beschreiben läßt.

So auch sagt es nichts über die Welt aus, daß sie sich durch die Newtonsche Mechanik beschreiben läßt; wohl aber, daß sie sich so durch jene beschreiben läßt, wie dies eben der Fall ist. Auch das sagt etwas über die Welt, daß sie sich durch die eine Mechanik einfacher beschreiben läßt als durch die andere.¹⁰¹

¹⁰⁰ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 40f

¹⁰¹ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 41

Die Mechanik als die Beschreibung der Welt wird folgendermaßen charakterisiert:

6.343

*Die Mechanik ist ein Versuch, alle wahren Sätze, die wir zur Weltbeschreibung brauchen, nach einem Plane zu konstruieren.*¹⁰²

In diesem Punkt drängt sich sofort die Frage auf, wodurch sich wahre Sätze als solche auszeichnen, und sich von unwahren Sätzen abgrenzen lassen? Beziehungsweise ob man aus diesen wahren Sätzen nicht nur die Mechanik konstruieren kann, sondern womöglich alle Sätze? Dadurch lassen sich dann weitere Rückschlüsse auf eine etwaige Grenze ziehen. Im Rahmen dieser Thematik führt Wittgenstein die Gesamtheit der so genannten „Elementarsätze“ ein, und beinahe schnippisch äußert er sich über eine etwaige Begrenzung:

4.51

*Angenommen, mir wären alle Elementarsätze gegeben: Dann läßt sich einfach fragen: Welche Sätze kann ich aus ihnen bilden? Und das sind alle Sätze und so sind sie begrenzt.*¹⁰³

Mit der darauf folgenden Eintragung bietet er eine kurze Erläuterung zu dem Begriff „Elementarsatz“:

4.52

*Die Sätze sind alles, was aus der Gesamtheit aller Elementarsätze folgt (natürlich auch daraus, daß es die Gesamtheit aller ist). (So könnte man in gewissem Sinne sagen, daß alle Sätze Verallgemeinerungen der Elementarsätze sind.)*¹⁰⁴

Somit zeichnet er eine Gruppe von Sätzen als Elementarsätze aus, welche dadurch ihre Funktion als Basis für alle Sätze erhalten. Gehört ein Satz nicht dieser speziellen Gruppe an, lässt er sich stets auf Sätze dieser Gruppe zurückführen. Durch diese rigorose Unterscheidung aller Sätze in die Kategorien „Elementarsätze“ und „Nicht-Elementarsätze“ und die prinzipielle Zugehörigkeit eines Nicht-Elementarsatzes zur Gruppe der Elementarsätze, legt Wittgenstein durch die Gesamtheit der Sätze ihre Grenze außerhalb dieser fest. *Wenn alles, was gesagt werden kann, gesagt ist, dann ist auch offenkundig, was nicht gesagt werden kann - und auf diese Weise macht sich die Grenze gleichsam von selbst bemerkbar*¹⁰⁵.

Der Begriff der Grenze wird damit auf den Begriff der Gesamtheit beschränkt, was Wittgenstein auch noch unterstreicht:

5.5561

*Die empirische Realität ist begrenzt durch die Gesamtheit der Gegenstände. Die Grenze zeigt sich wieder in der Gesamtheit der Elementarsätze.*¹⁰⁶

¹⁰² Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 41

¹⁰³ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 27

¹⁰⁴ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 27

¹⁰⁵ Heinrich, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993, S. 50f

¹⁰⁶ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 37

Wittgensteins Meinung zur Weltbeschreibung fußt demnach auf einer Anzahl von Elementarsätzen, durch welche alle Sätze erzeugt werden können. Auf eine natürliche Grenze stößt man erst, wenn alles, was gesagt werden kann, eben auch gesagt worden ist, und dann ist es ja einerlei, da man weder von dieser Grenze, geschweige denn über sie sprechen kann. Wodurch bekommt dann allerdings die Sprache ihren allzu oft mehrdeutigen und missverständlichen Charakter, welcher gerade in der Beschreibung einer exakten, naturwissenschaftlichen Wissenschaft so große Probleme hervorruft? Wittgenstein erklärt dies - bezugnehmend auf den im Satz sinnlich wahrnehmbaren Ausdruck des Gedankens - folgendermaßen:

4.002

Die Sprache verkleidet den Gedanken. Und zwar so, daß man nach der äußeren Form des Kleides nicht auf die Form des bekleideten Gedankens schließen kann; weil die äußere Form des Kleides nach ganz anderen Zwecken gebildet ist als danach, die Form des Körpers erkennen zu lassen.¹⁰⁷

3.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Tractatus

Halten wir uns, bevor wir uns voll und ganz den Erörterungen Heisenbergs widmen, noch einmal die wichtigsten Erkenntnisse Wittgensteins Tractatus' vor Augen, um so eine Gegenüberstellung, beziehungsweise mögliche Überschneidung zu erleichtern.

Im alltäglichen Umgang mit unseren Mitmenschen, genauso wie in speziellen Gruppierungen - sei es z.B. von Musiker/innen, Physiker/innen, Philosoph/innen - stoßen wir über kurz oder lang auf prinzipielle Grenzen der Mitteilbarkeit. Es kann zu Missverständnissen kommen, mitunter sogar zu Unverständnis. Diese Tatsache findet man von Wittgenstein wie folgt formuliert:

5.6

Die Grenzen meiner Sprache bedeuten die Grenzen meiner Welt.

Was die Gruppe der Musiker/innen angeht, lässt sich diese Grenze durchaus weiter verschieben, da gerade die Musik am ehesten auf die Sprache verzichten kann, und sich das, was als etwaige Barriere dazwischen stehen kann, viel mehr in einem Gefühl ausdrücken vermag. Genauso ist man aber durchaus geneigt den Physiker/innen und Philosoph/innen ein ähnliches Gefühl zuzusprechen, allerdings müssen diese auf den Ausdruck dieses Gefühls mittels eines Instruments¹⁰⁸ verzichten. Die Physiker/innen können sich dazu ihres mathematischen Formelapparates bedienen, und diesen als ihr Instrument ansehen. Dieses Instrument ist aber faktisch ein stummes Instrument, wollen doch die jeweiligen Ableitungen und Rechenoperationen interpretiert und nachvollzogen werden, was eine

¹⁰⁷ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 20

¹⁰⁸ Im Rahmen dieser Erörterung ist der singende Mund ebenso als Instrument anzusehen, wenngleich er doch dasselbe „Werkzeug“ ist, welches uns auch das Sprechen ermöglicht.

verbindende Erklärung unabdingbar macht. Solange sich diese auf Befunde des Alltags, der unmittelbaren Wirklichkeit, dem oben definierten Grundbereich GB beziehen, ist eine Erklärung bloß in die Schranken der Sprache gewiesen, wobei man sich der Hilfe eines/r Dolmetschers/in¹⁰⁹ bedienen kann, um diese Schwelle zu überwinden. Doch welches Hilfsmittels bedient sich die Philosophie, wenn die Sprache ihr ihre Grenzen aufweist, beziehungsweise was bleibt der Physik, wenn sie hypothetische Urteile über einen atopischen¹¹⁰ Bereich - den oben eingeführten erweiterten Wirklichkeitsbereich eWB - fällen muss, und sich somit ebenfalls rein auf die Sprache stützen muss?¹¹¹ Bis zu welchen Grad ist es noch möglich, sinnvolle Sätze zu produzieren?

5.4733

*Frege sagt: Jeder rechtmäßig gebildete Satz muß einen Sinn haben; und ich sage: Jeder mögliche Satz ist rechtmäßig gebildet, und wenn er keinen Sinn hat, so kann das nur daran liegen, daß wir einigen seiner Bestandteile keine Bedeutung gegeben haben.
(Wenn wir auch glauben, es getan zu haben.) [...]*

6.53

Die richtige Methode der Philosophie wäre eigentlich die: Nichts zu sagen, als was sich sagen läßt, also Sätze der Naturwissenschaft - also etwas, was mit der Philosophie nichts zu tun hat -, und dann immer, wenn ein anderer etwas Metaphysisches sagen wollte, ihm nachzuweisen, daß er gewissen Zeichen in seinen Sätzen keine Bedeutung gegeben hat.

Sobald man also über die Möglichkeit verfügt, jedem Zeichen seine Bedeutung zu geben, löst man die Probleme der Naturphilosophie in sich auf, und das Nachdenken hat ein Ende. Nun ist es aber gerade so, dass man eben nicht jedem Zeichen eine Bedeutung zuschreiben kann, denn würde man dies tun, schriebe man einem anderen (neuen) Zeichen keine Bedeutung zu, welches seinerseits seine Bedeutung auch erst wieder durch ein anderes Zeichen erfährt. Die Katze beißt sich sprachphilosophisch in den Schwanz, wodurch man wenngleich nicht zur Resignation, aber doch zur Einsicht gezwungen ist:

4.002

Die Sprache verkleidet den Gedanken. Und zwar so, daß man nach der äußeren Form des Kleides nicht auf die Form des bekleideten Gedankens schließen kann; weil die äußere Form des Kleides nach ganz anderen Zwecken gebildet ist als danach, die Form des Körpers erkennen zu lassen.

¹⁰⁹ Wittgenstein schreibt in seinen posthum veröffentlichten *Vermischten Bemerkungen* dem Erkennen der Sprache eine gleiche Qualität wie dem Erkennen des Menschen zu:

„Wenn wir einen Chinesen hören, so sind wir geneigt, sein Sprechen für ein unartikulierte Gurgeln zu halten. Einer, der chinesisch versteht, wird darin die *Sprache* erkennen. So kann ich oft nicht den *Menschen* im Menschen erkennen.“ [1914] (Wittgenstein, Ludwig: Über Gewißheit, Werkausgabe Band 8, Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft, Frankfurt am Main, 1984, S. 451)

¹¹⁰ Die Atopie (griechisch *atopía* „Ortlosigkeit“, „nicht zuzuordnen“, „von hoher Originalität“) bezeichnet eine prinzipielle „Unbeschreiblichkeit“; ein Unvermögen etwas an Attributen festzumachen.

¹¹¹ Die Erlaubnis, die Schwierigkeiten der Naturwissenschaft denen der Philosophie gleichzustellen, erteilt Wittgenstein ebenfalls in seinen *Vermischten Bemerkungen*:

„Mit dem vollen philosophischen Rucksack kann ich nur langsam den Berg der Mathematik steigen.“ [1929]

(Wittgenstein, Ludwig: Über Gewißheit, Werkausgabe Band 8, Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft, Frankfurt am Main, 1984, S. 452)

Der Zweck dieses Kleides ist die Mitteilbarkeit im Alltag. Man verwendet die Sprache zur Kommunikation mit seinen Mitmenschen, man tauscht sich miteinander aus, man vermittelt Inhalte. All dies stellt einen im Alltag vor keine allzu großen Schwierigkeiten, da die besprochenen Themen bis zu einem gewissen Grad bekannt sind. Problematisch wird es dann, wenn neue Erkenntnisse den Alltag erreichen, welche womöglich sogar einen Paradigmenwechsel¹¹² zur Folge haben. Immer wieder in der Geschichte der Naturwissenschaft war dies der Fall. Überraschende Entdeckungen und neue Ideen haben zu wissenschaftlichen Auseinandersetzungen geführt, mitunter sogar polemische Veröffentlichungen entstehen lassen, die die neuen Ideen sofort einer heftigen Kritik ausgesetzt haben, welche für ihre Entwicklung aber wiederum sehr nützlich war.

Werner Heisenberg betont in seiner Vorlesung über *Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik* diese Methode der Naturwissenschaft über die Jahrhunderte, weist im selben Atemzug aber darauf hin, dass diese Kontroversen nie zuvor diesen Grad an Heftigkeit erreicht haben, den sie nach der Entdeckung der Relativitätstheorie, und in einem geringeren Grade auch nach der Quantentheorie, annahmen.¹¹³ Er führt diese unglaubliche Heftigkeit darauf zurück, dass durch die jüngsten Entwicklungen der modernen Physik die Fundamente der Physik, wenn nicht sogar der Naturwissenschaft überhaupt in Bewegung geraten waren. Gleichzeitig merkt er kritisch an:

*[...] bedeutet es aber doch wohl auch, dass man noch nicht die richtige Sprache gefunden hatte, in der man über die neue Situation sprechen konnte, [...]*¹¹⁴

Die verwendete Alltagssprache lässt dazu einfach ungenaue und zum Teil unkorrekte Behauptungen zu, welche im Zuge der großen Begeisterung um die neuen Erkenntnisse alle Arten von Missverständnissen hervorriefen. Bloß, welche Sprache stünde als Alternative zur Verfügung?

¹¹² Der Wissenschaftstheoretiker Thomas S. Kuhn sagt von Paradigmen:

„Von diesen glaube ich, dass sie allgemein anerkannte wissenschaftliche Leistungen sind, die für eine gewisse Zeit einer Gemeinschaft von Fachleuten Modelle und Lösungen liefern.“

(Kuhn, Thomas S.: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1979, S. 11)

¹¹³ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 237

¹¹⁴ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 237

4 SPRACHE UND WIRKLICHKEIT NACH HEISENBERG

Was die Schwierigkeiten macht, ist immer das Denken.
[Georg Wilhelm Friedrich Hegel]

4.1 Von der Sprache

Die Alltagssprache erweist uns im Alltag hervorragende Dienste, doch durch verbesserte experimentelle Techniken werden mit der Zeit neue Seiten der Natur ins Blickfeld der Naturwissenschaft gebracht. Seiten, für die sich in der Menge der Begriffe des alltäglichen Lebens sowie der Menge der Begriffe der früheren Physik keine Entsprechungen mehr finden. Es gilt nun also, eine Alternative zu finden, eine Sprache, in der die neuen Erkenntnisse beschrieben werden können. Im Rahmen des wissenschaftlichen Prozesses der theoretischen Physik verwendet man prinzipiell eine mathematische Sprache. Ein mathematisches Schema, das es den Physiker/innen ermöglicht, Resultate zukünftiger Experimente vorherzusagen und zu berechnen. Im Dunstkreis der Physiker/innen ruft dieses Schema Zufriedenheit hervor, denn diese wissen, wie sie dieses anzuwenden haben.

Aber [man] muss über seine Ergebnisse ja auch zu Nichtphysikern sprechen, die nicht zufrieden sind, solange ihnen nicht eine Erklärung auch in der gewöhnlichen Sprache gegeben wird, in einer Sprache, die von jedermann verstanden werden kann. Auch für den Physiker ist die Möglichkeit einer Beschreibung in der gewöhnlichen Sprache ein Kriterium für den Grad des Verständnisses, das in dem betreffenden Gebiet erreicht worden ist.¹¹⁵

In welchem Umfang ist eine derartige Beschreibung aber überhaupt möglich? Verfügen wir über die Möglichkeit über ein Atom zu sprechen? In diesem Punkt geben sich sprachliche wie physikalische Probleme die Klinke in die Hand. Heisenberg holt in seiner Vorlesung daher zu einem Exkurs über die Sprache im Allgemeinen und insbesondere über die wissenschaftliche Sprache aus, welchem man geneigt ist, zu folgen.

¹¹⁵ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 238

4.1.1 Die Anfänge

Die Sprache dient als Mittel zur Verständigung sowie als Grundlage für das Denken. Gebildet wurde sie in einer prähistorischen Zeit von der menschlichen Rasse, wobei über die einzelnen Schritte zur ihrer Bildung wenig bekannt ist.¹¹⁶ Mittlerweile enthält die Sprache eine unglaubliche Vielzahl an Begriffen, welche eine mehr oder weniger eindeutige, beziehungsweise unzweideutige Verständigung über Vorgänge des täglichen Lebens ermöglicht. Diese Begriffe unterlagen in ihrer Entstehung aber keiner kritischen Analyse, sie wurden durch den Gebrauch festgelegt, und wenn man einen Begriff nur oft genug verwendet, glaubt man zu wissen, was er bedeutet. Kritisch betrachtet stößt man allerdings bald auf den begrenzten Anwendungsbereich der Begriffe: Man kann ohne weiteres über ein Stück Brot oder ein Stück Käse sprechen, aber wir können kein Stück Milch benennen. Der Begriff „Stück“ ist für flüssige Körper anscheinend nicht hinreichend genau definiert. Heisenberg bringt in diesem Zusammenhang ein weiteres Beispiel:

In Erörterungen über die Begrenzung von Begriffen pflegt Bohr gern die folgende Geschichte zu erzählen: Ein kleiner Junge kommt in einen Kaufladen mit einem Pfennig in seiner Hand und fragt: „Könnte ich für einen Pfennig gemischte Bonbons bekommen?“ Der Kaufmann nimmt zwei Bonbons aus seinem Kasten, gibt sie den Jungen und sagt: „Mischen kannst du sie dir selbst.“¹¹⁷

Auch hier erfährt ein Begriff einen begrenzten Anwendungsbereich. Genauso wie der Begriff „Stück“ in Bezug auf flüssige Körper keine Gültigkeit besitzt, versagt der Begriff „mischen“, wenn man versucht, ihn auf eine geringe Stückzahl (im konkreten Fall ist $n = 2$) anzuwenden. Verblüffend erscheint diese Thematik, sobald man den Begriff der Farben in die Diskussion mit einbezieht. Die Begriffe *rot* und *grün* können auch von farbenblinden Personen verwendet werden, obwohl für diese grundsätzlich ein vollkommen anderer Anwendungsbereich schlagend werden müsste. Diese prinzipielle Unsicherheit in der expliziten Bedeutung und somit korrekten Verwendung von Begriffen ist recht früh virulent geworden, und hat sofort den Ruf nach exakten Definitionen nach sich gezogen. D.h. man forderte - getreu der ursprünglichen Bedeutung des Wortes *Definition* - eine Festsetzung der Grenzen. Grenzen, die ganz genau bestimmen, wo der Begriff verwendet werden kann und wo nicht. Wenngleich dieser Ruf durchaus berechtigt war, er scheitert in dem Punkt, dass jede Definition eines Begriffs natürlich nur mit Hilfe anderer Begriffe gegeben werden kann, die ihrerseits Definitionsbedarf haben. Wie wir bereits bei Wittgenstein gesehen haben, bleiben einem dabei nur zwei Möglichkeiten: Man akzeptiert die Zirkelproblematik, und gibt das Vorhaben, jeden Begriff exakt zu definieren auf, oder man einigt sich - getreu Wittgensteins Elementarsätzen - auf einige Begriffe, die dann eben so genommen werden, wie sie sind, unanalysiert und undefiniert.¹¹⁸

¹¹⁶ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 239

¹¹⁷ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 239

¹¹⁸ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 240

4.1.2 Sprachphilosophischer Ursprung

Betrachten wir die Ursprünge der Bemühungen, die Sprache in ihre Schranken zu weisen. Bereits in der griechischen Philosophie beherrschte das Problem der Begriffe der Sprache die damaligen Vordenker. Allen voran Sokrates, dessen ganzes Leben sich um die Kunst der Sprache in der Philosophie drehte. Gilt er doch als Begründer der Anthropologie - sofern man gewillt ist Platons Ausführungen Folge zu leisten, da von Sokrates selbst keine Schriftstücke verfasst wurden -, der sprichwörtlich die Philosophie vom Himmel zurück auf die Erde holte und sich den Problemen der Ethik und somit dem Menschen selbst zuwandte. Dabei griff er auf die nach seiner Mutter benannte Hebammenkunst, der *Mäeutik* zurück, durch die er, genauso wie eine Hebamme Säuglinge hervorholt, im Dialog das Wissen aus dem Kopf seines Gesprächspartners hervorholt. Hatte er diesen erst einmal in die Ausweglosigkeit, die *Aporie* getrieben, musste dieser die Grenzen seiner Ausdrucksmittel erkennen und einsehen.¹¹⁹

In weiterer Folge war es aber Aristoteles, welcher in seinem Werk „Logik“ die Bemühungen auf sich nahm, eine feste Grundlage für das wissenschaftliche Denken zu schaffen. Er analysierte die Formen der Sprache, die formale Struktur von Schlüssen und Ableitungen unabhängig von ihrem Inhalt. Dabei unterschied er drei wesentliche Schlussformen¹²⁰:

- Die Deduktion
- Die Induktion
- Die Analogie

welche in weiterer Folge kurz dargestellt werden, um Aristoteles' Art und Weise nachzuvollziehen, sich philosophischen Problemen zu nähern.

4.1.2.1 Die Deduktion

Unter der Deduktion versteht man den Schluss vom Allgemeinen auf das Einzelne. Sie führt als Einzige der drei Schlussformen zu einem zwingenden Ergebnis, und beansprucht das Prädikat „schlüssig“ allein für sich. Ein Schluss im Rahmen der Deduktion besteht aus zwei *Prämissen* und einer *Conclusio*. Die Prämissen gliedern sich in den Obersatz (Major) und den Untersatz (Minor), welche den Schlusssatz bedingen. Dies unterliegt dem so genannten „Satz vom schwächeren Glied“, wonach sich die Gültigkeit eines Schlusses nach der jeweils eingeschränkteren - oder verneinende - Aussage richtet (*conclusio sequitur partem debiliorem*).

¹¹⁹ Vgl. Kunzmann Peter, Burkard Franz-Peter, Wiedmann Franz: dtv-Atlas Philosophie, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 12. Auflage 2005, S. 37

¹²⁰ Vgl. Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 37

Somit ergeben sich folgende allgemeine Regeln:

- Aus bloß negativen Aussagen kann nichts geschlossen werden.
- Aus nur positiven Aussagen kann keine negative folgen.
- Aus bloß besonderen Aussagen kann nichts gefolgert werden.

Da die Deduktion für sich beansprucht ausschließlich vom Allgemeinen auf das Einzelne zu schließen, muss insbesondere der Major universell sein, dem Minor kommt der Rang des „Besonderen“ zu. Das wohl bekannteste Beispiel der Deduktion lautet:

*Alle Menschen sind sterblich.
Sokrates ist ein Mensch.
Also ist Sokrates sterblich.*

In der Hegel'schen Bezeichnung wird dies formal folgendermaßen dargestellt:

$A \Rightarrow B$
 $B \Rightarrow E$
 $A \Rightarrow E$ (A...Allgemeines, B...Besonderes, E...Einzelnes)

Im ersten Schritt wird dem Allgemeinen (Alle Menschen) das Besondere (Sokrates) zugeordnet. Im zweiten Schritt ordnet man diesem Besonderen das Einzelne (ein Mensch) zu, um durch diese Kausalverkettung im dritten Schritt das Allgemeine dem Einzelnen zuzuordnen.

Bereits Aristoteles hat in vielen Beispielen darauf hingewiesen, dass diese Art des Schließens zwar einerseits sehr ergiebig, andererseits aber auch sehr fehleranfällig sein kann. So muss z.B. sichergestellt sein, dass der Mittelbegriff B sowohl im Major als auch im Minor identisch ist, da es ansonsten zu einer „Vervielfachung der Begriffe“ (quaternio terminorum) und somit zu Fehlschlüssen kommt. Dennoch, geht man von allgemeinen Sätzen aus, und beachtet die Axiome der Logik, folgen die Konsequenzen des Schlusses formal richtig - sie sind bewiesen. Doch die Problematik offenbart sich im Detail. Genau diese allgemeinen Sätze sind es nämlich, deren Formulierung uns Schwierigkeiten bereitet. Ihre Allgemeinheit erhalten sie durch Akzeptanz, welche sich wiederum durch eine exakte Naturbeschreibung erlangen lässt. Dies ist insofern schwierig, als dass man sich nicht auf gewisse abstrakte Vorstellungen berufen kann. Die Aussagen über die Natur *müssen in irgendeiner Form „zutreffen“, sie müssen mit dem, was faktisch geschieht, übereinstimmen*¹²¹.

4.1.2.2 Die Induktion

Indem die Deduktion bereits als einzige schlüssige Form dieser drei Methoden eingeführt wurde, erscheinen die Verbleibenden in einem etwas fahlen Licht. Die *Induktion* versucht aus mehreren ähnlichen Einzelergebnissen ein Allgemeines zu erschließen. Sie steht damit in krassen Widerspruch

¹²¹ Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 38

zur Deduktion, die es ja eben unterbindet, etwas aus besonderen Aussagen zu schließen. Dennoch galt die Induktion lange Zeit als die naturwissenschaftliche Methode schlechthin. Francis Bacon schlug sie in seinem Werk „Novum Organum“ als Methode der Naturwissenschaft vor.¹²² Viele berühmte Vertreter der Physik, allen voran Albert Einstein, entgegneten dieser Meinung allerdings einhellig:

*Höchste Aufgabe der Physiker ist also das Aufsuchen jener allgemeinsten elementaren Gesetze, aus denen durch reine Deduktion das Weltbild zu gewinnen ist. Zu diesen elementaren Gesetzen führt kein logischer Weg, sondern nur die auf Einfühlung in die Erfahrung sich stützende Intuition.*¹²³

Eine Begründung, warum der Induktion kurzzeitig eine derartige Favoritenrolle zukam, könnte in der irrigen Annahme liegen, die Naturwissenschaft leite ihre Gesetze aus Beobachtung von Einzelereignissen ab.

Offensichtlich befindet man sich in einem Dilemma: Auf der einen Seite kann man nur durch Abstraktion vom Allgemeinen auf das Einzelne schließen, auf der anderen Seite kann aber auch nicht zwingend von Einzelergebnissen auf Allgemeines geschlossen werden. Wenn die Induktion schon keine verlässlichen Schlüsse zulässt, was ist sie dann zumindest im Stande zu leisten? Werfen wir dazu einen Blick auf Newtons Optik:

*Die analytische Methode aber besteht darin, dass man aus Experimenten und Beobachtungen durch Induktion allgemeine Schlüsse zieht und dann keine Einwendungen zulässt, wenn sie nicht auf Experimente oder andere gewisse Wahrheiten sich stützen. Zwar gibt auch die Induktion keine allgemeinen Schlüsse, doch ist sie der beste Weg, welchen die Natur der Dinge zulässt, und wird umso sicherer, je allgemeiner sie ist. Ergeben Experimente Ausnahmen von den Induktionsschlüssen, so kann man die letzteren noch immer als Gesetze aussprechen, nur mit ausdrücklicher Bezeichnung der Ausnahmen. Auf solchem Wege wird die Analysis von dem Zusammengesetzten zum Einfachen, von der Wirkung zur Ursache, von der Bewegung zur Kraft, welche sie hervorbringt, fortschreiten. Die Synthesis besteht dann in dem Annehmen der entdeckten Ursachen als Prinzipien der Dinge und dem Ableiten aller Erscheinungen aus diesen Prinzipien.*¹²⁴

Mit Hilfe der Induktion gelangen wir zwar auf keinen unmittelbaren Weg zu naturwissenschaftlicher Gesetzmäßigkeit, doch sie erlaubt uns *Prinzipien* aufzustellen, welche ihrerseits als *allgemeine Behauptungen* eine Hilfestellung auf dem Weg dorthin einnehmen können.

4.1.2.3 Die Analogie

Zu den elementaren Gesetzen führt laut Einstein also kein logischer Weg. Beim Erschließen von physikalischem Neuland ist die Marschrichtung nicht klar vorgegeben, weswegen es oft hilfreich ist,

¹²² Vgl. Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 39

¹²³ Einstein, Albert: Mein Weltbild, Ullstein Taschenbuch 2005, 29. Auflage, S. 121

¹²⁴ Oeser, Erhard: Wissenschaftstheorie als Rekonstruktion der Wissenschaftsgeschichte, Band 2, Oldenbourg Verlag Wien München, 1979, S. 58f

sich an bereits bekanntem zu orientieren. Die *Analogie* liefert zwar keine verlässlichen Schlüsse, doch sie liefert der Forschung zumindest Vorschläge im Sinne von „So hat es schon einmal funktioniert!“.

Heisenberg selbst nutzte einst diese formale Möglichkeit, als er kühn den so genannten „Isotopenspin“ einführte. Dieser - mittlerweile Isospin genannt - stellt eine rein formale Vereinigung von Proton und Neutron da, welche in Analogie zum gewöhnlichen Spin mathematisch behandelt werden kann.¹²⁵

4.2 Wahrheit und Dichtung

Aristoteles hatte durch seine eben geschilderte Art und Weise, die Philosophie auf rein formal logischen Schlüssen aufzubauen, einen bis dahin unerreichten Grad an Genauigkeit erreicht, welcher der griechischen Philosophie zu einem größeren Maß an Klärung verhalf. Er schuf die Grundlage für die wissenschaftliche Sprache, wodurch auch eine gewisse Ordnung in der Methode des Denkens Einzug hielt.

Allerdings bringt diese logische Analyse der Sprache auch die Gefahr der Vereinfachung mit sich, da sie sich ausschließlich auf spezielle sprachliche Strukturen stützt, und von einer mehrdeutigen Verknüpfung zwischen Voraussetzung und Folgerung deutlich Abstand nimmt. Es ist schwierig zu sagen, ob nicht auch andere sprachliche Strukturen zu einer besseren Wirklichkeitsdarstellung verhelfen können. Versteift man sich ausschließlich auf eine rein formale Schlusskette, klammert man ja gleichzeitig alle Nebenbedeutungen der Wörter aus. Sekundäre Bedeutungen, die im Halbdunklen mitschwingen, wenn das Wort erklingt, und so womöglich wesentlich zum Inhalt des Gesprochenen beitragen. Gerade diese rufen unterbewusst Bewegungen im Denken hervor, welche ein logisches Schlussverfahren nicht einmal anzuregen im Stande wäre.

Womöglich ist das der Grund, warum sich Gedichte leichter lesen lassen als mathematische Beweise und sich Dichter oft gegen die übertriebene Betonung des logischen Schlusses verwehrten. Goethes Mephistopheles richtet sich mit einer harschen Kritik an der Enge des einfachen logischen Schlussverfahrens wie folgt an den Schüler:

*Gebraucht der Zeit, sie geht so schnell von hinnen,
Doch Ordnung lehrt Euch Zeit gewinnen.
Mein teurer Freund, ich rat' Euch drum,
Zuerst Collegium logicum.
Da wird der Geist Euch wohl dressiert,
In spanische Stiefel eingeschnürt,
Daß er bedächtiger so fortan
Hinschleiche die Gedankenbahn,*

¹²⁵ Vgl. Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 41

*Und nicht etwa, die Kreuz und Quer',
 Irrlichteriere hin und her.
 Dann lehret man Euch manchen Tag,
 Daß, was Ihr sonst auf einen Schlag
 Getrieben, wie Essen und Trinken frei,
 Eins! Zwei! Drei! dazu nötig sei.
 Zwar ist's mit der Gedankenfabrik
 Wie mit einem Weber-Meisterstück,
 Wo ein Tritt tausend Fäden regt,
 Die Schifflein herüber-hinüber schießen,
 Die Fäden ungesehen fließen,
 Ein Schlag tausend Verbindungen schlägt:
 Der Philosoph, der tritt herein
 Und beweist Euch, es müßt' so sein:
 Das Erst' wär' so, das Zweite so;
 Und drum das Dritt' und Vierte so;
 Und wenn das Erst' und Zweit' nicht wär',
 Das Dritt' und Viert' wär nimmermehr.
 Das preisen die Schüler allerorten,
 Sind aber keine Weber geworden.
 Wer will was Lebendiges erkennen und beschreiben,
 Sucht erst den Geist herauszutreiben,
 Dann hat er die Teile in seiner Hand,
 Fehlt, leider! nur das geistige Band.¹²⁶*

Andererseits bleibt die Sprache das einzige Mittel der Naturwissenschaft, sich untereinander auszutauschen und mitzuteilen. Gerade hier ist jegliche Mehrdeutigkeit absolut kontraproduktiv und durch ein logisches Schlussverfahren zu ersetzen. Dies spielt speziell bei der Formulierung von Naturgesetzen eine große Rolle, werden doch aus dem Allgemeinen Einzelphänomene abgeleitet, welche als Folge einfacher allgemeiner Gesetze verstanden werden. Will man diese Gesetze allgemein gültig formulieren, *können sie nur einige wenige Begriffe enthalten, denn sonst wären sie nicht einfach und allgemein*¹²⁷. Aus diesen Begriffen gilt es dann eine unendliche Vielzahl von möglichen Erscheinungen herzuleiten, wobei das Hauptaugenmerk auf einer exakten sprachlichen Formulierung für jeden Einzelfall liegen soll. Die ungenau und unscharf definierten Begriffe der gewöhnlichen Sprache können diese Ansprüche kaum erfüllen. Hören wir Heisenberg:

Wenn aus gegebenen Voraussetzungen eine Kette von Schlüssen hergeleitet werden soll, so hängt die Anzahl der möglichen Glieder in der Kette von der Genauigkeit der Voraussetzungen ab. In der Naturwissenschaft müssen daher die Grundbegriffe in den allgemeinen Gesetzen mit äußerster Präzision definiert werden, und das ist nur mit Hilfe der mathematischen Abstraktion möglich.¹²⁸

¹²⁶ Friedenthal, Richard: Goethes Werke in zwei Bänden, Erster Band, Faust - Der Tragödie erster Teil, Dromersche Verlagsanstalt München Zürich, 1957, S. 764f

¹²⁷ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 243

¹²⁸ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 243

4.3 Symbolhaftigkeit

Die Methode der theoretischen Physik basiert auf dem Grundkonzept, für gewisse Erscheinungen und experimentelle Befunde mathematische Symbole einzuführen, welche ihnen sodann zugeschrieben werden können. Um diesen Symbolen eine Beziehung zur Messung zuzuweisen, beschriftet man sie mit Namen. Dadurch sind diese Symbole - Elemente der mathematischen Sprache - mit der gewöhnlichen Sprache verknüpft. Die Symbole wiederum werden durch ein strenges Regelsystem von Definitionen und Axiomen miteinander verbunden, wodurch schließlich die physikalischen Gesetze als Gleichungen zwischen diesen Symbolen ausgedrückt werden. Die Vielfalt der möglichen Kombinationsmöglichkeiten spiegelt die Vielfalt der zu beschreibenden Erscheinungen in der Natur wider. Die Gesetze werden durch Symbole bezeichnet, die Symbole können dann in der gewöhnlichen Sprache genannt werden. Man verfügt also über die Möglichkeit, Gesetze selbst in Begriffen der gewöhnlichen Sprache auszudrücken.

Zudem muss man bedenken, dass sich mit dem Prozess der Erweiterung der wissenschaftlichen Erkenntnis auch die Sprache erweitert: Neue Begriffe müssen eingeführt werden, alte Begriffe werden weitreichender oder anders verwendet, als bei ihrem Gebrauch in der gewöhnlichen Sprache. Die gewöhnliche Sprache wird um Begriffe einer wissenschaftlichen Sprache erweitert - z.B. Energie, Elektrizität, Entropie. Die Erweiterung selbst passt sich haargenau den neugewonnenen wissenschaftlichen Gebieten an, und umgekehrt. Dennoch ist und bleibt die gewöhnliche Sprache nach wie vor die gewöhnliche Sprache.

4.4 Widerspruchsfreiheit

Betrachten wir die Zeit um 1900: Bevor Relativitätstheorie und Quantentheorie die Grundfeste der Physik erschütterten, herrschte im Land der Physik eitle Wonne. Oft wurde von einem abgeschlossenen System gesprochen¹²⁹, welches man auf das weite Feld der Experimente problemlos anwenden konnte. Wenngleich mehrere neue Begriffe Einzug in die Physik hielten - z.B. etablierte sich der Begriff des „elektrischen Feldes“ langsam aber stetig - waren mit ihnen Änderungen der wissenschaftlichen Grundvorstellungen verbunden, die aber bis zu einem gewissen Grad noch keine allzu großen Schwierigkeiten bereiteten. Die grundlegendsten Vorstellungen dieser Sprache beinhalteten die Annahmen, *dass die Euklidische Geometrie im wirklichen Raum gelte, und dass die Vorgänge in Raum und Zeit geschehen unabhängig davon, ob sie beobachtet werden oder nicht*¹³⁰.

¹²⁹ Vgl. Gribbin, John: Auf der Suche nach Schrödingers Katze, Quantenphysik und Wirklichkeit, Piper Verlag, München, 2. Auflage, 2004, S. 15

¹³⁰ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 245

In dieses geschützte Nest brachen nun die neuesten Erkenntnisse der modernen Physik wie ein plötzlicher Pfeilhagel herein. Heftige Diskussionen entbrannten darob, Befürworter als auch Kritiker standen sich heftig argumentierend gegenüber. Heisenberg, als einer der Gründerväter der modernen Physik, kommentierte diesen Zustand:

Wie sollte man über die neue Situation sprechen? [...] Sollte man sagen, dass die Struktur von Raum und Zeit wirklich verschieden war von der, die man früher angenommen hatte, oder sollte man nur sagen, dass die experimentellen Ergebnisse bei ihrer theoretischen Deutung mathematisch in einer solchen Weise verknüpft werden sollten, wie es dieser neuen Struktur entsprach, während Raum und Zeit als die allgemeinen Anschauungsformen, in denen wir die Welt wahrnehmen, bleiben, was sie immer gewesen sind. Das wirkliche Problem hinter diesen vielen strittigen Fragen war die Tatsache, dass es keine Sprache gab, in der man widerspruchsfrei über die neue Situation reden konnte.¹³¹

Begriffe wie Raum und Zeit, die seit Jahrhunderten widerspruchsfrei verwendet werden konnten, führten nun also durch die Hinzuziehung der Relativitätstheorie zu einer gewaltigen Konfusion. Zudem kam der Umstand hinzu, dass im Rahmen der Relativitätstheorie im Grenzfall sehr kleiner Geschwindigkeiten (klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit) die neue Theorie praktisch identisch mit der alten, herkömmlichen Theorie war. Hier hatten die Begriffe also ihre ursprüngliche Bedeutung beibehalten. Strittige Debatten über Begriffe wie *gleichzeitig*, *wirklich*, *scheinbar* wurden also gar nicht aufgrund der Tatsachen an sich, sondern vielmehr aufgrund der Sprache ausgefochten.

In der Quantentheorie sucht man im Gegensatz zur allgemeinen Relativitätstheorie vergeblich nach einer derart schönen 1:1 Überführung der modernen Theorie zurück zur klassischen Theorie in Dimensionen, die groß sind verglichen mit der Ausdehnung des Atoms. Hier muss man zusätzlich zur Beziehung zwischen den mathematischen Symbolen, den Messergebnissen und den gewöhnlichen Begriffen der Alltagssprache noch ein statistisches Element hinzunehmen, *welches im Grenzfall großer Dimensionen die Wirkung der Interferenz der Wahrscheinlichkeit zerstört*¹³². Dennoch bleibt das Dilemma, dass man in der gewöhnlichen Sprache nicht über das Atom selbst reden kann. Heisenberg schlägt zur Lösung dieses Problems zwei Wege vor:

Man kann entweder fragen, welche Sprechweise über die Atome sich in den dreißig Jahren seit der Formulierung der Quantenmechanik tatsächlich unter den Physikern eingebürgert hat. Oder man kann die Versuche zur Definition einer präzisen wissenschaftlichen Sprache beschreiben, die dem mathematischen Schema der Quantentheorie entspricht.¹³³

4.4.1 Die eingebürgerte Sprechweise

Auf die erste Frage antwortet Heisenberg mit einem netten Gleichnis: Hört man sich ein Musikstück an, kann man einerseits die Musik als Ganzes genießen, oder andererseits die Musik in ihre Einzelteile aufteilen und ihre Struktur analysieren. Auf beide Arten erfährt man etwas über das Stück,

¹³¹ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 246 (Hervorhebung durch den Autor)

¹³² Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 252

¹³³ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 252f

und steht mit ihm in einen Diskurs. Die Frage, welche Art den größeren Erlebnischarakter und Erkenntnischarakter besitzt, muss so jeder für sich selbst entscheiden. In der Physik hat man sich, so führt Heisenberg aus, für den ersten Weg entschieden, und wählt eher eine zweideutige Sprache. Man verwendet sozusagen die Begriffe der klassischen Physik in einer etwas ungenauen Art, die mit der Unschärferelation konform geht. Quasi, um im Wiener Jargon zu bleiben: „Geht sich grad noch aus!“ Dabei bleibt man sich aber stets der Tatsache bewusst, *dass diese Begriffe nur einen sehr begrenzten Anwendungsbereich besitzen. Sobald dieser vage und unsystematische Gebrauch der Sprache zu Schwierigkeiten führt, muss sich der Physiker in das mathematische Schema zurückziehen und dessen eindeutige Verknüpfung mit den experimentellen Tatsachen benützen*¹³⁴.

Betrachtet man das Feld der Thermodynamik, lässt sich eine eingebürgerte Sprechweise erkennen, die der der Quantentheorie formal nicht unähnlich ist. So verwenden wir etwa en passant den Begriff *Temperatur* und beschreiben ihn wie eine objektive Eigenschaft der Materie. Im Alltag bestimmen wir ständig die Temperatur diverser Körper, meistens sogar unseres eigenen. Dies ist im Alltag mit Hilfe eines Thermometers relativ leicht zu bewerkstelligen. Doch sobald wir definieren wollen, was die Temperatur z.B. eines Atoms bedeuten soll, scheitern wir sogar mit den Begriffen der klassischen Physik. Die Temperatur des Atoms lässt sich nun mal nicht analog zu einer anderen Eigenschaft definieren, wodurch man gezwungen ist, sie bis zu einem gewissen Grad mit der unzureichenden Kenntnis des Atoms zu verknüpfen. Beruft man sich bei der Beschreibung der Temperatur des Atoms auf gewisse statistische Erwartungswerte, erfüllt man damit wohl nicht einen objektiven Anspruch, aber man kann damit leben. Für den Alltag hat diese Unbestimmtheit keinerlei Konsequenzen, solange die eigene Temperatur nicht über 42° C steigt. Heisenberg schreibt diesen Erwartungswerten Ähnlichkeiten mit der *Potentia*¹³⁵ im Sinne der Aristotelischen Philosophie zu:

*In der Tat glaube ich, dass die Sprache, die bei den Physikern gebräuchlich ist, wenn sie über Atomvorgänge sprechen, in ihrem Denken ähnliche Vorstellungen hervorruft wie der Begriff „Potentia“. [...] Die Sprache hat sich, wenigstens in einem gewissen Ausmaße, schon an die wirkliche Lage angepasst. Aber es ist nicht eine präzise Sprache, in der man die normalen logischen Schlussverfahren benutzen könnte; es ist eine Sprache, die Bilder in unserem Denken hervorruft, aber zugleich mit ihnen doch auch das Gefühl, dass die Bilder nur eine unklare Verbindung mit der Wirklichkeit besitzen, dass sie nur die Tendenz zu einer Wirklichkeit darstellen.*¹³⁶

Heisenberg billigt der vorherrschenden eingebürgerten Sprechweise einen großen Handlungsspielraum zu, zeigt sich aber gleichsam auch unzufrieden mit den Ergebnissen, die von einem unsicheren Gefühl begleitet werden. Dem sei eine Stelle aus dem Tractatus gegenübergestellt:

¹³⁴ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 253

¹³⁵ Aristoteles verbindet seine Lehre von Stoff und Form zu einer Synthese des Werdens: auf der „Unterlage“ (griech. hypokeimenon) Stoff formt sich die Form des Gegenstandes aus. In der Materie ist das Wesen nur der **Möglichkeit** (dýnamis/potentia) nach angelegt, Aktualität/Wirklichkeit (enérgeia) gewinnt es durch die Form. Das Wesen der Dinge liegt nicht in einer transzendenten Idee von ihnen, sondern verwirklicht sich in der Reihenfolge ihrer Erscheinungen. (Kunzmann Peter, Burkard Franz-Peter, Wiedmann Franz: dtv-Atlas Philosophie, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 12. Auflage 2005, S. 49)

¹³⁶ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 255

3.001

„Ein Sachverhalt ist denkbar“ heißt: Wir können uns ein Bild von ihm machen.¹³⁷

Es herrscht noch keine Konformität und keine Zufriedenheit zwischen den zwei Denkansätzen, mit der eingebürgerten Sprechweise auf der einen Seite, und einer präzisen Wissenschaftssprache auf der anderen. Betrachten wir daher, inwiefern Heisenberg die zweite von ihm gestellte Frage beantwortet.

4.4.2 Die präzise wissenschaftliche Sprache

Die in ihrem Wesen begründete Ungenauigkeit der in der Physik gebräuchlichen Alltagssprache führt unweigerlich zur Forderung einer präzisen wissenschaftlichen Sprache. Eine Sprache, die sowohl den gesamten mathematischen Aspekt der Quantenmechanik samt wohl definierten Schlüssen enthält, als auch ~~darüber~~¹³⁸ diese berichtet. Nun ist es jedoch so, dass die Quantentheorie mit der klassischen Logik auf Kriegsfuß steht. Will man das mathematische Schema der Quantentheorie als Zusatzerweiterung der Logik einfügen, stößt man sich bereits an einem der Grundaxiome der klassischen Logik. Denn diese geht ja davon aus, dass wenn eine Behauptung überhaupt einen Sinn hat, entweder die Behauptung selbst oder ihre Negation korrekt sein muss. *Tertium non datur* - eine dritte Möglichkeit existiert nicht¹³⁹. Es mag zwar vorkommen, dass man nicht weiß, ob die Behauptung selbst oder ihre Negation korrekt ist, aber zumindest ist eine von beiden richtig.

In der Quantentheorie muss der Satz „Tertium non datur“ - eingedenk gemischter Zustände und Überlagerungen - abgeändert werden. Carl Friedrich von Weizsäcker unterscheidet in diesem Punkt verschiedene Stufen der Sprache¹⁴⁰:

- Eine Stufe handelt von den Objekten, z.B. von den Atomen oder den Elektronen.
- Eine zweite Stufe bezieht sich auf Aussagen über die Objekte.
- Eine dritte mag sich auf Aussagen über Aussagen über Objekte beziehen usw.

*Es wäre dann möglich, verschiedene logische Schlussverfahren in den verschiedenen Stufen zu benutzen. Allerdings wird man schließlich auf die gewöhnliche Sprache und damit auf die klassische Logik zurückkommen müssen.*¹⁴¹

Heisenberg erläutert dies mit folgendem Beispiel:

Bei der möglichen Abänderung der klassischen Logik soll es sich also zunächst um die Stufe der Sprache handeln, die sich mit den Objekten selbst befasst. Betrachten wir etwa ein Atom, das sich in einem geschlossenen Kasten bewegt, der durch eine Wand in zwei gleiche Teile geteilt sei. In der Wand sei ein kleines Loch, so dass das Atom gelegentlich hindurch fliegen

¹³⁷ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 13

¹³⁸ Eine formal logische Sprache hat es nicht mehr nötig *über* oder *von* etwas zu berichten, sondern berichtet ausschließlich etwas, auch auf die Gefahr hin grammatikalisch grenzwertig zu erscheinen.

¹³⁹ Vgl. Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 29

¹⁴⁰ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 256

¹⁴¹ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 256f

kann. Nach der klassischen Logik kann das Atom entweder in der linken oder in der rechten Hälfte des Kastens sein. Es gibt keine dritte Möglichkeit; tertium non datur. In der Quantentheorie aber müssen wir zugeben, sofern wir die Wörter Atom und Kasten überhaupt verwenden wollen, dass es noch andere Möglichkeiten gibt, die in einer merkwürdigen Weise Mischungen aus den beiden früheren Möglichkeiten darstellen. Dies ist notwendig, um die Ergebnisse unserer Versuche zu erklären. Wir könnten z.B. Licht beobachten, das von dem Atom gestreut worden ist. Wir könnten etwa drei Versuche ausführen. Im ersten ist das Atom (z.B. dadurch, dass das Loch in der Wand geschlossen wird) auf die linke Hälfte des Kastens beschränkt, und die Intensitätsverteilung des Streulichtes wird gemessen. Im zweiten wird das Atom auf die rechte Hälfte des Kastens beschränkt und wieder das Streulicht gemessen. Schließlich im dritten kann sich das Atom frei im Kasten hin und her bewegen und wieder wird die Intensitätsverteilung des Streulichtes messend untersucht. Wenn das Atom nun immer entweder in der linken oder der rechten Hälfte des Kastens gewesen wäre, so müsste die Intensitätsverteilung im dritten Versuch eine Mischung (je nach dem Bruchteil der Zeit, der vom Atom in der einen der beiden Hälften verbracht wird) der beiden früheren Intensitätsverteilungen sein. Aber das ist nach den Experimenten im Allgemeinen nicht richtig.¹⁴²

Heisenberg schlägt mit diesem Beispiel zwei Fliegen mit einer Klappe. Einerseits verdeutlicht er die Merkwürdigkeiten¹⁴³, die sich aus den Experimenten der Quantentheorie ergeben, andererseits lässt er kaum merklich anklingen, inwiefern seine ganze Beschreibung überhaupt zulässig ist. Gibt er doch zu Bedenken, ob man überhaupt von einem Atom, einem Kasten (in weiterer Folge sicherlich auch Licht!) sprechen kann. Seine unterschwellige Kritik trifft hier abermals die gewöhnliche Sprache, in der ein Kasten nun mal nur ein Kasten ist, und schreit förmlich nach einer präzisen wissenschaftlichen Sprache. Als ersten Schritt, um über die oben geschilderte Situation exakter sprechen zu können, führte v. Weizsäcker den Begriff *Wahrheitswert* ein.¹⁴⁴ Dadurch wird den zwei Aussagen „das Atom ist in der linken Hälfte des Kastens“ und „das Atom ist in der rechten Hälfte des Kastens“ eine Alternative geboten, welche sich rein auf einen mathematischen Formalismus stützt, aber durch den Wahrheitswert in der gewöhnlichen Sprache ausgedrückt werden kann. Als Maß für diesen Wert wird eine komplexe Zahl eingeführt. Ist die Zahl 1, so bedeutet dies, dass die Aussage richtig ist. Ist die Zahl 0, so bedeutet dies, dass die Aussage falsch ist. Zwischen 0 und 1 sind alle anderen Werte ebenso möglich, *das Absolut-Quadrat der komplexen Zahl gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Aussage richtig ist. Die Summe der beiden Wahrscheinlichkeiten, die sich auf die beiden Teile der Alternative beziehen (entweder links oder rechts in unserem Fall) muss 1 sein*¹⁴⁵. Mit Hilfe dieser Vorschriften lässt sich dann auch der Begriff *Komplementarität* definieren:

Jede Aussage, die nicht identisch ist mit einer der beiden alternativen Aussagen - in unserem speziellen Fall mit den Aussagen „das Atom befindet sich in der linken Hälfte des Kastens“ oder „das Atom befindet sich in der rechten Hälfte des Kastens“ -, wird komplementär zu diesen Aussagen genannt. Für jede komplementäre Aussage ist die Frage, ob sich das Atom links oder rechts befindet, unentschieden. Aber der Ausdruck „unentschieden“ ist keineswegs äquivalent zu dem Ausdruck „unbekannt“. „Unbekannt“ würde bedeuten, dass das Atom in

¹⁴² Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 257f

¹⁴³ Merkwürdigkeiten erklären sich anscheinend dadurch, dass sie in krasssem Widerspruch zur klassischen Logik stehen, dennoch aber experimentellen Wahrheitscharakter tragen, wodurch man sie nicht außer Acht fallen lassen darf.

¹⁴⁴ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 258

¹⁴⁵ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 258

Wirklichkeit links oder rechts ist, dass wir nur nicht wissen, wo es ist. Aber „unentschieden“ deutet eine davon verschiedene Situation an, die nur durch eine komplementäre Aussage dargestellt werden kann.¹⁴⁶

Diese - ausschließlich in der gewöhnlichen Sprache unternommene - Unterscheidung erleichtert das Sprechen über die Quantentheorie ungemein. Dieses logische Schema bildet bereits die Grundlage für eine präzise Sprache. Allerdings wirft ihre Anwendung erneut Probleme auf, von denen zwei ins nähere Blickfeld treten sollen. Es handelt sich um die Beziehung zwischen den verschiedenen Stufen der Sprache, und die Konsequenzen für die zugrunde liegende Ontologie.¹⁴⁷

4.4.2.1 Die Beziehung zwischen den verschiedenen Stufen der Sprache

Betrachten wir die zwei Aussagen:

- „Das Atom befindet sich in der linken Hälfte des Kastens“
- „Es ist wahr, dass das Atom in der linken Hälfte des Kastens ist“

Logisch betrachtet, gehören sie zu verschiedenen Stufen der Sprache. Durch die Brille der klassischen Logik gesehen, sind diese beiden Aussagen aber völlig äquivalent. D.h. sie sind entweder beide richtig, oder beide falsch. Einen Mittelzustand gibt es dabei nicht. Es ist nicht möglich, dass die eine richtig ist, und die andere falsch. Legen wir nun aber die Brille der klassischen Logik zur Seite und setzen uns die Brille der Komplementarität auf, erkennen wir einen komplizierteren Sachverhalt. Nach wie vor gilt, ist die erste Aussage richtig, ist auch die zweite Aussage richtig. Gleiches gilt für eine falsche erste Aussage, dann ist auch die zweite Aussage falsch. Aber:

- „Es ist *nicht* wahr, dass das Atom in der linken Hälfte des Kastens ist“

hat nicht unmittelbar zur Folge, dass:

- „Das Atom sich *nicht* in der linken Hälfte des Kastens befindet“.

Dieser Zustand kann noch *unentschieden* sein. Es muss nicht unbedingt in der rechten Hälfte des Kastens sein. Bezüglich der Richtigkeit der Aussagen besteht noch völlige Äquivalenz der beiden Stufen der Sprache, doch nicht mehr bezüglich der Falschheit der Aussagen. Heisenberg leitet davon die „Persistenz der klassischen Gesetze in der Quantentheorie“ ab:

Wo immer bei einem gegebenen Experiment die Anwendung der klassischen physikalischen Gesetze zu einem bestimmten Schluss führt, wird das gleiche Ergebnis auch aus der Quantentheorie folgen, und es wird sich auch experimentell so verhalten.¹⁴⁸

¹⁴⁶ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 259

¹⁴⁷ Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 259

¹⁴⁸ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 260

4.4.2.2 Die Konsequenzen für die zugrunde liegende Ontologie

Die dem modifizierten logischen Schema zugrunde liegende Ontologie¹⁴⁹ sorgt nach wie vor für große Missverständnisse in der Debatte der Quantentheorie. Immer wieder liest und hört man z.B. von so genannten „Wahrscheinlichkeitswellen“, welche die aus den Experimenten der Quantentheorie ersichtlichen Welleneigenschaften wie konstruktive und destruktive Interferenz für existente Teilchen übernehmen sollen. Man schreibt also jedem Teilchen eine Wahrscheinlichkeitsfunktion zu, welche sich dann wie eine Welle verhält, und so das mit Masse und Impuls verhaftete Teilchen um Wellenzahl und Wellenvektor bereichert. Diese Formulierung ist aber gerade ein Paradebeispiel dafür, wie fälschlich in der Formulierung der Quantentheorie mit den Begriffen der gewöhnlichen Sprache herumgeschleudert wird. Heisenberg schlug daher bereits um 1958¹⁵⁰ den Begriff „Zustand“ zur Beschreibung einer Situation in der Natur vor:

Die „Zustände“, die komplementären Aussagen entsprechen, werden dann durch v. Weizsäcker „koexistierende Zustände“ genannt. Dieser Ausdruck „koexistierend“ beschreibt die Situation korrekt; es wäre in der Tat schwierig, sie etwa „verschiedene Zustände“ zu nennen, denn jeder Zustand enthält bis zu einem gewissen Grad auch die anderen „koexistierenden Zustände“. Dieser „Zustands“-Begriff würde dann hinsichtlich einer Ontologie der Quantentheorie eine erste Definition bilden. Man erkennt sofort, dass dieser Gebrauch des Wortes „Zustand“, besonders des Ausdrucks „koexistierender Zustand“, so verschieden ist von dem der gewöhnlichen materialistischen Ontologie, dass man zweifeln kann, ob man hier noch eine zweckmäßige Terminologie benützt. Wenn man andererseits das Wort „Zustand“ so auffasst, dass es eher eine Möglichkeit als eine Wirklichkeit bezeichnet - man kann sogar einfach das Wort „Zustand“ durch das Wort „Möglichkeit“ ersetzen -, so ist der Begriff von „koexistierenden Möglichkeiten“ ganz plausibel, da eine Möglichkeit eine andere einschließen oder sich mit anderen Möglichkeiten überschneiden kann.¹⁵¹

4.4.2.3 Ernüchterung und Ausblick

Wenngleich Heisenberg auf dem Weg zu einer präzisen wissenschaftlichen Sprache viel unternommen hat, kann auch er sich sprachlich nicht von *Möglichkeiten* und *Unbestimmtheiten* trennen. Zur Bewältigung dieser schwierigen Definitionen und Unterscheidungen schlägt er explizit vor, *die Sprache überhaupt auf die Beschreibung von Tatsachen, d.h. in unserem Fall von experimentellen Resultaten zu beschränken*. Will man allerdings über die atomaren Teilchen selbst sprechen, *muss man entweder das mathematische Schema allein als Ergänzung zu der gewöhnlichen*

¹⁴⁹ Die Ontologie ist eine Disziplin der theoretischen Philosophie, welche sich mit der Grundstruktur der Realität beschäftigt. Speziell in der systematischen Philosophie verwendet man die Begriffe „Ontologie“ und „Metaphysik“ gleichsinnig.

¹⁵⁰ Das amerikanische Original seiner Vorlesungssammlung „Physics and Philosophy“, welche Heisenberg im Rahmen der so genannten „Gifford Vorlesungen“ an verschiedenen Universitäten Schottlands hielt, erschien 1958 in „The World Perspective Series“, geplant und herausgegeben von Dr. Ruth Nanda Ansien, bei Harper & Brothers, New York. 1959 erfolgte die erste deutsche Auflage im S. Hirzel Verlag.

¹⁵¹ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 261

*Sprache benützen, oder man muss es kombinieren mit einer Sprache, die sich einer abgeänderten Logik oder überhaupt keiner wohldefinierten Logik bedient*¹⁵².

Beinahe ernüchtert schließt Heisenberg seine Abhandlung über Sprache und Wirklichkeit in der modernen Physik:

*In den Experimenten über Atomvorgänge haben wir mit Dingen und Tatsachen zu tun, mit Erscheinungen, die ebenso wirklich sind wie irgendwelche Erscheinungen im täglichen Leben. Aber die Atome oder die Elementarteilchen sind nicht ebenso wirklich. Sie bilden eher eine Welt von Tendenzen oder Möglichkeiten als eine von Dingen und Tatsachen.*¹⁵³

Den Nachklang dieser Worte in den Ohren, liest sich die erste Zeile des Tractatus':

*1 Die Welt ist alles, was der Fall ist.*¹⁵⁴

eher folgendermaßen realer:

1 Die Welt ist alles, was der Fall ist und der Fall sein kann.*

Doch soll die Einsicht, dass die Definition einer präzisen, exakten wissenschaftlichen Sprache angesichts unserer omnipräsenten gewöhnlichen Sprache in dem uns gebräuchlichen System der klassischen Logik nicht möglich ist, nicht traurig stimmen: Heisenberg beschreibt in seinem wunderschön zu lesenden Buch „Der Teil und das Ganze“ die amüsante Begebenheit, als er einige Tage mit Niels Bohr, Carl Friedrich von Weizsäcker und anderen Größen seiner Zeit auf einer Almhütte zubrachte, ihm die Aufgabe zu Teil wurde, gemeinsam mit Niels Bohr nach dem Essen das Geschirr abzuwaschen:

*Dass in einer solchen Almküche die hygienischen Anforderungen nicht denen der Stadt entsprechen können, bedarf keiner Erwähnung. Niels kommentierte diesen Sachverhalt, indem er sagt: „Mit dem Geschirrwaschen ist es doch genauso wie mit der Sprache. Wir haben schmutziges Spülwasser und schmutzige Küchentücher, und doch gelingt es, damit Teller und Gläser schließlich sauberzumachen. So haben wir in der Sprache unklare Begriffe und eine in ihrem Anwendungsbereich in unbekannter Weise eingeschränkte Logik, und doch gelingt es, damit Klarheit in unser Verständnis der Natur zu bringen.“*¹⁵⁵

¹⁵² Vgl. Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 261f

¹⁵³ Heisenberg, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007, S. 262

¹⁵⁴ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 9

¹⁵⁵ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 190

5 PHYSIK UND PHILOSOPHIE

Sapere aude!
[Horaz]

5.1 Zwischen Wittgenstein und Heisenberg

Die folgenden Textpassagen entstammen einem Interview, welches Werner Heisenberg in den frühen 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts im Rahmen der CBC Radio Dokumentationsserie „Physics and Beyond“ mit David Peat und Paul Buckley führte.¹⁵⁶ In diesem stellt Heisenberg quasi resümierend seine gefestigten Ansichten bezüglich der Quantentheorie, Philosophie und Sprache auf angenehm unkomplizierte Weise dar. Zusätzlich zu seinen von ihm aus dem Gedächtnis zu Papier gebrachten Gesprächen in seiner bereits erwähnten Biographie stellt dieser Auszug eine weitere Facette seines Denkens dar, welches in weiterer Folge als Anlass für ein naturphilosophisches Resümee zur Verfügung steht:

Professor Heisenberg was interviewed one sunny morning in his office at the Max Planck Institute in Munich. We began by asking Heisenberg to recall the early days of quantum theory but it became apparent that great men have no desire to live in the past and he was just as eager to talk about the future of physics. [...]

DP *In the interpretation you gave at that time [beginning of the 1920s], you seemed to imply that there did exist an ideal path and that somehow the act of measuring disturbed the path. This is not quite the same as the interpretation that you hold now, is it?*

WH *I will say that for us, that is for Bohr and myself, the most important step was to see that our language is not sufficient to describe the situation. A word such as path is quite understandable in the ordinary realm of physics when we are dealing with stones, or grass, etc., but it is not really understandable when it has to do with electrons. In a cloud chamber, for instance, what we see is not the path of an electron, but, if we are quite honest, only a sequence of water droplets in the chamber. Of course we like to interpret this sequence as a path of the electron, but this interpretation is only possible with restricted use of such words as position and velocity.*

¹⁵⁶ Das Interview wurde später in „Glimpsing Reality: Ideas in Physics and the Link to Biology, a collection of interviews with leading scientists of the Twentieth Century“ veröffentlicht.
[<http://www.f davidpeat.com/interviews/heisenberg.htm>, Stand: 18.08.2009]

So the decisive step was to see that all those words we used in classical physics - position, velocity, energy, temperature, etc. - have only a limited range of applicability. The point is we are bound up with a language, we are hanging in the language. If we want to do physics, we must describe our experiments and the results to other physicists, so that they can be verified or checked by others. At the same time, we know that the words we use to describe the experiments have only a limited range of applicability. That is a fundamental paradox which we have to confront. We cannot avoid it; we have simply to cope with it, to find what is the best thing we can do about it.

DP *Would you go so far as to say that the language has actually set a limit to our domain of understanding in quantum mechanics?*

WH *I would say that the concepts of classical physics which we necessarily must use to describe our experiments do not apply to the smallest particles, the electrons or the atoms - at least not accurately. They apply perhaps qualitatively, but we do not know what we mean by these words. [...]*

DP *The philosopher Ludwig Wittgenstein originally started out by thinking that words were related to facts in the world, then later reversed his position to conclude that the meaning of words lay in their use. Is this reflected in quantum mechanics?*

WH [...] *In the Tractatus, which I thought too narrow, he always thought that words have a well-defined meaning, but I think that is an illusion. Words have no well-defined meaning. We can sometimes by axioms give a precise meaning to words, but still we never know how these precise words correspond to reality, whether they fit reality or not. We cannot help the fundamental situation - that words are meant as a connection between reality and ourselves - but we can never know how well these words or concepts fit reality. This can be seen in Wittgenstein's later work. I always found it strange, when discussing such matters with Bertrand Russell, that he held the opposite view; he liked the early work of Wittgenstein and could do nothing whatsoever with the late work. On these matters we always disagreed, Russell and I. I would say that Wittgenstein, in view of his later works, would have realized that when we use such words as position or velocity, for atoms, for example, we cannot know how far these terms take us, to what extent they are applicable. By using these words, we learn their limitations.*

DP *Would it be true to say that quantum mechanics has modified language, and, in turn, language will re-modify the interpretation of quantum mechanics?*

WH *There I would not quite agree. In the case of relativity theory, I would agree that physicists have simply modified their language; for instance, they would use the word simultaneous now with respect to certain coordinate systems. In this way they can adapt their language to the mathematical scheme. But in quantum theory this has not happened. Physicists have never really tried to adapt their language, though there have been some theoretical attempts. But it was found that if we wanted to adapt the language to the quantum theoretical mathematical scheme, we would have to change even our Aristotelian logic. That is so disagreeable that nobody wants to do it; it is better to use the words in their limited senses, and when we must go into the details, we just withdraw into the mathematical scheme. I would hope that philosophers and all scientists will learn from this change which has occurred in quantum theory. We have learned that language is a dangerous instrument to use, and this fact will certainly have its repercussions in other fields, but this is a very long process which will last through many decades I should say. Even in the old times philosophers realized that language is limited; they have always been skeptical about the unlimited use of language. However, these doubts or difficulties have,*

*perhaps, been enhanced through the present developments in physics. I might mention that most biologists today still use the language and the way of thinking of classical mechanics; that is, they describe their molecules as if the parts of the molecules were just stones or something like that. They have not taken notice of the changes which have occurred in quantum theory. So far as they get along with it, there is nothing to say against it, but I feel that sooner or later, also in biology, one will come to realize that this simple use of pictures, models, and so on will not be quite correct.*¹⁵⁷

Heisenberg bezieht also auch in den letzten Jahren seines Schaffens die Position, dass die Alltagssprache, die - wie er sie nannte - gewöhnliche Sprache zur Beschreibung der Phänomene und Ergebnisse der Quantentheorie unzureichend ist (*...the most important step was to see that our language is not sufficient to describe the situation*). Gleichzeitig sich aber auch keine neue Sprache finden lässt, die diese Aufgabe erfüllen könnte. In seiner Biographie beschreibt er die Begebenheit, dass Felix Bloch Niels Bohr auf der bereits erwähnten Almhütte mit dem Wunsch nach einer neugewonnenen Sprache konfrontierte. Eine neugewonnene Sprache, die an die Stelle der gewöhnlichen Sprache treten soll, sobald man die Quantentheorie besser verstanden hat, um so durch den Verzicht auf die klassischen Begriffe besser über die atomaren Erscheinungen reden zu können. Niels Bohr antwortete wie folgt:

*Das ist gar nicht unser Problem! Naturwissenschaft besteht darin, dass man Phänomene beobachtet und das Ergebnis anderen mitteilt, damit sie es kontrollieren können. Erst wenn man sich darüber geeinigt hat, was objektiv geschehen ist oder immer wieder regelmäßig geschieht, hat man eine Grundlage für das Verständnis. Und dieser ganze Prozess des Beobachtens und Mitteilens geschieht faktisch in den Begriffen der klassischen Physik. [...] Es gehört zu den Grundvoraussetzungen unserer Wissenschaft, dass wir über unsere Messung in einer Sprache reden, die im wesentlichen die gleiche Struktur hat wie die, mit der wir über die Erfahrungen des täglichen Lebens sprechen. Wir haben gelernt, dass diese Sprache nur ein sehr unvollkommenes Instrument ist, um uns zurechtzufinden und zu verständigen. Aber dieses Instrument ist gleichwohl die Voraussetzung unserer Wissenschaft.*¹⁵⁸

Abermals findet dieser Umstand bei Heisenberg seine Begründung in der Begrenztheit des jeweiligen Anwendungsbereiches (*...we know that the words we use to describe the experiments have only a limited range of applicability*). Insbesondere übt er hier Kritik an Wittgensteins Position, jedem Wort eine exakte Bedeutung zuzuschreiben (*...he always thought that words have a well-defined meaning, but I think that is an illusion*). Diese Meinung vertrat er allgemein in Bezug auf die positivistische Sichtweise, wie aus folgender Passage eines Gesprächs mit Bohr ersichtlich ist:

*Ich hatte mich darüber geärgert, dass die Positivisten so tun, als habe jedes Wort eine ganz bestimmte Bedeutung, und als sei es unerlaubt, das Wort in einem anderen Sinne zu verwenden.*¹⁵⁹

¹⁵⁷ [<http://www.f davidpeat.com/interviews/heisenberg.htm>, Stand: 18.08.2009]

¹⁵⁸ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 180f

¹⁵⁹ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 186

Hier zeigt sich wunderschön die Feinsinnigkeit Heisenbergs, welche sich durch die straffen Sätze des Tractatus' begrenzt fühlte (*...the Tractatus, which I thought too narrow*). So war es ihm z.B. äußerst verständlich, dass jemand ein Zimmer, nachdem dieses von einer hoch verehrten Person betreten worden war, wesentlich heller empfinde. Wenngleich ein Photometer dabei keinen Helligkeitsunterschied feststellen würde, wäre es laut Heisenberg dennoch legitim, in diesem Fall eine andere Bedeutung des Begriffs *hell* zu verwenden, und nicht auf die physikalische Bedeutung zu insistieren.¹⁶⁰ Wie kostbar die Beziehung zwischen Heisenberg und Bohr für sie selbst aber vor allem für den Fortschritt der Physik war, erkennt man an der Antwort, mit der Bohr Heisenbergs Zweifel zersetze:

*Die Vertreter des Positivismus haben schon recht, wenn sie den Wert einer solchen Sprache sehr stark betonen und uns eindringlich vor der Gefahr warnen, dass die Sprache, wenn wir den Bereich des logisch scharfen Formulierens verlassen, inhaltlos werden kann. Aber sie haben dabei vielleicht übersehen, dass wir in der Naturwissenschaft diesem Ideal bestenfalls nahekommen, es aber sicher nicht erreichen können. [...] Man könnte natürlich sagen, dass die mathematischen Schemata, mit denen wir als theoretische Physiker die Natur abbilden, diesen Grad von logischer Sauberkeit und Strenge haben oder haben sollten. Aber die ganze Problematik taucht dann wieder auf an der Stelle, wo wir das mathematische Schema mit der Natur vergleichen. Denn irgendwo müssen wir von der mathematischen Sprache zur gewöhnlichen Sprache übergehen, wenn wir etwas über die Natur aussagen wollen. Und das letztere ist doch die Aufgabe der Naturwissenschaft.*¹⁶¹

In Bezug auf die Grenzen der Sprache geht Heisenberg in gewisser Weise mit Wittgenstein konform, wenngleich er die Grenze der Sprache ins Feld der Tätigkeit setzt, indem er sagt, dass man erst durch die Verwendung der Wörter ihre Begrenztheit erfährt (*By using these words, we learn their limitations*). Mit dieser Aussage berührt er sowohl den frühen, als auch den späten Wittgenstein, wobei ihm im Gegensatz zu Bertrand Russell der spätere mit Fortdauer seiner Tätigkeit eher zusagte (*This can be seen in Wittgenstein's later work. I always found it strange, when discussing such matters with Bertrand Russell, that he held the opposite view; he liked the early work of Wittgenstein and could do nothing whatsoever with the late work. On these matters we always disagreed, Russell and I*). Wittgensteins späteres Verständnis als Philosoph lässt sich nämlich anhand seiner *Philosophischen Untersuchungen* insofern deuten, dass er seine Rolle darin sieht, *der Fliege den Ausweg aus dem Fliegenglas zu zeigen* (§ 309). Damit meint er, dass Philosophen durch ihre Versuche, die Sprache etwas leisten zu lassen, was sie gar nicht leisten kann, sozusagen in eine Falle geraten, in der sie nun „herumsummen“. Schärfer formuliert und oft zitiert: *Die philosophischen Probleme entstehen, wenn die Sprache „feiert“* (§ 38).¹⁶²

¹⁶⁰ Vgl. Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 186f

¹⁶¹ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 187f

¹⁶² Vgl. Warburton, Nigel: Philosophie: Die Klassiker, Von Platon bis Wittgenstein, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 2000, S. 235

Die Quantentheorie gebietet es den Physiker/innen also, sich bis zu einem gewissen Grad über ihre Erkenntnisse mit Hilfe der gewöhnlichen Sprache auszutauschen, in Detailfragen sich allerdings ausschließlich auf die strenge Logik der mathematischen Beschreibung zu stützen (*it is better to use the words in their limited senses, and when we must go into the details, we just withdraw into the mathematical scheme*). Erneut steht man vor der - rein durch die Unterstützung der Sprache - unüberwindbaren Grenze der Anschaulichkeit der Quantentheorie, was zu einem radikalen Umdenken ermutigt. Beziehen sich doch alle getätigten Aussagen auf Wahrnehmungen, welchen eine objektive Grundlage zu Grunde liegt. Es muss also eine Regel dafür geben, inwiefern man die Wirklichkeit wahrnimmt, sofern man die Wahrnehmung objektivieren will, und dann in weiterer Folge womöglich in präzises sprachliches Korsett zwingen möchte. Rufen wir dazu die unbestrittene Größe in der uns Europäer beeinflussenden Philosophie, Immanuel Kant, auf den Plan.

5.2 Quantenmechanik und Kant'sche Philosophie

Immanuel Kant (1724 - 1804) erwarb sich zu Lebzeiten nicht nur als Philosoph seine Sporen, sondern - wie könnte es auch anders sein - auch als Naturwissenschaftler, als Astronom. So formulierte er eine erste schlüssige Theorie über die Entstehung unseres Sonnensystems und bedingt durch seine Forschungsergebnisse widmete er sich stark den weltanschaulichen Fragen seiner Zeit, wobei er sich vehement auf die Seite von Forschung und Wandel stellte.¹⁶³ Im Banne der französischen Aufklärer - deren Entschlossenheit, mit überholten Traditionen, Werten und Moralvorstellungen zu brechen einen großen Einfluss auf Kant ausübte - schrieb er im September 1784 in seinem Essay „Was ist Aufklärung?“:

*Aufklärung ist der Ausgang des Menschen aus seiner selbstverschuldeten Unmündigkeit. Unmündigkeit ist das Unvermögen, sich seines Verstandes ohne Leistung eines anderen zu bedienen. Selbstverschuldet ist diese Unmündigkeit, wenn die Ursache derselben nicht am Mangel des Verstandes sondern der Entschliebung und des Mutes liegt, sich seiner ohne Leitung eines anderen zu bedienen. Sapere aude! Habe Mut, dich deines eigenen Verstandes zu bedienen, ist also der Wahlspruch der Aufklärung.*¹⁶⁴

Doch inwiefern könnte Kants *Kritik der reinen Vernunft* den Weg zu einer exakten Wirklichkeitsbeschreibung ebnen? Beziehungsweise behindert vielleicht gerade seine Kritik eine solche? Nun, Kant vertritt die Ansicht, dass wir, sofern wir die Welt wahrnehmen, unserer gesamten Erfahrung bestimmte Eigenschaften auferlegen.

¹⁶³ Vgl. Ganten Detlev, Deichmann Thomas, Spahl Thilo: Naturwissenschaft, Alles was man wissen muss, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 2005, S. 14

¹⁶⁴ Kant, Immanuel: Was ist Aufklärung

Um überhaupt eine Erfahrung machen zu können, müssen wir die Welt so erfahren, dass sie Beziehungen von Ursache und Wirkung enthält, dass sie in der Zeit geordnet ist und dass die Gegenstände, die wir wahrnehmen, in räumlicher Beziehung zueinander stehen. Dabei werden die sich gegenseitig bedingenden Qualitäten *Ursache* und *Wirkung* sowie *Raum* und *Zeit*¹⁶⁵ vom wahrnehmenden Subjekt begetragen. Sie existieren nicht unabhängig von uns.¹⁶⁶

5.2.1 Analytisch - Empirisch - Synthetisch

In puncto Erkenntnis unterscheiden sich Kants Ansichten wesentlich von denen empirischer Philosophen seiner Zeit. David Hume¹⁶⁷ unterscheidet zwei Arten der Erkenntnis: Beziehungen von Ideen (Vorstellungen) und Tatsachen.¹⁶⁸ Diese Sichtweise lässt sich anhand zweier Beispiele schön veranschaulichen. Unter den Beziehungen von Ideen versteht Hume Erkenntnisse, die bereits aus der Definition ihrer selbst folgen. So ist z.B. der Satz „Alle Löwen sind Lebewesen“ für uns definitiv wahr, auch ohne jemals einen Kontakt oder eine Erfahrung mit einem Löwen gehabt zu haben (was für uns wohl auch gesünder ist). Würde jemand behaupten, einen Löwen entdeckt zu haben, der kein Lebewesen sei, wissen wir sofort, ohne seiner Entdeckung näher nachzugehen, dass er schlicht und ergreifend die Bedeutung „Löwe“ falsch verwendet. Das gegenteilige Beispiel wäre der Satz „Einige Klosterschwestern besitzen Briefmarkensammlungen“. Um dieser Behauptung einen wahren oder falschen Wert beizumessen, ist es unablässig Beobachtungen anzustellen. Unabhängig von diesen Beobachtungen kann man nicht wissen, ob der Satz wahr oder falsch ist. Hume fordert also, dass Aussagen entweder *analytisch* oder *empirisch* sind. Wenn sie keines von beiden sind, tragen sie auch nicht zur Erkenntnis bei.

Kant erweitert diese Vorstellung wie bereits angedeutet noch um eine weitere Facette, und führt noch die synthetische Aussage ein. Gemeinsam mit dem Begriffspaar *a priori* und *a posteriori* zur Bezeichnung von Erkenntnissen, deren Wahrheit wir entweder *unabhängig von Erfahrung* oder *durch Erfahrung* kennen, lässt sich abermals anhand von simplen Sätzen Kants Bild der Wirklichkeit nachzeichnen. In Bezug auf die obigen Beispiele, denen Hume nur zwei Möglichkeiten einräumt, lässt Kant drei Arten gelten:

- Analytische Sätze *a priori*
- Synthetische Sätze *a posteriori*
- Synthetische Sätze *a priori*

¹⁶⁵ In diesem Punkt muss Kants Ausführung durch die Entwicklung der modernen Physik in gewisser Weise ergänzt werden. Zur Zeit Kants war die Physik noch eine Einheit, genauso wurden Raum und Zeit noch distinkt voneinander betrachtet. So ist es zu verstehen, dass er Raum und Zeit als reine Formen der Anschauung voraussetzt, allerdings nicht notwendigerweise in der Euklidischen oder Newton'schen Form.

(Vgl. Pietschmann, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage, S. 29)

¹⁶⁶ Vgl. Warburton, Nigel: Philosophie: Die Klassiker, Von Platon bis Wittgenstein, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 2000, S. 125

¹⁶⁷ David Hume [hju:m] (1711 - 1776); schottischer Philosoph, Ökonom und Historiker.

¹⁶⁸ Vgl. Warburton, Nigel: Philosophie: Die Klassiker, Von Platon bis Wittgenstein, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 2000, S. 126

Urteile wie „Alle Löwen sind Lebewesen“ ordnet Kant den *analytischen Sätzen a priori* zu. Diese liefern kein neues Wissen über die Welt. Die Idee des Lebewesens ist quasi bereits in der Idee des Löwen enthalten. Eine empirische Grundlage benötigen hingegen alle *synthetischen Sätze a posteriori*, wie z.B. „Einige Klosterschwestern besitzen Briefmarkensammlungen“. Hier bedarf es der Beobachtung, um derartige Aussagen zu verifizieren beziehungsweise zu falsifizieren. Kants Hauptinteresse in der *Kritik der reinen Vernunft* sind aber die *synthetischen Sätze a priori*. Also Urteile, die notwendig wahr sind und deren Wahrheit man unabhängig von der Erfahrung wissen kann, gleichzeitig aber auch echte Erkenntnis von bestimmten Aspekten der Welt liefern. Als Beispiel führt Kant hauptsächlich die gesamte Mathematik an, z.B. die Gleichung $7 + 8 = 15$ aber auch Sätze wie „Jedes Ereignis muss eine Ursache haben“. Diese Aussagen sind notwendig wahr, dennoch teilen sie auch etwas über die Welt mit, wodurch sie nicht mehr als analytisch anzusehen sind. Ziel seiner *Kritik der reinen Vernunft* ist nun also die Klärung der Frage:

*Wie sind synthetische Urteile a priori möglich?*¹⁶⁹

Die Bedeutung dieser Frage unterstreicht er mit folgendem Hinweis:

*Wenn der Leser sich über Beschwerde und Mühe beklagt, die ich ihm durch die Auflösung dieser Aufgabe machen werde, so darf er nur den Versuch anstellen, sie auf leichtere Art selbst aufzulösen. [...] Alle Metaphysiker sind demnach von ihren Geschäften feierlich und gesetzmäßig solange suspendiert, bis sie die Frage: Wie sind synthetische Erkenntnisse a priori möglich? genugtuend werden beantwortet haben.*¹⁷⁰

Beinahe ist man also versucht, auf Wittgenstein zurückzugreifen, wenn er sagt, die richtige Methode der Philosophie wäre eigentlich die: Nichts zu sagen, als was sich sagen lässt, also Sätze der Naturwissenschaft (6.53). Dieser Thematik schreibt Kant die Überschrift „Der transzendentalen Hauptfrage Zweiter Teil. Wie ist reine Naturwissenschaft möglich?“ zu und beantwortet dies grob gefasst wie folgt:

*Natur ist das Dasein der Dinge, sofern es nach allgemeinen Gesetzen bestimmt ist. Sollte Natur das Dasein der Dinge an sich selbst bedeuten, so würden wir sie niemals, weder a priori noch a posteriori, erkennen können. Nicht a priori, denn wie wollen wir wissen, was den Dingen an sich selbst zukomme, da dieses niemals durch Zergliederung unserer Begriffe (analytische Sätze) geschehen kann, weil ich nicht wissen will, was in meinem Begriffe von einem Dinge enthalten sei, (denn das gehört zu seinem logischen Wesen) sondern was in der Wirklichkeit des Dinges zu diesem Begriff hinzukomme, und wodurch das Ding selbst in seinem Dasein außer meinem Begriffe bestimmt sei. [...] Nun lehrt mich die Erfahrung zwar, was da sei, und wie es sei, niemals aber, dass es notwendigerweise so und nicht anders sein müsse. Also kann sie die Natur der Dinge an sich selbst niemals lehren.*¹⁷¹

Dabei stellt sich natürlich die Frage, was das *Ding an sich* wirklich ist. Doch dass diese Frage zu stellen sinnlos ist, da das *Ding an sich* einem immer verborgen bleibt, da man nur seine Erscheinung kennt, erläutert Kant insofern:

¹⁶⁹ Kant, Immanuel: Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können, § 5

¹⁷⁰ Kant, Immanuel: Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können, § 5

¹⁷¹ Kant, Immanuel: Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können, § 14

Es sind uns Dinge als außer uns befindliche Gegenstände unserer Sinne gegeben, allein von dem, was sie an sich selbst sein mögen, wissen wir nichts, sondern kennen nur ihre Erscheinungen, d.i. die Vorstellungen, die sie in uns wirken, indem sie unsere Sinne affizieren.

Somit lässt sich ein erstes Häkchen auf der Erkenntnisliste setzen: sofern wir sprachlich etwas über die Quantentheorie, oder die Naturwissenschaft im Allgemeinen ausdrücken wollten, obliegt uns dies ausschließlich über die Erscheinungen der jeweiligen zu beschreibenden Dinge zu tun. Doch wie verträgt sich diese Einsicht mit der Rolle der Quantentheorie?

5.2.2 Die Grenzen des Kausalgesetzes

Heisenberg wurde in den frühen 1930er Jahren mit der Kant'schen Philosophie konfrontiert. So beschreibt er ein Zusammentreffen zwischen Carl Friedrich von Weizsäcker und ihm mit der jungen Philosophin Grete Hermann, welche in Göttingen Kant'sche Philosophie studiert hatte. Diese brachte v. Weizsäcker und Heisenberg ihre Überzeugung nahe, dass an dem Kant'schen Kausalgesetz auch durch die Quantentheorie nicht zu rütteln wäre, was diese aber nicht bereit waren, einfach so hinzunehmen. Über die Heftigkeit dieser Diskussion äußert sich Heisenberg sachlich emotional:

Mit diesem Grad von Strenge glaubte nun Grete Hermann nachweisen zu können, dass an dem Kausalgesetz - in der Form, die ihm Kant gegeben hat - nicht gerüttelt werden könne. Die neue Quantenmechanik aber stellte diese Form des Kausalgesetzes doch in gewisser Weise in Frage, und die junge Philosophin war entschlossen, diesen Kampf bis zum Ende auszufechten.¹⁷²

Grundstein der Diskussion lieferte folgende Erfahrung, die zur statistischen Deutung der Quantentheorie geführt hatte: Ein einzelnes Atom der Sorte Radium B sendet über kurz oder lang in irgendeine Richtung ein Elektron aus und geht dadurch in ein Radium C-Atom über. Im Mittel geschieht dies nach einer knappen halben Stunde, allerdings kann dieser Vorgang auch bereits nach Sekunden oder erst nach Tagen vonstatten gehen. Der Begriff „im Mittel“ erhält dabei erst seine Gültigkeit, wenn man es mit einer großen Anzahl von Radium B-Atomen zu tun hat. Aber für ein einzelnes Radium B-Atom lässt sich keine Ursache angeben, dass es gerade jetzt und nicht früher oder später zerfällt, dass es gerade in dieser Richtung und nicht in einer anderen das Elektron aussendet. Und genau darin offenbart sich bereits ein gewisses Versagen des Kausalgesetzes in der Quantentheorie. Spezieller Reibebaum der Kantianer ist aber der Umstand, dass man in der Physik davon überzeugt ist, dass es keine solche Ursache gibt.¹⁷³

Diesem Beispiel entgegnete nun die übermotivierte Philosophin:

In der Philosophie Kants ist das Kausalgesetz doch nicht eine empirische Behauptung, die durch die Erfahrung begründet oder auch widerlegt werden könnte, sondern es ist umgekehrt die Voraussetzung für alle Erfahrung, es gehört zu jenen Denkkategorien, die

¹⁷² Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 164

¹⁷³ Vgl. Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 165

Kant „a priori“ nennt. Die Sinneseindrücke, mit denen wir die Welt aufnehmen, wären ja nichts als ein subjektives Spiel von Empfindungen, denen kein Objekt entspräche, wenn es nicht eine Regel gäbe, nach der die Eindrücke aus einem vorhergehenden Vorgang folgen. Diese Regel, nämlich die eindeutige Verknüpfung von Ursache und Wirkung, muss also schon vorausgesetzt werden, wenn man die Wahrnehmungen objektivieren will, wenn man behaupten will, dass man etwas - ein Ding oder einen Vorgang - erfahren habe. Die Naturwissenschaft andererseits handelt von Erfahrungen, und zwar gerade von objektiven Erfahrungen; nur solche Erfahrungen, die auch von anderen kontrolliert werden können, die in diesem präzisen Sinne objektiv sind, können den Gegenstand der Naturwissenschaft bilden. Daraus folgt doch zwangsläufig, dass alle Naturwissenschaft das Kausalgesetz voraussetzen muss, dass es nur soweit Naturwissenschaft geben kann, wie es auch Kausalgesetz gibt.¹⁷⁴

Im Rahmen dieser Argumentation setzte Hermann ihren Hebel an der Überzeugung Heisenbergs an, dass es keine Ursache für die zufällige Aussendung des Elektrons gäbe. Ihre Kritik ist dabei auf dem ersten Blick auch durchaus einleuchtend. Wie kann man sich in der Physik anmaßen zu behaupten, es gäbe für ein bestimmtes Ereignis keine Ursache, bloß weil man noch keine derartige gefunden hat? Dieses Fehlen deutet doch vielmehr auf eine noch ungelöste Aufgabe der Physik hin, welche doch eher zu strebsamen Weitersuchen und nicht zum Negieren veranlassen sollte. Anscheinend ist die Kenntnis über das Radium B-Atom noch nicht vollständig. Diesen Vorwurf entkräftet Heisenberg rigoros:

Nein, wir halten diese Kenntnis für vollständig, denn aus anderen Experimenten, die wir auch mit diesem Radium B-Atom anstellen könnten, geht hervor, dass es keine weiteren Bestimmungsstücke dieses Atoms geben kann als jene, die wir schon kennen.¹⁷⁵

5.2.3 Das physikalische Ding an sich

Nachdem das oben geschilderte Gespräch bereits beinahe in einer Sackgasse verlaufen war, kalmierte v. Weizsäcker die Debatte grandios, und lenkte die Aufmerksamkeit auf die der Problemstellung zugrunde liegenden Thematik. Ihm zufolge kam der vorliegende Widerspruch dadurch zustande, dass man in dem, was man sagt, so tut, als ob man von einem Radium B-Atom „an sich“ sprechen könnte¹⁷⁶. Bereits Kant nannte das „Ding an sich“ ja einen problematischen Begriff, da man von ihm eben nichts aussagen kann. Gegeben sind einem ja ausschließlich die Objekte der Wahrnehmung. Nun hat man es aber mit einem Atom zu tun, welches nicht einmal Objekt der Wahrnehmung ist, sondern sich ausschließlich in gewissen Beobachtungssituationen bemerkbar macht, womit man streng genommen gar nicht mehr von einem *Ding an sich*, sondern besten Falls von einem „physikalischen Ding an sich“ sprechen kann.¹⁷⁷ Genauso wie Kant das *Objekt der Wahrnehmung* mit dem Modell eines *Ding an sich* verknüpft, kann man in der Behandlung des Atoms

¹⁷⁴ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 164f

¹⁷⁵ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 166

¹⁷⁶ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 167

¹⁷⁷ Vgl. Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 168

die Wahrnehmung nicht mehr mit dem Radium B-Atom verbinden, es gibt auch kein Radium B-Atom *an sich*. Man ist also gedrungen, in der Quantentheorie eine neue Art der Wahrnehmung einzuführen. Eine Wahrnehmung, welche sich in gewissen Grenzen objektivieren lässt. Da sich jede Wahrnehmung auf gewisse Beobachtungssituationen bezieht, muss für eine objektive Behandlung der Ergebnisse auch immer die jeweilige Situation angegeben werden. Schließt man aus den Ergebnissen eines Experiments, dass im Rahmen dieser Beobachtungssituation ein Radium B-Atom vorhanden sei, so ist die damit erworbene Kenntnis vollständig. Gleichzeitig ist sie dies aber für eine andere, die z.B. eine Aussage über die Aussendung eines Elektrons zulässt, nicht mehr. Eine vollständige Kenntnis für die eine Beobachtungssituation bedeutet für eine andere eine unvollständige Kenntnis.¹⁷⁸

Im Zuge dieser Erörterung betont v. Weizsäcker aber auch die Wichtigkeit der Kant'schen Ansichten:

[...] hat Kant in einer Weise vollständig recht: Die Experimente, die der Physiker anstellt, müssen zunächst immer in der Sprache der klassischen Physik beschrieben werden, da es anders gar nicht möglich wäre, dem anderen Physiker mitzuteilen, was gemessen worden ist. Und erst dadurch wird der andere in die Lage versetzt, die Ergebnisse zu kontrollieren. Das Kantsche „a priori“ wird also in der modernen Physik keineswegs beseitigt, aber es wird in einer gewissen Weise relativiert. Die Begriffe der klassischen Physik, das heißt auch die Begriffe „Raum“, „Zeit“, „Kausalität“, sind in dem Sinne a priori zur Relativitätstheorie und Quantentheorie, als sie bei der Beschreibung der Experimente verwendet werden müssen - oder sagen wir vorsichtiger, tatsächlich verwendet werden. Aber inhaltlich werden sie in diesen neuen Theorien doch modifiziert.¹⁷⁹

Die von Heisenberg mathematisch präzise formulierte Unbestimmtheit führt zur Erkenntnis, dass das Suchen nach weiteren Bestimmungsstücken des Atoms sinnlos ist, da im Rahmen dieser Suche keine neuen auffindbar sind. In der Quantentheorie erfährt diese Unbestimmtheit also eine Objektivierung. Ist in der klassischen Theorie eine Unbestimmtheit noch rein subjektive Unkenntnis, erhält sie so quasi eine physikalische Realität. Die mathematischen Symbole, mit denen Beobachtungssituationen beschrieben werden, *stellen dann eher das Mögliche als das Faktische dar*¹⁸⁰. Die objektive Sicht der Dinge besetzt dann die Position zwischen dem Möglichen und dem Faktischen, und lässt so ausschließlich Schlüsse über die Wahrscheinlichkeit eines zukünftigen Ereignisses zu. Somit rücken auch Aussagen über atomare Objekte in den Bereich der Unbestimmtheit. Auf die Frage, in welcher Form man demnach widerspruchsfrei über Atome sprechen kann, beziehungsweise was Atome eigentlich sind, gibt Heisenberg selbst folgende Antwort:

Dafür wird es kaum einen sprachlichen Ausdruck geben können, denn unsere Sprache hat sich an den täglichen Erfahrungen gebildet, und die Atome sind ja gerade nicht Gegenstände der täglichen Erfahrung. [...] Sie sind Bestandteile von Beobachtungssituationen,

¹⁷⁸ Vgl. Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 169

¹⁷⁹ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 169

¹⁸⁰ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 170

*Bestandteile, die für eine physikalische Analyse der Phänomene einen hohen Erklärungswert besitzen.*¹⁸¹

Und v. Weizsäcker ergänzt abschließend folgende Erklärung:

*Der Fortschritt der Wissenschaft vollzieht sich nicht nur dadurch, dass uns neue Tatsachen bekannt und verständlich werden, sondern auch dadurch, dass wir immer wieder neu lernen, was das Wort „Verstehen“ bedeuten kann.*¹⁸²

5.2.4 Die Kritik am „Ding an sich“

Die Frage nach dem „Ding an sich“ beeinflusste die Epoche des Deutschen Idealismus¹⁸³ wie keine andere. Den geschichtlichen Hintergrund bereiteten im weitesten Sinn Vorbereitung, Verlauf und die Folgen der Französischen Revolution. Nachdem sich zunächst die Ideen von Vernunft und Freiheit als Resultat der Aufklärung in der Revolution verwirklichten, stand auch eine Vielzahl der deutschen Gebildeten hinter den revolutionären Gedanken. Doch mit dem Umschlagen der Revolution in Terror, änderte sich die allgemeine Stimmung. *Dies hatte den Durchbruch des deutschen Selbstbewusstseins zur Folge, welches sich stark an der deutschen Kultur orientierte: Die Weimarer Klassik und die Romantik kleiden die Literatur in blühende Hüllen, durch die Bildungsreform unter Wilhelm von Humboldt und die Gründung der Berliner Universität (1810) setzte Preußen den entscheidenden Schritt auf dem Weg zu einem modernen Staat.*¹⁸⁴

Als Vorbereiter des deutschen Idealismus¹⁸⁵ zählt Immanuel Kant, der nach dem Antreten der von ihm lange angestrebten ordentlichen Professur an der Universität von Königsberg (1770) zunächst vollkommen als Autor verstummte. Dieses Verhalten rief allgemeines Bedauern hervor. In einem Brief schrieb der aus der Schweiz stammende Philosoph Johann Caspar Lavater 1774 an Kant: „Sind sie denn der Welt gestorben? Warum schreiben so viele, die nicht schreiben können, und sie nicht, die es so vortrefflich können? Warum schweigen Sie - bei dieser Zeit, dieser neuen Zeit - geben keinen Ton von sich? Schlafen? Kant - nein, ich will Sie nicht loben - aber sagen Sie mir doch, warum Sie schweigen? oder vielmehr: sagen Sie mir, dass sie reden wollen.“¹⁸⁵ Doch Kant schwieg beharrlich. Elf Jahre dauerte der Zustand an, in denen seine Arbeit ohne sichtbares Zeichen nach außen blieb. 1781 ist es dann schließlich so weit, und die „Kritik der reinen Vernunft“ erscheint in einer Originalfassung von 856 Seiten. Ihr folgen die „Kritik der praktischen Vernunft“ und die „Kritik der Urteilskraft“. Die „Kritik der reinen Vernunft“ gilt als *epochemachender Text der Neuzeit*¹⁸⁶.

¹⁸¹ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 171

¹⁸² Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 173

¹⁸³ Philosophische Strömung zwischen 1781 - 1831. Hauptvordenker waren Kant, Fichte, Schleiermacher, Hegel, Schelling.

¹⁸⁴ Vgl. Kunzmann Peter, Burkard Franz-Peter, Wiedmann Franz: dtv-Atlas Philosophie, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 12. Auflage 2005, S. 135

¹⁸⁵ Schulz, Uwe: Kant, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 1984, S. 88

¹⁸⁶ Vgl. Kunzmann Peter, Burkard Franz-Peter, Wiedmann Franz: dtv-Atlas Philosophie, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 12. Auflage 2005, S. 137

Vereinfacht stellt Kant seine Lehre 1783 in den „Prolegomena“¹⁸⁷ zu einer jeden künftigen Metaphysik“ dar. In ihr enthalten ist eine kritische Sichtung des menschlichen Erkenntnisvermögens, mit der bereits oben genannten Hauptfrage: „Wie sind synthetische Urteile a priori möglich?“ Wenngleich das erste Echo auf die Veröffentlichung der „Kritik der reinen Vernunft“ zunächst ausbleibt, wird Kants Hauptwerk ab seinem Erscheinen im gesamten deutschen Sprachraum kontrovers diskutiert. Vor allem das „Ding an sich“ steht seit seiner Einführung unter ständiger Betrachtung. Kant schrieb diesen Begriff allem Seienden zu, welches unabhängig von der Tatsache existiert, dass es durch ein Subjekt wahrgenommen wird. Konkret formuliert er seine Zugrundelegung des Begriffs in seinen Prolegomena:

*Ich dagegen sage: es sind uns Dinge als außer uns befindliche Gegenstände unserer Sinne gegeben, allein von dem, was sie an sich selbst sein mögen, wissen wir nichts, sondern kennen nur ihre Erscheinungen, d. i. die Vorstellungen, die sie in uns wirken, indem sie unsere Sinne affizieren. Demnach gestehe ich allerdings, dass es außer uns Körper gebe, d. i. Dinge, die, obzwar nach dem, was sie an sich selbst sein mögen, uns gänzlich unbekannt, wir durch die Vorstellungen kennen, welche ihr Einfluss auf unsre Sinnlichkeit uns verschafft, und denen wir die Benennung eines Körpers geben, welches Wort also bloß die Erscheinung jenes uns unbekannten, aber nichtsdestoweniger wirklichen Gegenstandes bedeutet. Kann man dieses wohl Idealismus nennen? Es ist ja gerade das Gegenteil davon.*¹⁸⁸

Johann Gottlieb Fichte (1762 - 1814) geht mit Kants Begriff des „Ding an sich“ nicht konform. Ihm zufolge erhebt eine rigorose und systematische Einteilung zwischen den „Dingen, wie sie sind“ und „wie die Dinge erscheinen“, den Zweifel zum Prinzip des Denkens, und ist dadurch Wegbereiter für den Skeptizismus. Zentraler Kern seiner Philosophie ist das „absolute Ich“. Fichte beginnt in seiner Grundlage der gesamten Wissenschaftslehre mit folgender Aussage, in der er das „Ich“ allerdings auf eine reine Tathandlung zurückführt:

*Das Ich setzt sich selbst, und es ist, vermöge dieses bloßen Setzens durch sich selbst; und umgekehrt: Das Ich ist, und es setzt sein Seyn, vermöge seines bloßen Seyns. – Es ist zugleich das Handelnde, und das Produkt der Handlung; das Thätige, und das, was durch die Thätigkeit hervorgebracht wird; Handlung, und That sind Eins und dasselbe; und daher ist das: Ich bin, Ausdruck einer Thathandlung*¹⁸⁹

Er versucht seine Unstimmigkeit zu überwinden, indem er Kants „Ding an sich“ zu einer Unterrolle des „absoluten Ichs“ degradiert. Dazu bemüht er sich um eine klare Trennung des „Nicht-Ich“ - der Gegenstand der Erkenntnis, der der Vernunft gegenübersteht - vom „absoluten Ich“, welches nur im Handeln des Menschen existiert. Mit dieser Positionierung unterschied er sich in weiterer Folge stark von Friedrich Wilhelm Joseph Schelling (1775 - 1854), der in seinen Anfängen stark von Fichte geleitet war. Jedoch bestritt er die von Fichte vertretene Ansicht, das „Ich“ nur als menschlich

¹⁸⁷ Prolegomenon: Substantiviertes Partizip Präsens Passiv (Neutrum) von prolechein „vorher sagen“, bedeutet wortwörtlich „vorher Gesagtes“. Allgemein: Vorwort, Einleitung, Vorbemerkung.

¹⁸⁸ Kant, Immanuel: Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können, § 13, Anmerkung II

¹⁸⁹ [\[http://www.zeno.org/Philosophie/M/Fichte,+Johann+Gottlieb/Grundlage+der+gesammten+Wissenschaftslehre/1.+Grund+s%C3%A4tze+der+gesammten+Wissenschaftslehre/%C2%A7+1.+Erster,+schlechthin+unbedingter+Grundsatz,](http://www.zeno.org/Philosophie/M/Fichte,+Johann+Gottlieb/Grundlage+der+gesammten+Wissenschaftslehre/1.+Grund+s%C3%A4tze+der+gesammten+Wissenschaftslehre/%C2%A7+1.+Erster,+schlechthin+unbedingter+Grundsatz) Stand: 18.02.2010]

anzuerkennen. Vielmehr schrieb Schelling dem „Ich“ einen allgemeinen, absoluten Charakter zu. Dabei unterschied er zwischen der *bewusstlos schöpferischen und der bewusst schöpferischen*¹⁹⁰ Produktion des Ichs. Die in der Natur bewusstlos schöpferische Produktion liefert die reale Naturwelt, die bewusst schöpferische Produktion hinwiederum die ideale Geisteswelt. Beides, das Reale wie das Ideale, haben aber denselben Ursprung, indem sie das „absolute Ich“ bilden. Schelling unterwarf sein philosophisches Schaffen regelmäßig Wendungen und Wandlungen, was ihm auch den Beinamen *Proteus*¹⁹¹ einbrachte. Nachdem er sich anfangs von Fichte hatte leiten lassen, befasste er sich danach verstärkt mit der Ausarbeitung seiner Naturphilosophie. Dabei stand für ihn die Frage nach der Einheit der Gegensätze im Vordergrund, welche ihn zur Konzeption einer Identitätsphilosophie führte. Daraufhin formulierte Wilhelm Friedrich Hegel (1770 - 1831) seine berühmte Kritik:

*Dies ein Wissen, dass im Absoluten alles gleich ist ... oder sein Absolutes für die Nacht auszugeben, worin, wie man zu sagen pflegt, alle Kühe schwarz sind, ist die Naivität der Leere an Erkenntnis.*¹⁹²

Hegel selbst sorgte für die Markierung des Höhe- und Schlusspunktes der Bewegung des deutschen Idealismus durch seinen „absoluten Idealismus“. Das Wissen des Geistes von sich selber bildet die Grundlage für die Hegel'sche Philosophie. Darin setzt auch seine Kritik an Kant an. Das „Ding an sich“ entspringt laut Hegel ja bereits einem Gedanken. Es ist also ein konstruiertes Gedankending, welches untrennbar mit dem Subjekt verbunden ist. Im Erkennen des Objekts durch das Subjekt, also durch die Formulierung einer Aussage über ein „Ding an sich“, liegt laut Hegel allerdings die Wahrheit der zwei „Momente“ (Subjekt und Objekt). In seinen Vorlesungen zur Geschichte der Philosophie macht er gerade dies Kant zum Vorwurf:

*Erkennen ist in der Tat ihre Einheit; aber bei der Erkenntnis hat Kant immer das erkennende Subjekt als einzelnes im Sinne. Das Erkennen selbst ist die Wahrheit beider Momente; das Erkannte ist nur die Erscheinung, Erkennen fällt wieder ins Subjekt. [...] Denn es enthält [bei Kant, Anm.] die Dinge nur in der Form der Gesetze des Anschauens und der Sinnlichkeit.*¹⁹³

Hegels Tod im Jahre 1831 markiert das Ende der Ideenkonstellation „deutscher Idealismus“, welche 1881 durch die Veröffentlichung Kants „Kritik der reinen Vernunft“ ihren Triumphzug durch die neuere Philosophie begonnen hatte. Zu dieser Zeit standen sich auf der philosophischen Bühne Dogmatiker und Skeptiker gegenüber. Für die einen besaß das Denken als Erkenntnisfunktion keinerlei Grenzen und somit Allgemeingültigkeit, für die anderen war das Denken wiederum unfähig, überhaupt einen Erkenntnisakt zu vollziehen. Kant genügte weder die Behauptung, dass Erkenntnis aus reiner Vernunft möglich sei, noch die Gegenbehauptung, dass sie es eben nicht sei. Ihm ging es

¹⁹⁰ Vgl. Kunzmann Peter, Burkard Franz-Peter, Wiedmann Franz: dtv-Atlas Philosophie, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 12. Auflage 2005, S. 135

¹⁹¹ Proteus, der „Alte vom Meer“, ist ein früher Meeresgott der griechischen Mythologie. In der Odyssee wird Proteus als ein weiser, alter und wandlungsfähiger Meeresgott dargestellt.

¹⁹² Kunzmann Peter, Burkard Franz-Peter, Wiedmann Franz: dtv-Atlas Philosophie, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 12. Auflage 2005, S. 135

¹⁹³ [<http://www.lrz-muenchen.de/~hgvm/Hegel-PhG.pdf>, Stand: 21.02.2010]

um die prinzipielle Möglichkeit, Wirksamkeit und Wirklichkeit der reinen Vernunft, wie er selbst formulierte:

Ich verstehe aber hierunter [Kritik der reinen Vernunft, Anm.] nicht eine Kritik der Bücher und Systeme, sondern die des Vernunftvermögens überhaupt, in Ansehung aller Erkenntnisse, zu denen sie, unabhängig von aller Erfahrung, streben mag, mithin die Entscheidung der Möglichkeit oder Unmöglichkeit einer Metaphysik überhaupt und die Bestimmung sowohl der Quellen, als des Umfanges und der Grenzen derselben, alles aber aus Prinzipien.¹⁹⁴

5.3 Naturphilosophisches Resümee

Die Quantentheorie zeigt der Menschheit ganz klar ihre Grenzen auf. Einerseits verlangt sie von der bewährten Aristotelischen Logik abzurücken, beziehungsweise diese um den Faktor einer bestimmten Möglichkeit zu erweitern, wodurch eine objektivierte Unbestimmtheit Einzug ins Land der ansonsten so präzise formulierten Naturwissenschaft hielt. Andererseits beginnt sie dadurch bereits vor den eigentlichen Phänomenen und Erkenntnissen ihrer Disziplin eine eigene Betrachtung zu verlangen. Eine Betrachtung hinsichtlich der verwendeten Begriffe, Definitionen und dadurch auch Schlüsse. In diesem Punkt begegnen sich Heisenbergs Unschärferelation, Wittgensteins sprachphilosophischer Grenzbegriff sowie Kants synthetische Urteile a priori. Die Unzufriedenheit, die die teilweise unbestimmten Aussagen der Quantentheorie mit sich bringen, vermag die Kombination aller drei Aussagen miteinander nur bedingt zu bewältigen. Wünscht man sich zur korrekten Beschreibung der atomaren Welt apodiktische, unumstößliche Aussagen, wie man sie aus der Beschreibung der klassischen Physik gewohnt ist, sind sie einem in diesem Fall nur in Kombination mit Wahrscheinlichkeitsaussagen gegeben.

Auf apodiktische Aussagen und Schlüsse über Ausgänge von einzelnen Ereignissen muss man in der Quantenphysik verzichten, allerdings verfügt man über deterministische Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses. Die prinzipielle Determiniertheit der klassischen statistischen Physik bleibt bestehen, allein in der Quantentheorie herrscht der bloße Zufall vor. Dessen Beschreibung durch Wahrscheinlichkeitsaussagen geht Hand in Hand mit der Hintanstellung des Leibniz'schen Satz vom zureichenden Grunde, demzufolge ja nichts ohne Ursache, beziehungsweise ohne einen bestimmten Grund geschieht. In weiterer Folge kann man sich zumindest auf die Konklusion einigen, im Rahmen der Unschärferelation Beobachtungen vorzunehmen, diese analytischen Aussagen sodann mit Hilfe der mathematischen Schemata zu beschreiben, die daraus gewonnen Erkenntnisse anderen Personen mittels der gewöhnlichen Sprache näher zu bringen, und ab einem gewissen Moment sich wieder auf die Interpretation der mathematischen Ergebnisse zu stützen. Da die verwendeten Bilder, mit denen man die Interpretationen beschreibt, ohnehin nur bedingt richtig sein können, gilt es bei jedem abzuwägen, inwiefern es der Vorstellung noch dienlich ist, beziehungsweise ob es bereits zu völlig falschen Aussagen verleitet. Bevor man dabei Gefahr läuft

¹⁹⁴ Schulz, Uwe: Kant, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 1984, S. 93f

der Resignation zu verfallen, kann es hilfreich sein, sich den begnadeten Georg Kreisler in Erinnerung zu rufen, der in seiner Autobiographie *Letzte Lieder* schreibt:

*Alle Erklärung muss fort, sagt Wittgenstein,
Wir sitzen unter den Linden, das genügt.
Wir versuchen, brav zu sein,
und niemand lügt.
Wir sitzen unter den Linden.
Mehr ist dazu nicht zu sagen.
Wie wir uns befinden,
darf man nicht fragen.
Wir fühlen uns einsam,
Wie die Taube am Dache.
Das fühlen wir gemeinsam,
Und das erleichtert die Sache.
Wir zählen von eins bis sieben
Und sagen kein einziges Wort.
Wittgenstein hat schon geschrieben:
Alle Erklärung muss fort.¹⁹⁵*

¹⁹⁵ Kreisler, Georg: *Letzte Lieder*, Autobiographie, Arche Literatur Verlag, Zürich, Hamburg, 2009, S. 24

6 DIDAKTIK DER MODERNEN PHYSIK

Jeder kann alles begreifen.
Es ist eine Frage der Zeit, der Erziehung.
Wir können den Leuten nicht sagen: Lesen sie einen Krimi, das ist einfacher.
[Pierre Boulez]

6.1 Moderne Physik in der Schule

Die naturwissenschaftlichen Fächer an sich haben aktuell einen sehr schweren Stand im österreichischen Bildungssystem. Lässt man nicht im Chemieunterricht etwas explodieren, oder im Physikunterricht etwas mit Hilfe von Hochspannung schmelzen, gelten diese Fächer als langweilig, schwierig und kaum lebensnah. Hinzu kommt eine breite Akzeptanz für mathematisches Unvermögen - es ist annähernd mondän zuzugeben, die Grundrechenarten nicht mehr „im Kopf“ zu beherrschen, von Kenntnissen der Integral- und Differentialrechnung ganz zu schweigen. Speziell die Physik gilt in den meisten Umfragen an Schulen als unbeliebtester Gegenstand.¹⁹⁶ Der Physikunterricht verliert so zusehends an Bedeutung und Attraktivität. Daraus resultiert der Kampf, Schüler/innen für die Physik zu begeistern.

Gründe für diese enorme Abneigung der Physik gegenüber mögen einerseits in einem schlechten Unterricht liegen. Einem Präsentieren von Ergebnissen, ohne einer hinreichenden Erklärung des Hintergrunds. Dadurch gipfelt der Unterrichtsertrag in einem breiten Auswendiglernen des Stoffes, jedoch kaum richtiges Verständnis mit sich bringt. Andererseits ist aber auch klar ersichtlich, dass die Inhalte der Physik sehr komplex und teilweise sehr abstrakt sind, wodurch das Verstehen nicht ohne einen beträchtlichen Arbeitsaufwand bewerkstelligt werden kann. Daher ist es gerade in der Schule von enormer Wichtigkeit, einerseits auf eine adäquate Behandlung der relevanten Inhalte zu achten, andererseits beim Prozess des Verstehens eine möglichst gute Unterstützung zu liefern. Diese erfolgt im besten Fall durch eine stimmige Sprache in den Schulbüchern, und vor allem durch eine passend

¹⁹⁶ Vgl. Pietschmann, Herbert: Geschichten zur Teilchenphysik, Physiker sind auch nur Menschen, Ibero Verlag, Wien, 2007, S. 7

gewählte Sprache im Unterricht. Genau in diesem Punkt steht das Kapitel der „modernen Physik“¹⁹⁷ einerseits wie ein leuchtender Rettungsanker, allzeit bereit, Schüler/innen über das Erklären der Vorgänge der realen Welt hinaus mit den „neuesten“ Erkenntnissen und Erklärungen für die Physik zu begeistern, andererseits vollgeladen mit paradoxen, abstrakten Erkenntnissen, die der Lehrperson ganz brutal die Grenzen der Sprache aufzeigen.

Auch in diesem Punkt gilt es zu entscheiden und abzuwägen. In der Relativitätstheorie kann man z.B. relativ widerspruchsfrei über den gekrümmten Raum sprechen. Es stehen einem Begriffe aus dem Alltag zur Verfügung, und sogar ähnliche Beispiele aus der realen Welt können herangezogen werden. Eine tatsächliche Raumkrümmung lässt sich „experimentell“ natürlich nicht im Klassenzimmer darstellen, man bedient sich daher eines Beispiels aus dem Alltag. So wird im Unterricht gern das Bild einer Kugel auf einem gespannten Tuch herangezogen, um so die Krümmung des Raumes durch eine Masse zu veranschaulichen. Dieses Beispiel hat aber nur bis zu einem gewissen Grad Wahrheitscharakter - das materielle Tuch könnte etwa vermitteln, dass der Raum selbst auch materiell sein könnte - weshalb es im Unterricht viel mehr nur dazu dient, den Schüler/innen eine Vorstellung zu liefern. Es ist sozusagen ein „Quasi-Beispiel“. Nicht ganz richtig, nicht ganz falsch, dient aber der richtigen Vorstellung, und alles was der richtigen Vorstellung dient, dient auch dem Verständnis. Dieser Methode muss man sich immer dann bedienen, wenn eine prinzipielle Anschaulichkeit nicht gegeben ist. Das Verhalten zweier Hohlzylinder verschiedener Masse auf einer schiefen Ebene lässt sich experimentell auf einfache Weise veranschaulichen. Man beobachtet das Experiment, zieht seine Schlüsse, und kann sich bereits eine eigene Theorie überlegen. Aber ohne Anschauung ist man auf Hilfe von außen angewiesen. Karl R. Popper erklärte in diesem Zusammenhang 1985 in Zürich im Rahmen eines Vortrags:

*Die Menschen sind fürchterlich suggestionsbedürftig!*¹⁹⁸

Im Speziellen spricht er dabei über wahrheitssuchende Menschen, Menschen die im Wissen die Wahrheit suchen. Dabei stellt er folgende Thesen auf:

(1) Das so genannte naturwissenschaftliche Wissen ist kein Wissen, denn es besteht nur aus Vermutungen oder Hypothesen - wenn auch zum Teil aus Hypothesen, die durch ein Kreuzfeuer von genialen Überprüfungen hindurchgegangen sind. In Kürze:

(2) Wir wissen nicht, sondern wir raten. Obwohl das naturwissenschaftliche Wissen kein Wissen ist, ist es das Beste, das wir auf diesem Gebiet haben. Ich nenne es Vermutungswissen - mehr oder weniger, um die Leute zu trösten, die sichereres Wissen wollen und glauben, es nicht entbehren zu können.

Das sind nämlich die gefährlich suggestionsbedürftigen Menschen, die Menschen, denen der Mut fehlt, ohne Sicherheit, ohne Gewissheit, ohne Autorität, ohne einen Führer zu leben. Man könnte vielleicht sagen: Es sind die Menschen, die im Kindesalter steckengeblieben sind. [...] denn Wissen - sicheres Wissen - ist ein leeres Wort. [...]

*(3) Wir können oft genug die Wahrheit sagen, die Wahrheit erreichen. Aber wir können nie Sicherheit erreichen. [...]*¹⁹⁹

¹⁹⁷ Im Rahmen dieser Arbeit konzentriert sich der Titel „moderne Physik“ auf die zwei großen Kapitel „Relativitätstheorie“ und „Quantentheorie“.

¹⁹⁸ Popper, Karl Raimund: Alle Menschen sind Philosophen. Piper Verlag, München, 4. Auflage, 2006, S. 188

Das oben angeführte Beispiel des gekrümmten Tuchs suggeriert also bloß eine Vorstellung des gekrümmten Raums. Hier gilt es nun abzuwägen, inwiefern die suggerierte Wahrheit auch tatsächlich sinnvoll ist. Um der von Popper erwähnten Diktion zu folgen, können wir nie absolute Sicherheit erreichen, und daher können sich akzeptierte Unstimmigkeiten im Sinne des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes summieren. Es beginnt mit einem schwachen Quasi-Beispiel und schaukelt sich auf, bis überhaupt nur mehr in schiefen Bildern gesprochen wird. In der Relativitätstheorie kommt man überraschenderweise noch recht passabel voran. Akzeptiert man die absolute Grenzgeschwindigkeit c , lassen sich Phänomene wie die Längenkontraktion und die Zeitdilatation elegant durch Alltagsbeispiele erklären. Das Zwillings-Paradoxon stellt unter diesen Voraussetzungen überhaupt ein Paradebeispiel der Anschaulichkeit dar. In der Quantentheorie findet man zwar ebenso anschauliche Beispiele, allen voran Schrödingers Katze, doch prinzipiell scheitert man bereits am Versuch einer exakten Beschreibung eines Atoms. Diese Erfahrung musste bereits Bohr machen, dessen Atommodell bestenfalls historische Bedeutung zukommen sollte. Besonders kritisch wird es aber bereits bei der Beschreibung eines simplen Teilchens, durch die Widersprüchlichkeit der experimentell nachgewiesenen Teilcheneigenschaften und Welleneigenschaften. Hier geben sich in der Literatur Materiewellen und Wahrscheinlichkeitswellen die Klinke in die Hand, und ursprünglich nur als Behelfshypothesen eingeführte Begriffe wie „Wellikel“ oder „Welle-Teilchen-Dualismus“ erfreuen sich nach wie vor einer breiten Akzeptanz, was nicht unbedingt zu einem leichteren Verständnis der an sich schon komplizierten Quantentheorie führt. Die Aufgabe der folgenden Kapitel ist daher die Suche nach Formulierungen, welche die Didaktik der modernen Physik im Rahmen ihrer Möglichkeiten widerspruchsfrei bereichern.

6.2 Lehrplananalyse

Betrachten wir zunächst den aktuellen Lehrplan. Inwiefern lassen sich darin Vorschläge für einen adäquaten modernen Physikunterricht finden? Im Zuge einer tiefgreifenden Reform der AHS-Oberstufe wurden vom österreichischen Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur am 8.7.2004 neue Lehrpläne kundgemacht, welche ab dem Schuljahr 2004/05 in Kraft traten, sodass mit dem Schuljahr 2007/08 die bisherigen Lehrpläne zur Gänze durch die neuen ersetzt wurden. Die neuen Lehrpläne gliedern sich nun in zwei Blöcke. Quasi als Brückenschlag finden sich - neben den jeweiligen fachspezifischen Inhalten - die aus den bisherigen Lehrplänen entnommenen Basisinformationen in einem **allgemeinen Teil**²⁰⁰, welcher sich in folgende drei Teile gliedert:

- Allgemeines Bildungsziel
- Allgemeine didaktische Grundsätze
- Schul- und Unterrichtsplanung

¹⁹⁹ Popper, Karl R.: Alle Menschen sind Philosophen. Piper Verlag, München, 4. Auflage, 2006, S. 189f (Zwecks verständlicherer Lesbarkeit wurde die Nummerierung verändert und der Arbeit angepasst.)

²⁰⁰ Vgl. [http://www.bmukk.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_ahs_oberstufe.xml], Stand: 07.09.2009]

Die darin vorgegebenen Ziele sollen vom Lehrpersonal im Sinne einer eigenständigen und eigenverantwortlichen Unterrichtsarbeit erreicht werden. Der Lehrplan, der von der höchsten staatlichen Instanz erstellt wird, verfügt im allgemeinen Fall über eine Weisungsgebundenheit, doch stellt er im eigentlichen Sinne lediglich Vorschläge für Unterrichtsinhalte dar. In Kapitel 2, den allgemeinen didaktischen Grundsätzen, befindet sich folgendes aufschlussreiches Unterkapitel:

7. Herstellen von Bezügen zur Lebenswelt

*Im Sinne des exemplarischen Lernens sind möglichst zeit- und lebensnahe Themen zu wählen, durch deren Bearbeitung Einsichten, Kenntnisse, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Methoden gewonnen werden, die eigenständig auf andere strukturverwandte Probleme und Aufgaben übertragen werden können. Die Materialien und Medien, die im Unterricht eingesetzt werden, haben möglichst aktuell und anschaulich zu sein, um die Schülerinnen und Schüler zu aktiver Mitarbeit anzuregen. [...] Den neuen Technologien kommt verstärkt Bedeutung zu. [...] Dabei sind in kommunikativen und kooperativen Arbeitsformen Informationsquellen zu erschließen und unterschiedliche Informationsformen zu bearbeiten, Inhalte zu systematisieren und zu strukturieren und Arbeitsergebnisse zusammenzustellen und multimedial zu präsentieren. Die Ergebnisse und deren Interpretation sind stets kritisch zu hinterfragen und Auswirkungen auf den Einzelnen und die Gesellschaft zu reflektieren. [...]*²⁰¹

Wendet man diese Vorgabe auf die Didaktik der modernen Physik an, erkennt man zunächst, dass die Quantentheorie - objektiv betrachtet - vollkommen den Vorgaben entspricht. Es handelt sich um eine relativ zeitnahe Theorie, deren Ursprünge noch im letzten Jahrhundert liegen. Die Frage nach der Lebensnähe erscheint in der Physik prinzipiell tautologisch, handelt die Physik doch ausschließlich von den unser Leben beeinflussenden Phänomenen. Die Diskussion, ob z.B. die Energieerhaltung lebensnäher als die Quantentheorie sei, erübrigt sich daher unter diesem Aspekt. Ein grundlegendes Verständnis beziehungsweise prinzipielles Akzeptieren der Quantentheorie vereinfacht das Erklären makroskopischer Vorgänge eklatant. Das Anwenden der Einsichten, Kenntnisse und Methoden der Quantentheorie auf strukturverwandte Probleme stellt demnach in weiterer Folge kein großes Problem dar. Und auch hier erkennt man die Weite des Feldes, welches es zu bestellen gilt, da die Quantentheorie selbst ja die Struktur vorgibt, und somit alle physikalischen Vorgänge bereits strukturverwandte Vorgänge sind.

Allerdings ist damit das Ende der Fahnenstange der didaktischen Grundsätze bereits erreicht. Die Forderungen nach möglichst aktuellen und anschaulichen Materialien und Medien lassen sich zwar bezüglich ihrer Aktualität erfüllen, bei der Anschaulichkeit muss man aber bereits Abstriche machen. Auch die kommunikativen und kooperativen Arbeitsformen als Informationsquellen sind in ihrer Anwendung auf die - stark von der allgemeinen Logik abweichende und von einer prinzipiellen Abstraktheit geprägte - Quantentheorie größtenteils eingeschränkt. Die allgemeinen didaktischen Grundsätze der österreichischen Lehrpläne lassen sich zwar in weiten Teilen einhalten, doch gerade bei einem so heiklen Thema wie der Quantentheorie ist man in puncto Mittelbarkeit größtenteils zum Scheitern verurteilt. In Anbetracht dessen, dass es sich aber nur um Empfehlungen des allgemeinen Teils der österreichischen Lehrpläne handelt, ist man gerne gewillt, darüber hinweg zu

²⁰¹ [http://www.bmukk.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_ahs_oberstufe.xml], Stand: 07.09.2009]

sehen. Unterziehen wir daher den aktuellen österreichischen Lehrplan für Physik, sowie den vorhergegangenen Lehrplan einer genaueren Analyse, um so etwaige konkrete Vorschläge zur prinzipiellen Didaktik der Quantentheorie herauszuarbeiten.

6.2.1 Der aktuelle Lehrplan 2004/05

Das wesentliche Merkmal des aktuellen Lehrplans der Oberstufe des Unterrichtsfaches Physik liegt in dessen Knappheit und Prägnanz. Insgesamt umfasst er vier Seiten, auf denen stichwortartig die wesentlichen Kapitel skizziert sind. Zur modernen Quantentheorie lassen sich folgende Abschnitte finden:

Die spezielle Methodik der Physik hat zu Konzepten geführt, von denen folgende besonders wichtig und schulstufenübergreifend zu behandeln sind: [...]

7. und 8. Klasse

Die Schülerinnen und Schüler sollen folgende physikalische Bildungsziele erreichen:

- *die bisher entwickelten methodischen und fachlichen Kompetenzen vertiefen und darüber hinaus Einblicke in die Theorieentwicklung und das Weltbild der modernen Physik gewinnen*
- *verstärkt Querverbindungen mit anderen Bereichen knüpfen können*
- *den Einfluss der aktuellen Physik auf Gesellschaft und Arbeitswelt verstehen*
- *Licht als Überträger von Energie begreifen und über den Mechanismus der Absorption und Emission die Grundzüge der modernen Atomphysik (Spektren, Energieniveaus, Modell der Atomhülle, Heisenberg'sche Unschärferelation, Beugung und Interferenz von Quanten, statistische Deutung) verstehen [...]*
- *Einsichten in kernphysikalische Grundlagen (Aufbau und Stabilität der Kerne, ionisierende Strahlung, Energiequelle der Sonne, medizinische und technische Anwendungen) gewinnen und die Problematik des Umgangs mit Quellen ionisierender Strahlung verstehen [...]*
- *Verständnis für Paradigmenwechsel an Beispielen aus der Quantenphysik oder des Problemkreises Ordnung und Chaos entwickeln und Bezüge zum aktuellen Stand der Wissenschaft / Forschung herstellen können [...]*
- *Verständnis für die schrittweise Verfeinerung des Teilchenkonzepts, ausgehend von antiken Vorstellungen bis zur Physik der Quarks und Leptonen, gewinnen und damit die Vorläufigkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse verstehen²⁰²*

Der aktuelle Lehrplan erteilt dank seiner vorsichtigen Formulierung dem Physikunterricht der Oberstufe quasi eine Generalvollmacht im Umgang mit der Quantentheorie. Begriffe wie „Grundzüge der modernen Atomphysik“ werden zwar durch explizite Beispiele belegt, doch diese lassen sich ebenfalls je nach Bedarf auslegen. So wird etwa auf das „Modell der Atomhülle“ in keiner Weise näher eingegangen, eine Definition in welchem Ausmaße „Einsichten gewonnen“ oder „Verständnis hergestellt“ werden soll, bleibt ebenso aus. Es wird nur eine gewisse Breite vorgegeben, die Tiefe obliegt aber der jeweiligen Eigenverantwortung der Lehrperson.

²⁰² [http://www.bmukk.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_ahs_oberstufe.xml, Stand: 07.09.2009]

6.2.2 Der vorhergegangene Lehrplan 1989 - 2004/05

Zieht man zum Vergleich den von 1989 bis 2004/2005 gültigen Lehrplan heran, erkennt man noch eine gewisse Rohheit in der Verwendung der heiklen Begriffe. So wird in dem mit 48 Seiten deutlich umfangreicheren Konvolut unverfroren zum Beispiel ausschließlich vom Wellenbild des Lichts gesprochen:

6. Klasse: Aufbau der Materie

Voraussetzungen: Chemische Elemente

Grundgedanke: Materie besteht aus Teilchen

Lernziele: Wissen, dass die Atome aus Kern und Hülle bestehen; Kenntnis der Bausteine der Materie und ihrer Größenordnungen.

Lerninhalte: Atom, Molekül, Nuklid, Proton, Neutron, Elektron, Mol, relative Atommasse, Massenzahl, Bedeutung der Ordnungszahl, Isotope; stabile und instabile Kerne.

[...]

7. Klasse: Emission und Absorption von Licht

Voraussetzungen: Einfaches Atommodell, Begriff der Frequenz

Grundgedanke: Licht entsteht in der Atomhülle.

Lernziele: Kenntnis der quantenhaften Emission und Absorption des Lichtes; Kenntnis des Zusammenhanges von Frequenz und Energieübergang in der Atomhülle.

Lerninhalte: Energieniveauschema (allenfalls Pauli-Verbot), Spektralserien ($E = h \cdot f$), Ionisationsenergie, kontinuierliches Spektrum und Linienspektrum.

[...]

7. Klasse: Die Ausbreitung des Lichtes

Voraussetzungen: Begriff der Wellen, Prinzip von Huygens, Dopplereffekt in der Akustik

Grundgedanke: Licht breitet sich als Welle aus.

Lernziele: Kennen einer Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit; Verstehen des Wellenbildes für das Licht; Kenntnis der Ausbreitungserscheinungen und ihrer Gesetze; Verstehen der Interferenz und der Beugungserscheinungen; Kenntnis mindestens eines Versuches zur Bestimmung der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes. Funktionsweise eines Lasers und einige Anwendungen des Laserlichtes kennen.

Lerninhalte: Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und in Materie; Reflexion, Brechung, Totalreflexion, Dispersion, Erzeugung von kohärentem Licht, Interferenz; Nachweis der Wellennatur durch einen Beugungsversuch; Prismen- und Gitterspektren; Polarisation des Lichtes; Dopplereffekt in der Optik; Laser.

[...]

8. Klasse: Welle - Teilchen

Voraussetzungen: Energie- und Impulserhaltungssatz, Ausbreitung und Beugung von Wellen, Begriff der Wahrscheinlichkeit

Grundgedanke: Weder Teilchen- noch Wellenmodell allein beschreiben die Erscheinungen der Mikrophysik richtig.

Lernziele: Den Welle-Teilchen-Aspekt bei Licht und Materie beschreiben können; die Konsequenzen der Unbestimmtheitsrelation an Beispielen verdeutlichen können; die Grundgedanken der Quantenmechanik anhand des Doppelspaltversuches erläutern können.

Lerninhalte: Photoeffekt; Energie und Impuls des Photons; Comptoneffekt; de Broglie - Wellenlänge und ihre experimentelle Bestätigung; Bornsche Deutung der Wellenfunktion; Doppelspaltversuch; Unbestimmtheitsrelation; Stabilität der Atome im Grundzustand; Quantenübergänge.

[...]

*8. Klasse: Atomkern und Kernenergie**Voraussetzungen: Kernbausteine, Periodensystem, Beugung.**Grundgedanke: Kernreaktionen können Energie freisetzen.**Lernziele: Die Erforschung der Materie durch Streuversuche an Beispielen aufzeigen können; den Aufbau von Atomen und Atomkernen beschreiben können; Wesen und Wirkungen der Radioaktivität kennen; Konsequenzen der Nutzung unterschiedlicher Formen von Primärenergie beurteilen können; am Beispiel der Elementarteilchenphysik einen Einblick in die Grundlagenforschung gewinnen und deren Notwendigkeit abschätzen lernen; um das Zerstörungspotential atomarer Waffen wissen.**Lerninhalte: Strukturaufklärung durch Streuversuche, Kernaufbau; Radioaktivität, Halbwertszeit, Radioisotope; Kernreaktionen, Massendefekt, Kernspaltung, Kernfusion, Kernreaktoren, Wiederaufarbeitung, Entsorgung; Strahlenschutz; Kernwaffen, Elementarteilchen.²⁰³*

Wenngleich der mittlerweile abgelöste Lehrplan durch seine Vielzahl an Details und vor allem seinen Umfang ein angenehm breites Bild des Physikunterrichts vorgibt, findet man bei heiklen Abschnitten der Quantentheorie ebenso unbefriedigende Vorschläge. Der „Welle-Teilchen-Aspekt“ soll zwar beschrieben werden können, davor wird aber im gleichen Atemzug mit dem „Wellenbild des Lichts“ der Grundgedanke genannt, dass sich „Licht als Welle ausbreitet“.

Im Vergleich der beiden aufeinanderfolgenden Lehrpläne kann man sehr schön den Fortschritt in der Physik beobachten. Wird im älteren Lehrplan noch großzügig auf die diversen Aspekte der Teilgebiete Wert gelegt, trägt man im aktuellen Lehrplan der naturwissenschaftlichen Entwicklung Rechnung, indem man ihn nicht nur im Umfang von 48 Seiten auf vier Seiten reduziert, sondern vor allem bei heiklen, noch nicht wissenschaftlich durchgehend fundierten Meinungen eine gewisse Vorsicht walten lässt. Unterrichtet man als Lehrperson nun rein nach dem aktuellen Lehrplan, kann man eingedenk dieser Freiheit an Vorgaben wenig „falsch“ machen. Der Lehrplan entbindet sich größtenteils einer Verantwortung in Bezug auf eine explizite Inhaltsvermittlung. Themenschwerpunkte, und spezielle Teilaspekte werden klar vorgegeben, die jeweilige Umsetzung obliegt aber ganz der Lehrperson. Somit haben wir zwar das Feld der zu behandelnden Kapitel der Quantentheorie eingegrenzt, auf der Suche nach treffsicheren Formulierungen leistet aber weder der aktuelle noch der vorhergegangene Lehrplan Hilfestellung. Begeben wir uns daher eine Stufe tiefer, um direkt an der Quelle approbierter Formulierungen zu suchen - in Schulbüchern.

6.3 Schulbuchanalyse

Wenngleich die modernen Medien wie Internet und Podcasts die guten ehrwürdigen Bücher deutlich in den Hintergrund drängen, sind Schulbücher nach wie vor stark in den Unterricht eingebunden. Zur Klärung der Frage, wie stark Schulbücher tatsächlich im österreichischen Schulsystem vertreten sind, geht man davon aus, dass *Mathematikbücher die stärkste Verbreitung haben und nimmt diese mit*

²⁰³ [http://www.bmukk.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_ahs_oberstufe_alt.xml, Stand: 07.09.2009]

100 % an. Relativ dazu wurden Physikbücher in der AHS-Oberstufe für das Schuljahr 1999/2000 im Schnitt zu 80 % für den Unterricht angefordert.²⁰⁴ Dieser Verbreitungsgrad lässt allerdings keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Verwendung der Schulbücher zu. Man kann sich aber prinzipiell die Frage stellen, welche Funktion Schulbücher erfüllen sollen?

Das Schulbuch hat im Wesentlichen eine Doppelrolle zu spielen, nämlich eine für die Lernende und eine zweite für die Lehrenden. Einerseits erfüllt es vor allem eine Informations-, Arbeits- und Übungsfunktion. Auf der anderen Seite bietet das Buch eine wichtige Arbeitserleichterung bei der Unterrichtsvorbereitung, weil es zumindest einen didaktischen Vorschlag in Übereinstimmung mit dem Lehrplan liefert. Für die große Mehrzahl aller Punkte, die Lehrer/innen bei der Unterrichtsvorbereitung bedenken müssen, hält ein Schulbuch im Wesentlichen Hilfen und Lösungsvorschläge bereit. Den Spagat, dieser Doppelrolle vollauf gerecht zu werden, vermag das Schulbuch allerdings nicht zu vollbringen. Durch einen bereits vorgegebenen methodischen Weg bleibt es vor allem Lehrer/innen einiges schuldig. Dennoch können Schulbücher eine große Hilfe leisten. Gilt doch als oberste Forderung, unabhängig von ihrer letztendlichen Verwendung, die behandelten Inhalte möglichst verständlich darzustellen. Eine derartige Darstellung lässt sich natürlich im konkreten Fall auch auf den jeweiligen Unterricht der Lehrperson ummünzen. Klare, widerspruchsfreie Formulierungen bereichern jeden Unterricht, unabhängig von der jeweiligen Verwendungsform des Schulbuches.

In weiterer Folge werden daher nun die Serien für die elfte und zwölfte Schulstufe der Schulbücher „Sextl et al.: Physik“, „Jaros et al.: Physik Compact“ und „Apolin: Big Bang“ einer Textanalyse unterzogen. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf die didaktische Herangehensweise an das Thema Quantentheorie gelegt. Ebenso auf die für das Grundverständnis relevanten Fragen „Was ist Licht?“ sowie „Durch welches adäquate Modell lässt sich ein Atom beschreiben?“.

6.3.1 Sextl et al.: Physik

Die Kurzbeschreibung des Schulbuches „Sextl“ auf der Homepage des österreichischen Bundesverlages lautet:

Sextl. Klassisch einfach – einfach klasse.

Professor Dr. Roman Ulrich Sextl besaß die Gabe, komplizierte physikalische Vorgänge verständlich darzustellen. Dies ist auch ein Markenzeichen des Lehrgangs. Durch Einbeziehung historischer und philosophischer Aspekte wird die Physik in einem größeren Zusammenhang dargestellt - dies fördert nicht nur die Motivation der Schüler/innen, sondern trägt auch zu einem tieferen Verständnis der Physik bei.²⁰⁵

Wenig verwunderlich, dass zu Beginn von „PHYSIK 7“ die Einführung in die Optik und in weiterer Folge in die Quantentheorie mit einem historischen Abriss beginnt:

²⁰⁴ Vgl. Apolin, Martin: Die Sprache in Physikschulbüchern unter besonderer Berücksichtigung von Texten zur speziellen Relativitätstheorie. Unveröffentlichte Dissertation, Wien 2002, S. 6

²⁰⁵ [<http://www.oebv.at/sixcms/list.php?page=titelfamilie&snv=5&ssnv=5&titelfamilie=Sextl+Physik>, Stand: 25.01.2010]

Optik

An der Entwicklung der Optik lässt sich gut das Schicksal physikalischer Theorien verfolgen. Sie entstehen, liegen miteinander im Wettstreit, werden widerlegt und modifiziert und gehen schließlich ganz überraschend in umfassenderen Konzepten auf. So führte im 17. Jahrhundert die Frage nach der Natur des Lichts zu einer der wichtigsten und fruchtbarsten Auseinandersetzungen der Physikgeschichte: Es ging dabei zunächst um die Erklärung von Phänomenen: Warum wird Licht im Wasser gebrochen und an glatten Flächen reflektiert? NEWTON behauptete, dass Lichtquellen Teilchen aussenden, sein Zeitgenosse HUYGENS dagegen, dass sich Licht wie eine Welle ausbreitet. Wenn nun Licht eine Welle sein soll: In welchem Medium breitet sie sich aus? Auch ALBERT EINSTEIN faszinierte die Frage nach der Natur des Lichts. Seine Überlegungen dazu führten zur Quantentheorie und zur speziellen Relativitätstheorie.²⁰⁶

Um sich der Frage, was Licht überhaupt sei, zu nähern, werden in weiterer Folge die Arbeiten Newtons den Arbeiten Huygens' gegenübergestellt:

Was ist Licht?

Die Newton'sche Teilchentheorie des Lichts

Das Reflexions- und Brechungsgesetz beschreiben zwar die Fortpflanzungsrichtung des reflektierten und des gebrochenen Strahls, sie geben aber keine Auskunft, warum das Licht an der Körperoberfläche gerade so reflektiert und gebrochen wird. Um die Wechselwirkung zwischen Materie und Licht besser verstehen zu können, müssen wir wissen, was Licht ist.

ISAAC NEWTON entwickelte im Zuge seiner Recherchen zu optischen Phänomenen um 1672 eine Theorie über die Natur des Lichts. Danach sendet seine Lichtquelle eine große Menge winziger Lichtteilchen aus, die mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig durch den Raum fliegen und beim Auftreffen auf die Netzhaut des Auges eine Helligkeitsempfindung hervorrufen. Fällt ein Strahl dieser Lichtteilchen auf die glatte Oberfläche eines durchsichtigen Körpers, so werden diese teils reflektiert, teils dringen sie in den Körper ein und pflanzen sich im Inneren des Körpers weiter fort. [...]

Das Lichtteilchen bewegt sich gerade so, wie es das Reflexionsgesetz vorschreibt.

Aber auch andere Erscheinungen werden durch das Newton'sche Lichtmodell richtig beschrieben. So ist die geradlinige Ausbreitung des Lichts im Vakuum eine Selbstverständlichkeit. Auch die Abnahme der Beleuchtungsstärke bei einer „punktförmigen“ Lichtquelle (Kerze) mit dem Quadrat der Entfernung lässt sich leicht erklären. Weil nämlich die Lichtteilchen nach allen Richtungen davonfliegen, durchsetzen sie im doppelten Abstand von der Quelle bereits die vierfache Fläche. Versteht man unter der Beleuchtungsstärke ein Maß für die Zahl der Teilchen, die pro Sekunde auf einen Quadratmeter einer Fläche auffallen, die senkrecht zur Strahlenrichtung steht, so muss die Beleuchtungsstärke bei Verdopplung des Abstandes auf ein Viertel abnehmen.

Ein Problem tritt aber bei der Brechung auf:

Auf jene Lichtteilchen, die in den Körper eindringen, wirken nach Newton anziehende Kräfte. Diese gehen von den Atomen des Körpers aus und besitzen eine kurze Reichweite. Tritt ein Lichtteilchen in den Körper über, so wird es an der Körperoberfläche von diesen Kräften erfasst und in den Körper hineingezogen. Dadurch steigt die senkrechte Geschwindigkeitskomponente an, während die parallele Geschwindigkeitskomponente unverändert bleibt. Befindet sich das Teilchen im Körper, so wirken die anziehenden Kräfte von allen Seiten ein und heben einander gegenseitig auf. Das Lichtteilchen bewegt sich daher im Körper unbeschleunigt weiter, und zwar mit einer größeren Geschwindigkeit als im Vakuum. Die Messung der Lichtgeschwindigkeit hat aber zum Ergebnis geführt, dass die Geschwindigkeit im Körper kleiner ist. Die Newton'sche Theorie bewährte sich also nicht.

²⁰⁶ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 5

Zudem nämlich vermochte sie nicht zu erklären, wieso selbst starke Lichtstrahlen einander ungestört durchdringen können. Sie konnte auch keinen plausiblen Grund angeben, weshalb das Licht an der Körperoberfläche zum Teil reflektiert wird und zum Teil eindringt, warum die Lichtteilchen also teilweise angezogen und teilweise abgestoßen werden.

Die Huygens'sche Wellentheorie des Lichts

HUYGENS nahm an, dass der gesamte Raum - auch das Vakuum und das Innere der Körper - von einem besonderen Stoff, dem Lichtäther, erfüllt sei. Jeder leuchtende Punkt einer Lichtquelle ruft im Lichtäther eine Kugelwelle hervor. Diese Kugelwellen breiten sich aus und überlagern sich ungestört. Fällt ein Lichtwellenzug auf die Netzhaut des Auges, so wird eine Helligkeitsempfindung hervorgerufen. Fällt ein Lichtwellenzug auf die Oberfläche eines durchsichtigen Körpers, so wird das Licht teils reflektiert, teils dringt es in den Körper ein und pflanzt sich im Inneren des Körpers weiter fort.

Mit Hilfe seiner Theorie der Elementarwellen vermochte Huygens ohne Schwierigkeiten das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz herzuleiten. Er musste nur annehmen, dass sich die Elementarwellen in Materie mit geringerer Geschwindigkeit ausbreiten als im Vakuum.

Die Messung der Lichtgeschwindigkeit in Materie gelang erst ca. 150 Jahre später durch Foucault. Es ergaben sich Werte, die erheblich kleiner waren als die Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Für die Beschreibung des Lichts schien Huygens Theorie daher erfolgreich zu sein. Das bedeutet: Das Licht hat Wellennatur.

Mit der Huygens'schen Theorie lässt sich auch leicht verstehen, wieso die Lichtstrahlen einander ohne geringste Behinderung durchdringen können. Es kommt hier ja einfach das Gesetz der ungestörten Überlagerung der Elementarwellen zum Ausdruck! Wie Huygens richtig bemerkt, haben wir es diesem Umstand zu verdanken, „dass mehrere Beobachter gleichzeitig durch ein und dieselbe Öffnung verschiedene Gegenstände sehen können und dass von zwei Personen jede zu gleicher Zeit die Augen des anderen sieht“. Der Huygens'schen Lichttheorie fällt es dagegen zunächst schwer, die geradlinige Ausbreitung des Lichts zu erklären.²⁰⁷

Nach dieser Gegenüberstellung wird von nun an ausschließlich die so genannte Wellennatur des Lichts näher beleuchtet. Auf die Photonen wird für weite Teile komplett verzichtet. Dies ist bereits an der Kapitelüberschrift zu erkennen, in der zum ersten Mal der Begriff „Lichtwelle“ eingeführt wird:

Die Lichtwelle

Beugung an einem Spalt

Die Huygens'sche Wellentheorie scheint mit der geradlinigen Ausbreitung des Lichts nicht vereinbar zu sein. Tritt nämlich beispielsweise eine Wasserwelle durch eine enge Öffnung hindurch, so breitet sich hinter der Öffnung eine Kreiswelle aus. Tritt dagegen ein Lichtbündel durch ein Schlüsselloch, so ist von einer allseitigen Ausbreitung des Lichts hinter dem Schlüsselloch nichts zu bemerken. Wie sind diese Befunde in Einklang zu bringen?

Die Experimente über die Beugung von Wasserwellen geben uns einen wichtigen Hinweis. Der tiefere Grund für die geradlinige Ausbreitung des Lichts könnte in der kleinen Wellenlänge liegen. Ist nämlich die Wellenlänge sehr viel kleiner als jene Größen, mit denen wir es üblicherweise im Alltag zu tun haben, dann sind die Beugungserscheinungen vernachlässigbar klein und die Wellen breiten sich geradlinig aus.²⁰⁸

Die „Lichtwelle“ schlägt sich dann auch konsequent in der Zusammenfassung nieder, um Begriffe wie Frequenz und Wellenlänge des Lichts zu verdeutlichen:

²⁰⁷ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 14f

²⁰⁸ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 26

*Die Beugung am Doppelspalt**[...] Wir fassen zusammen:**Weißes Licht setzt sich aus Wellen verschiedener Frequenzen zusammen.**Rotes Licht hat eine kleinere Frequenz als blaues Licht.**Im Vakuum ist die Lichtgeschwindigkeit von der Frequenz unabhängig.**In Materie laufen die Lichtwellen mit hoher Frequenz (blau) langsamer als die Lichtwellen mit niedriger Frequenz (rot).²⁰⁹**Die Erzeugung von polarisiertem Licht**[...] Wir werden zu dem Schluss geführt:**Linear polarisiertes Licht schwingt nur in einer Ebene.**Diese ist durch die Fortpflanzungsrichtung und die jeweilige Schwingungsrichtung gegeben.**Lichtwellen sind Transversalwellen.²¹⁰*

Erst nach der Darstellung der Wellenphänomene samt ihrer Beschreibungen, werden die Photonen in Erinnerung gerufen. Es folgt ein historischer Abriss zur Interpretation des Photoeffekts:

*Der Photoeffekt - Licht ist doch körnig**Kaum glauben wir zu verstehen, dass Licht eine Welle ist, müssen wir wieder umdenken. [...]**Mit der Wellentheorie des Lichts lässt sich der Photoeffekt nicht erklären. Diese sagt nämlich voraus: Solange Licht einfällt, nehmen die Elektronen der Metalloberfläche Energie aus der Strahlung auf, bis sie genügend Energie besitzen, um das Metall zu verlassen. Bei schwachem Licht sollte dieser Vorgang einige Zeit benötigen. Genaue Experimente zeigten jedoch, dass die ersten Elektronen sofort nach dem Einsetzen der Beleuchtung ausgelöst werden. Bei starkem Licht könnte man erwarten, dass die Elektronen auf höhere Geschwindigkeiten beschleunigt werden als bei schwachem Licht. Die Energie der ausgelösten Elektronen müsste daher mit der Intensität des Lichts zunehmen. Im Gegensatz dazu zeigten die Experimente, dass die kinetische Energie $mv^2/2$ der Elektronen unabhängig von der Intensität des Lichts ist, aber mit der Frequenz des einfallenden Lichts zunimmt, und dass unterhalb einer Grenzfrequenz keine Elektronen aus dem Metall austreten.**Die Deutung erfolgte 1905 durch ALBERT EINSTEIN. Indem er eine Idee von MAX PLANCK weiter führte, gelangte er zur Photonenhypothese:**Die Photonenhypothese**Licht der Frequenz f besteht aus Photonen (Lichtteilchen) der Energie*

$$E = h \cdot f \quad (h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js})$$

 *h heißt Planck'sches Wirkungsquantum**[...] In Einsteins Photonenhypothese zeigt sich schon eine Grundfrage der Quantenphysik, der Widerspruch zwischen Welle und Teilchen.²¹¹*

Diese Hypothese wird dann als Ausgangspunkt genommen, um auf das Verhalten von Elektronen am Doppelspalt überzuleiten. Allerdings wird nach wie vor am Wellenbild des Lichts festgehalten. Die Argumentation läuft dann in die Richtung, dass die Ergebnisse zwischen Photonen und Elektronen sozusagen gespiegelt werden. Die einen haben Wellencharakter und zeigen Teilcheneigenschaften, die anderen haben Teilchencharakter und zeigen Welleneigenschaften:

²⁰⁹ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 29

²¹⁰ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 32

²¹¹ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 38

Elektronen als Wellen

Wenn Licht nicht nur Welleneigenschaften, sondern auch Teilcheneigenschaften haben soll, warum soll dies nicht auch für Elektronen - in umgekehrter Weise - gelten? Im Jahr 1923 stellte der französische Physiker LOUIS DE BROGLIE (1892-1987) in seiner Doktorarbeit eine kühne Hypothese auf, für die er zunächst keine Beweise hatte: Materie, zB Elektronen, verhält sich unter gewissen Bedingungen wie eine Welle und zeigt Beugungserscheinungen. So unglaublich dies damals geklungen hat, Beugung und Interferenz von Elektronen, Atomen, ja sogar Molekülen wurde seither in entsprechenden Experimenten nachgewiesen. Die ersten Beugungsbilder wurden an Kristallen aufgenommen, sie entsprachen Beugungsbildern, die mit Röntgenlicht aufgenommen wurden. Damit war ein erster Schritt zur heute gültigen „Quantenmechanik“ gemacht. Diese wurde ab 1925 von WERNER HEISENBERG (1901-1976) und ERWIN SCHRÖDINGER (1887-1961) entwickelt. Der Begriff einer genau vorhersagbaren Bahn verliert für Elektronen (und für Photonen) seinen Sinn: Man kann nur die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der sich Elektronen in Raumbereichen nahe dem Atomkern befinden. (NIELS BOHR erkannte sofort die Bedeutung der neuen Quantenmechanik.)

Das Versagen des Bohr'schen Modells lässt sich in folgender Weise verstehen: Das Bohr'sche Modell fordert, dass die Elektronen auf Bahnen mit festen Radien um den Kern laufen. In der Quantenmechanik lassen sich für die Elektronen der Atomhülle nur mehr Raumbereiche angeben, in denen sie mit großer, bzw. mit geringer Wahrscheinlichkeit zu finden sind. Diese Bereiche sind Wolken ähnlich, sie haben keine scharfen Ränder. Hingegen nimmt die Gesamtenergie eines Atoms einen genau bestimmten Wert an.²¹²

Diese Raumbereiche werden noch weiter spezifiziert. Relativ abrupt wechselt die Thematik vom Wesen des Lichts und Elektronen zu einer akkuraten Beschreibung des Atoms. Zum ersten Mal taucht der Begriff der Aufenthaltswahrscheinlichkeit auf:

Quantisierung der Energie - stehende Wellen

[...] Eine „Bahn“ des Elektrons (engl. orbit) gibt es nicht, nur eine „Wolke der Aufenthaltswahrscheinlichkeit“, die als Orbital bezeichnet wird. [...]

Orbitale sind jene Wolken der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons in der Nähe des Atomkerns, bei denen das Atom einen festen Energiewert besitzt.²¹³

Zu Beginn von „PHYSIK 8“ wird der Aspekt der Wahrscheinlichkeit und dessen Auswirkungen auf die Ergebnisse der Quantentheorie und deren Deutung aufgegriffen. Es folgt die Einführung der Heisenberg'schen Unschärferelation:

Chaos - Zufall oder Gesetz?

[...] Die Newton'sche Mechanik folgt einem strikten Determinismus - aus der Kenntnis von Ort, Geschwindigkeit und Kräften lässt sich die Bahn eines einzelnen Massenpunkts genau, für Mehrteilchensysteme näherungsweise berechnen. Bei einem Gas können wegen der großen Anzahl von Teilchen deren Orte und Geschwindigkeiten aus praktischen Gründen nicht mehr erfasst werden. Daher kann man über die Bewegung der Moleküle eines Gases nur Wahrscheinlichkeitsaussagen treffen. Im Rahmen der Quantenphysik brachte die Unschärferelation jedoch eine prinzipielle Beschränkung: Ort und Geschwindigkeit von Molekülen sind nicht gleichzeitig beliebig genau messbar, Vorhersagen im molekularen Bereich können immer nur Wahrscheinlichkeitsaussagen sein. Die Erkenntnis, dass es auch

²¹² Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 40

²¹³ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 41f

im makroskopischen Bereich, im Anwendungsbereich der klassischen Physik, prinzipielle Schranken für die Berechenbarkeit gibt, setzte sich erst ab 1970 durch.²¹⁴

Knappe 40 Seiten später erfolgt eine historische Ausführung zur Entwicklung der Quantenphysik, in der an bereits ausgearbeitete Kapitel kurz erinnert wird. Die Lichtwelle feiert ihre Renaissance:

Quantenphysik

Bei der Aufklärung dessen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“, muss der Forscher wie ein Detektiv vorgehen. Vorgefasste Meinungen erweisen sich meist als falsch. [...]

Die Grundlagen zur Quantenphysik wurden im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts gelegt, als die Schrödingergleichung im Jahr 1926 zur Grundlage einer atomphysikalischen Mechanik (Wellen- oder Quantenmechanik) wurde. Die Ausarbeitung zu einem funktionsfähigen Rechenapparat für die Wechselwirkung von Licht mit Materie (Quantenelektrodynamik) erfolgte im zweiten Viertel. [...]

Die Ergebnisse aller Experimente stehen in bester Übereinstimmung mit den Vorhersagen der Quantenphysik, doch über die Deutung dessen, was sich „wirklich abgespielt“ hat, werden heftige Diskussionen ausgetragen. Es scheint, dass die Natur fantasievoller ist als unser an Alltagserscheinungen geschultes Vorstellungsvermögen. Verschärft wird die Situation dadurch, dass die mathematische Formulierung der Gesetze der Quantenphysik in sehr abstrakter Weise erfolgt; teilweise mussten die adäquaten mathematischen Begriffe und Methoden erst geschaffen werden. Durch den damit verbundenen Verlust an Anschaulichkeit kann die Quantenphysik nur in einem geringen Maß einfach dargestellt werden.

Um 1900 schien die Wellennatur des Lichtes durch zahlreiche Experimente bestätigt. Interferenz-Erscheinungen an Gittern erlauben die Bestimmung der Wellenlänge des Lichts. Wegen seiner Polarisierbarkeit wird Licht als Transversalwelle angesehen. Die experimentelle Bestätigung der Maxwellschen Theorie durch die Hertzschen Experimente legte nahe, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist. Für ebenso gesichert hielt man die Teilchennatur der Elektronen.²¹⁵

Analog zur Ausarbeitung in „PHYSIK 7“ folgt daraufhin im Anschluss an die Wellennatur des Lichts erneut die Erwähnung, dass Licht nichts anderes ist, als eine Menge Photonen:

Photonen

Wie in „Physik 7“ bereits dargestellt wurde, erkannte ALBERT EINSTEIN 1905 mittels des Planck'schen Strahlungsgesetzes eine Analogie zwischen Strahlung und einem idealen Gas aus materiellen Teilchen. Dies führte ihn zur Photonenhypothese:

Die Photonenhypothese

Licht der Frequenz f besteht aus Photonen (Lichtteilchen) der Energie

$$E = h \cdot f \quad (h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js})$$

h ist das Planck'sche Wirkungsquantum.

Röntgenspektrum

Sichtbares Licht ist nur ein kleiner Teil des elektromagnetischen Spektrums. Röntgenstrahlung entsteht beim Aufprall von Elektronen auf die Anode der Röntgenröhre. Sie wird in der Theorie der elektromagnetischen Wellen als Bremsstrahlung erklärt, die immer dann auftritt, wenn elektrische Ladungen beschleunigt (abgebremst) werden.

Vor allem die scharfe Grenze des kontinuierlichen Röntgenspektrums im kurzwelligen Bereich kann mit der Photonenhypothese erklärt werden. Die Erzeugung von Röntgenstrahlung ist

²¹⁴ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 8, öbvht 2007, S. 5

²¹⁵ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 8, öbvht 2007, S. 42

die Umkehrung des Photoeffekts. Beim Photoeffekt treffen Photonen auf ein Metall auf und lösen Elektronen aus. In der Röntgenröhre treffen Elektronen auf ein Metall und erzeugen Photonen. Nach dem Durchlaufen der Beschleunigungsspannung U in der Röhre haben die Elektronen die kinetische Energie eU , die beim Aufprall auf die Anode in die Energie hf der Photonen umgewandelt wird. Aus dem Energiesatz folgt

$$eU = hf,$$

falls beim Aufprall nur ein einziges Photon erzeugt wird. Bei gegebener Spannung U ist f daher die größtmögliche Frequenz.²¹⁶

Dass dennoch vehement am Begriff der Lichtwelle festgehalten wird, ist an folgender Zusammenfassung ersichtlich:

Der Impuls der Photonen

[...]

Photonen verhalten sich wie Teilchen ohne Ruhemasse.

Sie bewegen sich stets mit Lichtgeschwindigkeit.

Die Energie E und der Impuls p der Photonen hängen mit der Frequenz f und der Wellenlänge λ der Lichtwelle zusammen.

$$E = h \cdot f, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

Der Compton-Effekt

Bei der Untersuchung der Eigenschaften der Röntgenstrahlen entdeckte man einen merkwürdigen Effekt: Streut man Röntgenstrahlen an einem Körper, zB an einem Grafitblock, so verringert sich ihre Frequenz.

Mit der Wellentheorie des Lichtes lässt sich dieser Effekt nicht erklären. Sie sagt voraus, dass die Elektronen durch die einfallende Strahlung zu Schwingungen angeregt werden und dadurch Strahlung mit derselben Frequenz aussenden.

Erst im Jahre 1922 konnte der amerikanische Physiker ARTHUR HOLLY COMPTON (1892-1962) die Frequenzminderung deuten. Bei der Streuung stoßen die einfallenden Photonen mit nahezu freien Elektronen im Körper zusammen und geben beim Stoß einen Teil ihrer Energie $E = hf$ ab. Deshalb weisen die gestreuten Photonen eine verringerte Energie $E' = hf'$ auf, die mittels der Erhaltungssätze für Energie und Impuls berechnet werden kann. Dadurch wird die Vorhersage $p = h/\lambda$ für den Impuls des Photons bestätigt.

Diese und andere Bestätigungen der Photonenhypothese stellten der Wellentheorie des Lichtes eine Teilchentheorie des Lichtes gegenüber. Widersprechen einander die beiden Theorien oder ergänzen sie einander?²¹⁷

Zur Beantwortung dieser Frage wird auf angenehme Art und Weise weit ausgeholt. Mit Hilfe von drei möglichen naturwissenschaftlichen Erklärungsansätzen, wird die momentan vorherrschende Meinung herausgearbeitet, und somit der Kern der Quantenelektrodynamik offen gelegt:

Lichtteilchen und Lichtwellen

Wie kann Licht gleichzeitig Teilchen und Welle sein? Nach den Vorstellungen der klassischen Physik sind diese beiden Ansichten miteinander unvereinbar: Licht müsste Welle oder Teilchen sein. Im Laufe der Entwicklung der Physik hatte man lange um diese Unterscheidung gerungen, bis schließlich Interferenzerscheinungen den „Beweis“ für die Wellennatur des Lichtes zu liefern schienen. Ist dieser Beweis wirklich schlüssig?

Aus dem logischen Schluss „Wenn Licht eine Welle ist, dann gibt es Interferenz“ folgt nicht der Umkehrschluss. Die beobachtete Interferenz könnte auch andere Ursachen haben. Aus

²¹⁶ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 8, öbvht 2007, S. 43

²¹⁷ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 8, öbvht 2007, S. 44

den Experimenten können wir niemals eindeutig auf die Ursachen und die Grundbegriffe schließen, die wir zur Erklärung physikalischer Phänomene verwenden. Alle Interpretationen von Experimenten erfolgen im Rahmen von Hypothesen. Daher müssen immer wieder lange Zeit bewährte Vorstellungen revidiert werden. Neben der Relativitätstheorie veränderte die Quantenphysik unsere Vorstellungen über die Natur am Radikalsten.

Welche Beziehung haben Wellen- und Teilchentheorie des Lichtes zueinander? Anfangs schienen die beiden Theorien einfach nebeneinander zu stehen. [...]

In dieser Situation wurden verschiedene Ansichten entwickelt, beispielsweise:

Es gibt Widersprüche in der Natur. Die einander widersprechenden Wellen- und Teilcheneigenschaften sind Beispiele dafür.

Teilchen und Welle sind verschiedenen Modelle zur Beschreibung des Lichts. Je nach Experiment ist einmal das eine Modell und dann das andere zu bevorzugen. Zur Erklärung weiterer Experimente könnte es künftig notwendig werden, wiederum andere Modelle heranziehen.

Es gibt Theorien, die das Verhalten von Licht korrekt beschreibt, dh. es lassen sich aus ihr eindeutige, experimentell überprüfbare Vorhersagen über den Ausgang von Experimenten ableiten. Da wir jedoch unsere Begriffe mit Hilfe der Erfahrungen des Alltags bilden, in dem die besprochenen Phänomene nicht direkt wahrnehmbar sind, ist unsere Sprache zur Beschreibung der Erscheinungen im Mikrokosmos nur schlecht geeignet. Wir sind gezwungen, einander scheinbar widersprechende, in Wahrheit jedoch ergänzende Begriffe (wie Welle und Teilchen) für Teilaspekte einer Erscheinung zu verwenden. Die Ergänzung erfolgt keineswegs willkürlich, da die verschiedenen Aspekte des Mikrophänomens in einer physikalischen Theorie eine höhere Einheit bilden müssen.

[...] Heute erscheint nur mehr der Standpunkt c) physikalisch akzeptabel.

Die Begründung ist kurz folgende: Es scheint keinen Grund für einen so radikalen Schluss wie unter a) zu geben. Es liegt näher, Widersprüche in unseren Vorstellungen über die Natur zu suchen als in der Natur selbst. Standpunkt b) würde ein beziehungsloses Nebeneinander von Modellen bedeuten, die nicht durch eine übergeordnete Theorie zu einer Einheit verbunden wären. Die Überprüfbarkeit einer solchen „Theorie“ wäre gering, da bei jedem Konflikt mit dem Experiment weitere ad hoc-Modelle die Situation „retten“ könnten.

Die unter c) angesprochene übergeordnete Theorie ist die Quantenelektrodynamik. Ihre Entwicklung dauerte etwa 20 Jahre und führte 1948 zur ihrer endgültigen Form. [...]

Warum erscheint Licht im Alltag als Welle, wo bleibt der Teilchenaspekt? Betrachten wir dazu das Sonnenlicht. Das Intensitätsmaximum bei $\lambda = 500 \text{ nm}$ entspricht einer Photonenenergie von ca. 2,5 eV. Der Energiestrom der Sonne (1400 W/m^2) enthält daher bei einer mittleren Photonenenergie von 2,5 eV rund $N = 3,5 \times 10^{21}$ Teilchen / m^2 . Pro Quadratmeter und Sekunde treffen etwa $3,5 \times 10^{21}$ Photonen die Erde. Die Analogie zu einem Gas, bei dem die große Anzahl von Molekülen in einem Behälter (6×10^{23} pro Mol) das Prasseln der Moleküle gegen die Behälterwand als kontinuierlichen Druck erscheinen lässt, legt nahe:

Wegen der großen Anzahl der bei alltäglichen Erscheinungen auftretenden Photonen erscheint uns Licht als kontinuierliche Welle.

Wir werden also erwarten, dass die Teilchenaspekte von Licht besonders bei kleinen Photonenzahlen deutlich werden. Betrachten wir daher nochmals ein Experiment, das die Wellennatur des Lichtes zu „beweisen“ schien, die Beugung am Spalt. Bei kleiner Intensität des einfallenden Lichtes zeigt eine hinter dem Spalt angebrachte Fotoplatte nach längerer Belichtung ein Schwärzungsmuster aus hellen und dunklen Streifen. Belichten wir nur kurz, so sind die Streifen noch nicht ausgebildet, nur in einzelnen Körnern der Emulsion wurden Photonen absorbiert. Bei längerer Belichtung werden die Streifen immer deutlicher. Sie sind dort am stärksten, wo die interferierende Welle maximale Amplitude besitzt. Nach der Wellentheorie treten dort die größten Feldstärken der elektromagnetischen Welle auf. Offensichtlich treffen dort die meisten Photonen auf. Die absorbierte Lichtenergie ist nach

der Wellentheorie proportional zum Quadrat der Amplitude (Feldstärke) der Welle, nach der Teilchentheorie proportional zur Anzahl der Photonen. Wir schließen daraus:

Die Dichte der Photonen ist proportional zum Quadrat der Amplitude der Lichtwelle.

Über die genaue Lage der einzelnen Flecken können wir keine Voraussage treffen. Wiederholen wir das Experiment mehrmals, ergibt sich stets eine andere Verteilung der Schwärzungspunkte. Wir können daher nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen. MAX BORN gelangte 1927 zu folgender Deutung des Zusammenhanges zwischen Wellen- und Teilchenaspekt des Lichts:

Die Born'sche Deutung (I)

Das Quadrat der Amplitude einer Lichtwelle ist der Wahrscheinlichkeit proportional, Photonen in einem bestimmten Raumbereich anzutreffen.

In diesem Zusammenhang wird oft von Welle-Teilchen-Dualismus gesprochen. Dieser Begriff ist jedoch überholt, da er den Standpunkt „Licht ist einmal Welle, dann wieder Teilchen“ nahe legt. Photonen und - wie wir noch sehen werden - Elektronen, ja selbst Atome und Moleküle, sind weder Wellen noch klassische Teilchen, sondern stellen prinzipiell neuartige Objekte, so genannte Quantenobjekte dar.²¹⁸

Unter Zuhilfenahme des Begriffs „Quantenobjekt“ wird die endgültige Beantwortung der Frage nach der Natur des Lichts erneut verschoben. Mit Hilfe der Rückbesinnung auf die Wahrscheinlichkeit folgt die zweite „Born'sche Deutung“:

Materiewellen

[...]

Die Born'sche Deutung (II)

Das Verhalten der Elektronen wird durch eine Welle beschrieben. Die Wahrscheinlichkeit W des Auftreffens eines Elektrons an einer bestimmten Stelle des Schirmes wird durch das Quadrat der Amplitude dieser Welle bestimmt.

Sind Elektronen Wellen? Was wellt?

Die Amplitude der mit Teilchen verknüpften Welle wird üblicherweise mit dem griechischen Buchstaben Ψ (Psi) bezeichnet. Die Bezeichnung Materiewelle (Elektronenwelle, Neutronenwelle usw.) ist zwar gebräuchlich, führt jedoch zu Missverständnissen, da sie suggeriert, dass eine Wellenbewegung materieller Teilchen vorliegt. Die Wellenfunktion Ψ ist jedoch als Wahrscheinlichkeitswelle zu deuten, deren Quadrat Ψ^2 die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der zugehörigen „Teilchen“ bestimmt. Um zwischen klassischen Teilchen (zB Sandkörnern) und den durch eine Wellenfunktion bestimmten „Teilchen“ zu unterscheiden, wollen wir letztere als Quantenobjekte bezeichnen.²¹⁹

Schlussendlich wird die Lösung des Konflikts um die Quantentheorie durch eine Sexl-typische historische Versöhnung versucht:

Erkenntnisprobleme der Quantenphysik

„... ich kann davon ausgehen, dass niemand die Quantenmechanik versteht.“ schrieb der amerikanische Physiker RICHARD FEYNMAN, der für seinen Beitrag zur Quantenelektrodynamik den Nobelpreis erhielt. Er meinte damit, dass niemand weiß, warum sich Quantenobjekte so ungewohnt verhalten und warum die Rechenvorschriften der Quantenphysik bisher immer Ergebnisse in Übereinstimmung mit den Experimenten geliefert haben.

²¹⁸ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 8, öbvht 2007, S. 45f

²¹⁹ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 8, öbvht 2007, S. 48

Neben SCHRÖDINGERS Wellenmechanik gibt es noch andere mathematische Formulierungen der Quantenphysik, zB HEISENBERGS Matrizenmechanik. Sie liefert dieselben Ergebnisse. Dadurch sind die Phänomene der Mikrowelt in gewissen Grenzen berechenbar geworden. Die Grenzen werden durch die Unschärferelation und die Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion gezogen. [...]

Die Quantenphysik gibt auch heute noch Anlass zu Diskussionen über ihre Interpretation. Bohrs Standpunkt erscheint manchen Physikern zu extrem. Nicht die tatsächlich durchgeführte Messung, sondern auch eine prinzipiell durchführbare Messung bestimmt den Ausgang eines Experiments. Der Beobachter als Person plant Experimente, die Registrierung der Messdaten erfolgt automatisiert. Viele Physiker anerkennen daher die historische Rolle der Kopenhagener Deutung, sie nehmen aber einen realistischen Standpunkt ein (Quantenrealismus): Sie sind von der - von einem Beobachter unabhängigen - Realität der Quantenobjekte überzeugt, wissen aber, dass Quantenobjekte neben scharfen auch unscharfe Eigenschaften besitzen, für die nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich sind.²²⁰

6.3.2 Jaros et al.: Physik Compact

Der Österreichische Bundesverlag preist die „Physik compact“ Reihe wie folgt an:

Das bewährte Konzept!

Das bewährte Physik compact-Konzept: Eine knappe, aber übersichtliche Darstellung des Lehrstoffs mit zahlreichen ergänzenden Themenheften und Sonderthemen.²²¹

Dieser Beschreibung wird die Einführung in die Quantentheorie vollauf gerecht. Ausgehend von der Frage nach der Natur des Lichts erfolgt eine prägnante Beschreibung der historischen Entwicklung bis hin zum modernen Atommodell:

Die Dualität von Licht und Materie

*In der Physik hat sich bis zum Ende des 19. Jhdts. die Ansicht durchgesetzt, dass Licht eine Wellenerscheinung ist, und dass Materie aus Teilchen wie Atomen oder Molekülen besteht. Der Wellencharakter des Lichtes wurde besonders durch sogenannte **Beugungsversuche** gestützt. Bei diesen Versuchen tritt Licht durch Interferenz in Zonen auf, die nach den Gesetzen der geometrischen Optik dunkel bleiben müssten. Die Vorstellung vom körnigen Aufbau der Materie fand durch die großen Erfolge der statistischen Physik im Bereich der Wärmelehre eine großartige Bestätigung. Insgesamt war die sogenannte klassische Physik am Ende des 19. Jhdts. so weit fortgeschritten, dass manche Physiker sie schon für fast abgeschlossen hielten.*

*Am Beginn des 20. Jhdts. stellte sich jedoch heraus, dass Licht neben seiner Wellennatur auch Teilcheneigenschaften besitzt. Licht kann man nach **Albert Einstein** (1905) nicht nur als elektromagnetische Welle sondern auch als Strom von sogenannten Lichtteilchen (Photonen) auffassen. Die Energie und der Impuls dieser Photonen hängt dabei nur von der Frequenz bzw. der Wellenlänge des Lichtes sowie von einer Naturkonstanten, dem sogenannten **Planck'schem Wirkungsquantum**, ab. Dabei ist die Energie eines Photons direkt proportional zur Frequenz des Lichtes und der Impuls des Photons indirekt proportional zur Wellenlänge des Lichts.*

***Max Planck** hatte das Wirkungsquantum eingeführt ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$). Dies geschah im Rahmen einer mathematischen Hypothese zur Erklärung jener Strahlung, die alle Körper aufgrund ihrer Temperatur abgeben. Es zeigte sich, dass diese winzig kleine Größe nicht nur*

²²⁰ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 8, öbvht 2007, S. 53

²²¹ <http://www.oebv.at/sixcms/list.php?page=titelfamilie&snv=5&ssnv=5&titelfamilie=Physik+compact>, Stand: 25.01.2010]

innerhalb dieses einen mathematischen Modells Bedeutung hat, sondern in der Tat eine universelle Naturkonstante ist. Bei allen Vorgängen, bei deren Beschreibung der Wert von h nicht durch 0 ersetzt werden kann, gelten die Gesetze der klassischen Physik nicht und umgekehrt. Die Einführung des Plank'schen Wirkungsquantums im Jahr 1900 war die Geburtsstunde der Quantenmechanik. Mit ihr begann die moderne Physik, mit deren Hilfe man unter anderem die Eigenschaften der Atome entschlüsseln konnte.

Wegen der Doppelnatur des Lichtes als Welle und Teilchen spricht man auch von der **Dualität** des Lichtes. **Louis des Broglie** übertrug 1924 die Idee der Dualität auch auf Materieteilchen wie Elektronen. Er vermutete, dass Elektronen neben ihren bekannten Eigenschaften als Teilchen auch Eigenschaften von Wellen haben sollten. So sollten Elektronen interferieren können und ähnlich wie Licht gebeugt werden können. Die Beugung von Elektronenstrahlen konnte in der Folge tatsächlich experimentell gezeigt werden.

Diese Entwicklungen führten dazu, dass in der Beschreibung der Atome ganz neue Wege gegangen werden mussten. Es setzte sich die Ansicht von **Max Born** durch, dass lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich sind darüber, wo sich die Elektronen innerhalb von Atomen aufhalten. Zonen, in denen sich Elektronen besonders wahrscheinlich aufhalten, heißen **Orbitale**. Sie wurden durch eine Gleichung von **Erwin Schrödinger** 1926 berechenbar. Aufgrund von Erkenntnissen von **Werner Heisenberg** musste 1927 die Vorstellung aufgegeben werden, dass sich Elektronen auf bestimmten Bahnen um den Atomkern bewegen. Das Atom ist also kein winziges Planetensystem. Vielmehr besteht es aus einem Atomkern und Elektronen, die sich entsprechend der Größe ihrer Energie und ihres Drehimpulses mit berechenbarer Wahrscheinlichkeit in bestimmten Orbitalen aufhalten.²²²

Zur näheren Erklärung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit, sowohl in Bezug auf Photonen als auch Teilchen in Orbitalen, wird anhand der Ergebnisse des Doppelspaltversuches die Wahrscheinlichkeitsfunktion Ψ eingeführt und näher erläutert:

Doppelspaltversuch mit Elektronen

[...] zeigt sich eine **Wahrscheinlichkeitsverteilung**, die an die Intensitätsverteilung einer Welle erinnert. Man spricht von einer **Wahrscheinlichkeitswelle**.

Die Amplitude der Wahrscheinlichkeitswelle wird mit dem Formelbuchstaben Ψ bezeichnet. Ähnlich wie die Energie einer Schallwelle oder einer elektromagnetischen Welle proportional zum Quadrat ihrer Amplitude ist, ist die Wahrscheinlichkeit p , ein Teilchen an einem bestimmten Ort zu finden, mit dem Quadrat der Wahrscheinlichkeitswelle verknüpft. Allerdings ist zu beachten, dass der Wert von Ψ im Allgemeinen einer komplexen Zahl $a + bi$ entspricht und daher der Wert von Ψ^2 ebenfalls komplex sein kann, weil $(a + bi)^2 = a^2 - b^2 + 2abi$ gilt. Für jede Wahrscheinlichkeit muss aber ≥ 0 gelten. **Max Born** (Nobelpreis 1954) identifizierte daher mit der Wahrscheinlichkeit P , ein Teilchen an einem bestimmten Ort zu finden, den Betrag von Ψ^2 , der jedenfalls reell ist und nicht kleiner als 0 sein kann:

Aufenthaltswahrscheinlichkeit

$p = |\Psi^2| = |\Psi|^2$ p ...Wahrscheinlichkeit, Ψ ...Amplitude der Wahrscheinlichkeitswelle

$P = |\Psi|^2 dV$ drückt die Wahrscheinlichkeit aus, dass sich ein Teilchen im infinitesimalen Raumelement dV befindet.

Man bezeichnet p auch als **Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte**. Integriert man $|\Psi|^2$ über den gesamten Raum, so erhält man die Wahrscheinlichkeit 1 (**Normierung**):

$$\int |\Psi|^2 dV = 1^{223}$$

²²² Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 5

²²³ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 11

Danach werden die Begriffe Wahrscheinlichkeitswelle und Teilchen miteinander verknüpft. Den Spagat zwischen Kontinuierlichem und Diskretem sucht man mit Hilfe von „Materiewellen“ zu vollbringen:

Materiewellen

Welcher **Zusammenhang** besteht zwischen einem **Teilchen** und seiner **Wahrscheinlichkeitswelle**?

Licht weist neben Welleneigenschaften auch Teilcheneigenschaften auf. Licht mit der Wellenlänge λ verhält sich unter bestimmten Bedingungen wie ein Teilchenstrom, dessen Einzelteilchen (Photonen) einen Impuls $p = h/\lambda$ aufweisen.

Prinz **Louis de Broglie** (Nobelpreis 1929) hatte die Idee, diese eigenartige Natur des Lichts auch der Materie zuzuweisen. Er ordnete den Teilchen so genannte Materiewellen zu, deren Wellenlänge λ sich aus dem Impuls $p = m \cdot v$ der Teilchen berechnen lässt:

Materiewellen (de Broglie-Wellen)

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \quad \lambda \dots \text{de Broglie-Wellenlänge, } h \dots \text{Planck'sches Wirkungsquantum, } m \cdot v \dots \text{Impuls eines Teilchens}$$

Diese Materiewellen entsprechen nicht räumlich verteilter Materie, sondern den **Wahrscheinlichkeitswellen**, die im vorigen Abschnitt besprochen wurden. Die Auswirkungen derartiger Wellen wurden tatsächlich beobachtet, als man Elektronen an Kristallen streute.²²⁴

Damit ist die Beschreibung der Photonen vorerst abgehandelt. Die gewonnenen Erkenntnisse de Broglie's werden nun auf das Bohr'sche Atommodell angewendet. Dadurch erfolgt der Schritt über die Heisenberg'sche Unschärferelation hin zum modernen Atommodell:

Wahrscheinlichkeitswellen und Bohr'sches Atommodell

Die de Broglie-Wellen erlauben eine Deutung des Bohr'schen Atommodells, die einerseits die Strahlungsfreiheit der stabilen Bahnen erklärt und andererseits verstehen lässt, wie es beim Quantenübergang zu einer Lichtaussendung kommt.

Im Atommodell von de Broglie werden die Elektronen im Atom nicht als Teilchen auf einer Bahn aufgefasst, sondern es werden ihnen geschlossene stehende Materiewellen in der Umgebung des Kerns zugeordnet.

Dabei geht man von dem Gedanken aus, dass nur jene Wahrscheinlichkeitswellen Bestand haben, die nicht destruktiv interferieren. Dementsprechend sind nur solche Wellen möglich, für die gilt, dass der Umfang ein ganzzahliges Vielfaches von λ ist.

$$2 \cdot r \cdot \pi = n \cdot \lambda = n \cdot h / m_e \cdot v \quad r \dots \text{Bahnradius, } n \dots \text{Quantenzahl, } \lambda \dots \text{de Broglie-Wellenlänge, } h \dots \text{Planck'sches Wirkungsquantum, } m_e \dots \text{Elektronenmasse, } v \dots \text{Geschwindigkeit}$$

Folgt man diesem Bild von stehenden de Broglie-Wellen um den Kern, so erhält man eine stabile negative Ladungsverteilung um den Kern und es gibt demnach keinen Grund mehr, dass die Elektronen in der Hülle strahlen. Dabei weisen die verschiedenen Wahrscheinlichkeitswellen der Elektronen je nach ihrer Energie E_n verschiedene Frequenzen auf, wobei gilt

$$E_n = h \cdot f_n \quad E_n \dots \text{Energie im } n\text{-ten Quantenzustand, } h \dots \text{Planck'sches Wirkungsquantum, } f_n \dots \text{Frequenz der Materiewelle im } n\text{-ten Quantenzustand}$$

Die Emission und Absorption von Lichtquanten erklärt de Broglie so, dass es bei einem Quantensprung kurzfristig zu einer Überlagerung von Materiewellen mit unterschiedlicher

²²⁴ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 13

Frequenz kommt, wodurch eine Schwebung entsteht, die genau der Frequenz des emittierten oder absorbierten Lichts entspricht:

$$E_n - E_m = h \cdot (f_n - f_m)$$

$\Delta E = h \cdot f$ E_m, E_n ...Energiezustände, h ...Planck'sches Wirkungsquantum,

ΔE ...Energie des Photons, f ...Frequenz des Lichts = Schwebungsfrequenz der Materiewellen

Die Einführung der de Broglie-Wellen brachte einen großen Fortschritt innerhalb der Quantentheorie. Sie erschütterten den Bahnbegriff von Quantenobjekten (zB Elektronen).

Nach dem Modell von de Broglie gilt:

Die Elektronenhülle entspricht den stehenden Wahrscheinlichkeitswellen der Elektronen. Auf Elektronenbahnen wird verzichtet.

[...]

Heisenberg'sche Unschärferelation

Teilchen, die sich durch die **klassische Physik** beschreiben lassen, nennt man auch klassische Objekte. **Werner Heisenberg** (Nobelpreis 1932) fand heraus, dass bei **Quantenobjekten** (wie etwa Elektronen) die Situation ganz anders ist. Die Bahn eines Quantenobjektes kann **nicht beliebig genau festgestellt** werden, ja man kann eigentlich gar nicht mehr von einer Bahn eines Quantenobjektes sprechen, weil Impuls und Ort der Quantenobjekte nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmt werden können.²²⁵

Ergänzend folgt im Anschluss noch eine Bemerkung zur Deutung von Ψ . Dabei wird auch zum ersten Mal vom „Welle-Teilchen-Dualismus“ gesprochen:

Messgenauigkeit

Bemerkung: Seit der mathematischen Formulierung der Quantenmechanik durch **Schrödinger, Heisenberg, Dirac** uA tritt der Welle-Teilchen-Dualismus innerhalb des mathematischen Formalismus nicht mehr als Problem auf. Dieser Dualismus beinhaltet aber nach wie vor einen echten Widerspruch, wenn man auf Quantenobjekte Begriffe anwendet, die aus der Alltagswelt stammen. Neben dem Welle-Teilchen-Dualismus tritt eine weitere Interpretationsfrage immer mehr in den Vordergrund. Dabei geht es um die **Deutung der Wellenfunktion Ψ** . Es stimmen praktisch alle Physiker darin überein, dass und wie mit Hilfe der Wellenfunktion Wahrscheinlichkeiten berechnet werden können. Die Frage entzündet sich daran, ob den Quantenerscheinungen eine selbstständige Realität zukommt (**realistische Deutung**) oder ob die Festlegung eines Quantenprozesses erst durch eine Beobachtung oder einen gleichwertigen Vorgang erfolgt (**Kopenhagener Interpretation**).

Anhänger einer **realistischen Deutung (Einstein, Schrödinger)** haben mehrere trickreiche Gedankenexperimente ersonnen, um die **Kopenhagener Deutung (Heisenberg, Bohr)** zu erschüttern. Bemerkenswert ist, dass alle den Gedankenexperimenten nachempfundenen tatsächlich durchgeführten Experimente mit der Kopenhagener Deutung vereinbar sind. Eine endgültige Deutung der Wellenfunktion liegt bis heute nicht vor. Alle Forschungen auf diesem Gebiet zeigen aber:

In Bereichen, in denen h eine bestimmende Größe ist, versagen unsere Alltagsvorstellungen!²²⁶

Zu guter Letzt findet sich in den letzten Seiten des Buches der elften Schulstufe noch einmal der Hinweis, nicht von Wellenzügen des Lichts zu sprechen, sondern von Energiequanten auszugehen:

²²⁵ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 14f

²²⁶ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 16

Emission und Absorption

Der Übergang von einem Energieniveau zu einem niedrigeren dauert eine bestimmte Zeit. Diese Zeitdauer legt die Länge der erregten Welle fest. Man sagt auch, die Aussendung von Licht erfolgt in Wellenzügen. Experimente zeigen, dass die Energie nicht über einen unendlich langen Wellenzug verteilt, sondern „lokalisiert“ ist. Dies legt nahe, von Energiequanten (**Photonen**, photons, quanta of light) zu sprechen.²²⁷

Zu Beginn des Buches der zwölften Schulstufe wird diese Empfehlung durch die Darstellung des Photoeffekts gefestigt. Dennoch wird dessen Deutung abschließend als Welle-Teilchen-Dualismus klassifiziert:

Photoeffekt - Licht hat eine Doppelnatur (photoelectric effect)

Problem: Licht kann aus Metallplatten Elektronen herausschlagen. Die klassische Physik kann diese Erscheinung nicht in Übereinstimmung mit den Messungen erklären. Die erste Wechselwirkung zwischen Licht und Elektronen, die erforscht wurde, betrifft den „äußeren lichtelektrischen Effekt“, der 1888 von **Wilhelm Hallwachs** im Anschluss an Beobachtungen von **Heinrich Hertz** entdeckt wurde. [...]

Philipp Lenard (Nobelpreis 1905) und **Joseph John Thomson** (Nobelpreis 1906) konnten die austretenden Ladungen experimentell als Elektronen identifizieren.

Äußerer Photoeffekt

Bestrahlt man Metallplatten (zB Zink) mit UV-Licht, so werden aus dem Metall Elektronen herausgelöst.

[...] Die Versuche von Lenard haben ergeben:

Der Photostrom setzt erst ab einer vom Material der Photokathode abhängigen Mindestfrequenz des Lichts ein. Weist Licht diese Mindestfrequenz auf, so setzt die Entladung sofort ein.

Löst eine Strahlung einen Photostrom aus, dann wächst dieser mit der Intensität des Lichts. Licht unterhalb der Mindestfrequenz kann hingegen auch bei noch so hoher Intensität keinen Photostrom auslösen.

Die kinetische Energie der Photoelektronen wächst mit der Frequenz des Lichts. Sie ist unabhängig von der Intensität des Lichts.

Der äußere lichtelektrische Effekt ist vom Standpunkt der klassischen Wellentheorie der elektromagnetischen Strahlung schwer verständlich. Nach klassischer Auffassung müsste sich die Wellenenergie über alle Elektronen gleichmäßig verteilen. Demnach würden die Elektronen aus der Strahlung langsam solange Energie aufnehmen, bis diese ausreicht, dass die Elektronen das Metall verlassen können. Bei geringer Intensität erwartet man klassisch ein langsames Einsetzen des Photoeffekts.

Lösung: Interpretation des äußeren Photoeffekts durch Einstein: Licht fällt in Form von Lichtquanten auf das Metall auf. Jedem Lichtquant kommt eine von der Frequenz der Strahlung abhängige Energie zu. Zur Angabe dieser Energie verwendete Einstein einen Zusammenhang, den **Max Planck** im Jahr 1900 für Energiequanten angegeben hat:

Energie eines Lichtquants

Die Energie eines Lichtquants ist direkt proportional zur Frequenz des Lichts.

$$E = h \cdot f \text{ ...Energie eines Photons, } h \text{ ...Planck'sches Wirkungsquantum}$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}, f \text{ ...Frequenz des Lichts}$$

Wenn ein Lichtquant ein Elektron trifft, geht die Energie des Photons über in kinetische Energie des Elektrons. Sofern das Elektron das Metall verlässt, verringert sich die kinetische Energie um die Austrittsarbeit W_A des Elektrons aus dem Metall: Das ist jene Arbeit, die verrichtet werden muss, um ein Elektron aus dem Metall zu entfernen.

²²⁷ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 27

Für die maximale kinetische Energie von Photoelektronen ergibt sich wegen des Energieerhaltungssatzes nach Einstein:

$E_k = h \cdot f - W_A$ E_k ...kinetische Energie eines Photoelektrons, h ...Planck'sches Wirkungsquantum, f ...Frequenz der Strahlung, W_A ...materialabhängige Austrittsarbeit

Bemerkung: Beim äußeren Photoeffekt tritt uns eine Erscheinung gegenüber, die man **Welle-Teilchen-Dualismus** (wave-particle duality) nennt:

Welle-Teilchen-Dualismus

Lichtteilchen mit Energie E Lichtteilchen mit Frequenz f

$$E = h \cdot f$$

Licht vereint in sich Teilchen- und Wellenaspekte. Für unsere Vorstellung vom Licht ergeben sich aus dieser Doppelnatur Probleme, da wir uns eine kontinuierlich ausgedehnte elektromagnetische Welle nicht gleichzeitig als punktförmiges Photon vorstellen können.

Wir stehen hier vor der Situation, dass mit einer mathematisch eindeutigen Beschreibung widersprüchliche klassische Modellvorstellungen des Lichts einhergehen. Dieser Widerspruch wird in der **Quantenmechanik**, die von klassischen Vorstellungen abgeht, aufgehoben.²²⁸

Zusätzlich zum modernen Atommodell, welches bereits im Buch der elften Schulstufe behandelt wurde, findet man folgende Anmerkung zu den Kernmodellen. Dabei wird weniger auf die Lokalisierung einzelner Teilchen im Atom Wert gelegt, als auf die Frage, wie man überhaupt ein stabiles Modell beschreiben kann:

Kernmodelle

Es gibt noch kein Modell des Atomkerns, das alle Aspekte gut zu beschreiben vermag. Der Aufbau eines Atomkernes aus vielen Nukleonen kann jedoch annähernd durch folgende zwei Modelle, dem **Schalenmodell** und dem **Tröpfchenmodell**, beschrieben werden.

Im **Schalenmodell** gibt es analog zu den Energieschalen in der Elektronenhülle auch Energieschalen im Atomkern. Diese werden aber nicht von Elektronen sondern von Nukleonen besetzt.

Atome mit einer vollständig gefüllten Elektronenschale weisen eine besonders hohe Ionisationsenergie auf. Die Elektronenhüllen von Edelgasatomen sind deshalb stabiler gebunden als bei den anderen Elementen. Bei Atomkernen kann ähnliches beobachtet werden: Bei bestimmten Nukleonenzahlen treten besonders stabile Atomkerne auf. Dies ist bei 2, 8, 20, 28, 50, 82 und 126 Protonen bzw. Neutronen der Fall („magische Zahlen“).

Für die Nukleonen im Kern gilt das Pauli-Prinzip. Nach diesem kann kein Energiezustand von zwei Teilchen mit gleichen Eigenschaften (Art der Teilchen, Spin, ...) besetzt sein. Da die Protonen und Neutronen einen Spin aufweisen, kann jedes Energieniveau von zwei Protonen und zwei Neutronen besetzt sein.

Für die Besetzung der einzelnen Energieniveaus eines Atomkerns muss noch berücksichtigt werden, dass die Protonen der Coulomb-Abstoßung entsprechend weniger stabil gebunden sind als die Neutronen. Ihre Energieniveaus liegen daher insgesamt etwas höher als die Energieniveaus der Neutronen.

Die ungleiche Besetzung der Energieniveaus mit Protonen und Neutronen hat eine wichtige Konsequenz: Mittelschwere und schwere stabile Kerne werden aus mehr Neutronen als Protonen gebildet. [...]

Das **Tröpfchenmodell** beschreibt die Kräfte zwischen den Nukleonen analog zu den Kräften zwischen Flüssigkeitsteilchen in einem Flüssigkeitstropfen.

Im Tröpfchenmodell werden die Wechselwirkungen zwischen vielen Kernteilchen berücksichtigt. Teilchen an der Oberfläche tragen weniger zur Bindungsenergie bei, weil sie weniger Bindungsnachbarn haben.²²⁹

²²⁸ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 8, öbvht 2007, S. 10f

6.3.3 Apolin: Big Bang

Das jüngste Schulbuch (2007/08) aus dem Sortiment des Österreichischen Bundesverlages wird mit folgender Beschreibung beworben:

So wird Physik verständlich und interessant!

*Physik muss verständlich sein und Spaß machen! Dabei hilft die einfache und alltagsorientierte Sprache von Big Bang ebenso wie der Weg von den Fragen zu den Antworten, von den Grundlagen zu den Anwendungen, vom Einfachen zum Komplizierten. Klare Gliederung, Prägnanz und der Einbau anregender Zusätze steigern die Lernmotivation.*²³⁰

Auch hier handelt es sich um eine äußerst zutreffende Beschreibung. Die Einführung in die Quantentheorie beginnt mit einer kurzen Darstellung ihrer Phänomene. Dazu sind die drei diesbezüglich wohl gängigsten Zitate unterstützend angemerkt:

Welle und Teilchen

*Stell dir einmal vor, du könntest durch die Wand gehen oder mit einem Snowboard gleichzeitig links und rechts an einem Baum vorbeifahren. Klingt nach Sciencefiction?! In unserer alltäglichen Welt der großen Objekte ist das natürlich unmöglich. In der Welt des Allerkleinsten passieren solche Absurditäten aber pausenlos. Kleinste Objekte wie Atome oder deren Bestandteile nennt man Quanten, und die Physik, die sich mit ihnen beschäftigt, **Quantenmechanik**.*

*Die Effekte in der Welt der kleinsten Teilchen sind meist sehr absurd, und nicht einmal die allerschlauesten Physiker können sich diese **bildlich** vorstellen. Lassen wir dazu drei Physik-Nobelpreisträger zu Worte kommen. ALBERT EINSTEIN lehnte die Quantentheorie Zeit seines Lebens ab, weil er die Vorstellung nicht mochte, dass man im atomaren Bereich keine exakten, sondern nur mehr wahrscheinliche Aussagen treffen kann. Er soll deshalb gemeint haben „**Gott würfelt nicht**“ - und irrte sich damit gewaltig!*

*Auch MAX BORN hatte zunächst Probleme mit dem Akzeptieren der Quantenmechanik und schrieb einmal ironisch in einem Brief an Albert Einstein: „**Die Quanten sind doch eine hoffnungslose Schweinerei**.“*

*Und RICHARD FEYNMAN soll gar einmal gesagt haben: „**Ich gehe davon aus, dass niemand die Quantenmechanik versteht**.“ Mit „nicht verstehen“ meinte er, dass wir uns die Effekte der Quantenmechanik nicht bildlich vorstellen können und sie sich somit unserer Intuition entziehen, obwohl wir sie exakt berechnen können.*

*Was ist der Grund dafür? Mechanische oder thermische Effekte kannst du spüren, optische sehen, akustische hören. Wir haben aber keine „Quanten-Sinne“ entwickelt. Die Dinger sind einfach viel zu klein, als dass sie für unser Leben **direkt** von Bedeutung wären. Und weil wir sie nicht sinnlich erfassen können, fehlt uns auch die konkrete Vorstellung davon.*²³¹

Nach diesem Hinweis auf den fehlenden „Quanten-Sinn“ folgt eine gründliche Hinführung zur Quantentheorie. Beginnend mit der Optik des 17. Jahrhunderts inklusive des Disputs Newton - Huygens, weiterführend mit dem Doppelspaltexperiment Youngs, über Einstein, de Broglie und Feynman endet diese schließlich bei der Erläuterung der Wahrscheinlichkeitsfunktion Ψ :

²²⁹ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 8, öbvht 2007, S. 68f

²³⁰ [<http://www.oebv.at/sixcms/list.php?page=titelfamilie&snv=5&ssnv=5&titelfamilie=Big+Bang>, Stand: 25.01.2010]

²³¹ Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 4

Licht als Welle

[...] Die Lehre vom Licht, die **Optik**, gehört zu den ältesten Gebieten der Physik. [...] Aber was ist Licht? Was wird dabei ausgesendet? Im 17. Jahrhundert gab es zwei Ansichten. CHRISTIAN HUYGENS war der Ansicht, dass Licht eine Welle ist. Er vertrat also die **Wellentheorie**. ISAAC NEWTON war hingegen der Meinung, dass Licht ein Strom von Teilchen ist und vertrat somit die **Teilchentheorie**. Newtons Autorität war dermaßen groß, dass sich seine Ansicht durchsetzte.

Aber dann kam das Jahr **1801**, und THOMAS YOUNG stellte ein Experiment vor, mit dem er eindeutig zeigen konnte, dass Licht Welleneigenschaften besitzt. Das von ihm erfundene **Doppelspalt-Experiment** ist ein absoluter Klassiker und wird bis heute durchgeführt. [...]

Mit der Teilchentheorie konnte man den Ausgang des Doppelspalt-Experiments nicht erklären. [...] Im Rahmen der **Wellentheorie** ist die Erklärung mit Hilfe der destruktiven **Interferenz** aber kein Problem. Das Experiment von Young führte nach und nach zu einem Umdenken. Die Wellentheorie setzte sich schließlich durch und die Teilchentheorie wurde wieder verworfen.

Warum hat man erst so spät erkannt, dass Licht eine Welle ist? Vom Schall wusste man das schon wesentlich früher. Das liegt daran, dass die **Wellenlänge des Schalls rund eine Million Mal größer ist als die des Lichts**. Die typischen Lichtwelleneigenschaften spielen daher im Alltag keine so offensichtliche Rolle wie beim Schall. [...]

Und dann kam Einstein

[...] Die Frage nach dem Wesen des Lichts könnte man auch so stellen: **Ist Licht kontinuierlich** (hat es Welleneigenschaften) **oder „körnig“** (hat es Teilcheneigenschaften)? Beginnend mit Youngs Doppelspaltexperiment setzte sich im 19. Jahrhundert nach und nach wieder die erste Ansicht durch. Als dann auch noch um **1860** JAMES CLERK MAXWELL zeigen konnte, dass Licht zur Familie der elektro-magnetischen Wellen gehört, schien die Sache endgültig geritzt zu sein: Licht ist eine Welle!

Dann kam aber das Jahr **1905**. In diesem veröffentlichte ALBERT EINSTEIN neben seiner speziellen Relativitätstheorie auch eine Arbeit, in der er ein gewichtiges Argument für die **Teilchentheorie des Lichts** lieferte. Er war damit in der Lage, den seltsamen **Fotoeffekt** erklären zu können. [...]

Diese Entdeckung leitete eine Revolution in der Physik ein.

Fußballquanten

Es gab nun also Belege für die Wellen- als auch für die Teilchennatur des Lichts. Das war ein unglaublicher Schock, weil es das nach der damaligen Ansicht nicht geben konnte. Aber diese Doppelnatur zeigt sich nicht nur bei Photonen, sondern auch bei anderen kleinen Teilchen.

Es war nun also nachgewiesen, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften besitzt. Im Jahr **1924** stellte der französische Physiker LOUIS DE BROGLIE (sprich „de Broi“) eine gewagte Hypothese auf. Warum sollte diese Doppelnatur nur für Photonen und nicht auch für andere Quanten gelten? Wieso sollten zum Beispiel Elektronen neben ihren Teilcheneigenschaften nicht auch Welleneigenschaften aufweisen, quasi auch eine **Materiewelle** sein? De Broglie stellte einen Zusammenhang zwischen Teilchen-Impuls und Wellenlänge her.

Formel: Materiewellenlänge (de Broglie-Wellenlänge)

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

λ ...Wellenlänge der Materiewellen [m]

p ...Impuls [kgms⁻¹]

m ...Masse [kg]

v ...Geschwindigkeit des Teilchens

h ...Planck'sches Wirkungsquantum [Js]

[...] Die de Broglie-Gleichung erlaubt es im Prinzip, **jedem** Objekt eine Wellenlänge zuzuordnen. Da mit zunehmender Masse die Wellenlänge sinkt, schieben sich die Interferenzstreifen zusammen. Deshalb wird es immer schwieriger diese nachzuweisen, je

größer die Objekte werden. Wo liegt die Grenze für die Beobachtung von **Quanteninterferenzen**? ANTON ZEILINGER, österreichischer Physiker von Weltformat, meint dazu: „Die Beantwortung dieser Frage wird wohl eher dem Erfindungsreichtum des Experimentators überlassen sein als prinzipiellen theoretischen Überlegungen“. Für makroskopische Objekte wird es allerdings wohl niemals möglich sein, weil deren Wellenlänge so absurd winzig ist. [...]

Es wird gewürfelt

RICHARD FEYNMAN hat das Doppelspalt-Experiment einmal als das „Herz der Quantenmechanik“ bezeichnet. Anhand dieses Experiments wird tatsächlich jene Paradoxie sehr klar, die ALBERT EINSTEIN immer ein Gräuel war.

Was passiert, wenn man Quanten **nacheinander** durch einen Doppelspalt schießt? [...] Die ersten treffen scheinbar völlig zufällig auf den Schirm. Nachdem jedoch viele Tausende durch den Doppelspalt geflogen sind, erscheint wieder das typische Streifenmuster! Das funktioniert im Übrigen mit allen Quanten, also auch Photonen oder Fußballmolekülen.

Dieses Ergebnis ist verblüffend und sehr absurd! Es sieht nämlich so aus, als würde jedes Teilchen durch **beide Spalte** fliegen und quasi mit sich selbst in Interferenz kommen. Sonst dürfte man ja nur zwei Streifen sehen. Hier stoßen wir an die im Prolog angesprochene Grenze des menschlichen Verstandes. Man kann dieses Phänomen zwar berechnen, aber niemand kann es sich bildlich vorstellen.

Die heute gängige Interpretation dieses Phänomens ist die, dass der Aufprallpunkt eines Teilchens durch eine **Wahrscheinlichkeitswelle** bestimmt wird, die tatsächlich durch **beide Spalte** geht. [...] Die Interferenzen dieser Wahrscheinlichkeitswelle sind dann gewissermaßen „Wahrscheinlichkeitsstreifen“. An Orten mit konstruktiver Interferenz ist das Auftreffen des Teilchens wahrscheinlicher als an Orten mit destruktiver Interferenz. Es ist aber **unmöglich vorherzusagen**, wo ein bestimmtes Teilchen tatsächlich aufprallen wird. [...]

Es ist ähnlich wie beim Würfeln. [...] **Es ist prinzipiell unmöglich, aus einer Wahrscheinlichkeitsangabe auf ein Einzelergebnis zu schließen**, egal ob es sich nun um den Aufprallpunkt eines Quants handelt oder um die Augenzahl beim nächsten Wurf. [...] Nach dem, was wir heute wissen, muss man aber sagen: **Im Quantenbereich wird ausschließlich gewürfelt!**

Kleine Quantenmechanik

In der klassischen Physik gibt es zwei erfolgreiche Konzepte: **Teilchen- und Wellenmodell**. Bei Teilchen gibt man die Energie (E) und Impuls (p) an, bei Wellen Wellenlänge (λ) und Frequenz (f). In der Quantenwelt, der Welt der Doppelnatur, werden diese beiden Konzepte verknüpft. Zwei Gleichungen kennst du schon: die für die **Photonen-Energie** $E = h \cdot f$ und die **de Broglie-Wellenlänge** $\lambda = h / p$.

Ein weiteres wichtiges mathematisches Werkzeug in der Quantenmechanik ist die **Wellenfunktion**, mit der man die Wahrscheinlichkeitswelle beschreibt. Sie wird mit ψ bezeichnet, das ist ein griechisches Psi. Wenn man zum Beispiel die Wellenfunktion eines Quants kennt, dann kann man berechnen, wie es sich hinter einem Doppelspalt verhält.

ψ kann ein sehr komplizierter Ausdruck sein, und wir werden ihn daher bei ~~deutlichen~~ Überlegungen nur grafisch darstellen. Das Quadrat des Betrages dieser Funktion, also $|\psi|^2$, nennt man die **Wahrscheinlichkeitsdichte**. Auch hier zeigt sich wiederum eine Verbindung zwischen Welle und Teilchen. Vereinfacht kann man sagen: Die Wahrscheinlichkeit (P), das Teilchen in einem kleinen Volumen (V) der Wahrscheinlichkeitswelle nachzuweisen, ist proportional zu $|\psi|^2$ an dieser Stelle.

Energie - Frequenz

$$E = h \cdot f$$

Impuls - Wellenlänge

$$p = h / \lambda$$

Aufenthaltswahrscheinlichkeit - Wellenfunktion

$$P = |\psi|^2 \Delta V$$

[Jene drei Formeln, die den Zusammenhang zwischen dem Teilchen- und Wellenmodell herstellen. Auf der linken Seite der Gleichung steht immer die Teilcheneigenschaft. Verwechsle nicht den Impuls klein p mit der Wahrscheinlichkeit groß P !]²³²

Auf diesen Ausführungen fußend erfolgt die Erläuterung des modernen Atommodells. Auch dabei wird der Stil beibehalten, sich der Thematik in knapper Form historisch zu nähern. So beginnt das Kapitel bei Demokrit:

Das moderne Atommodell

*Der griechische Philosoph DEMOKRIT meinte vor rund 2400 Jahren salopp gesagt, dass alle Stoffe aus winzigen, unteilbaren Kugeln bestehen. Aus dem griechischen Wort „atomos“ (=unteilbar) leitet sich das heute gebräuchliche Wort **Atom** ab. Demokrits Modell hielt im Prinzip bis Ende des 19. Jahrhunderts, also rund 2300 Jahre lang! Dann ging es aber Schlag auf Schlag, denn innerhalb von knapp 30 Jahren wurde über mehrere Zwischenstufen jenes Atommodell entwickelt, das noch heute seine Gültigkeit besitzt. Es basiert auf den Erkenntnissen der **Quantenmechanik**.*

*Dieses quantenmechanische Atommodell wirft ein Problem auf: Es ist sehr unanschaulich. Auf die Frage, wie man sich ein Atom vorstellen soll, hat WERNER HEISENBERG angeblich einmal geantwortet: „Versuchen Sie es erst gar nicht!“. Aus diesem Grund findet man heute noch in sehr vielen Büchern das veraltete Atommodell, bei dem die Elektronen den Kern umkreisen, ähnlich wie Planeten die Sonne. Dieses Modell widerspricht vielen experimentellen Eigenschaften des Atoms. Es ist aber das **letzte anschauliche Atommodell** und hat wohl aus diesem Grund die letzten 80 Jahre überlebt.²³³*

Die Stabilität des Atommodells, sowie die Lokalisierung von Teilchen im Atom werden mit Hilfe der Unschärferelation argumentiert:

Was stoppt den Atom-Kollaps

*[...] Was passiert wenn ein **Elektron** auf ein **Proton** trifft? Das ist eine Schlüsselfrage für das Verständnis des Atomaufbaus. Überlegen wir nochmals aus **klassischer Sicht**! Beide Teilchen werden angezogen, und es gibt nichts, was sie bremst. Entweder treffen sie direkt aufeinander, oder das Proton fängt das Elektron ein wie ein Planet einen Mond. Dabei würde das Elektron aber Energie abstrahlen und letztlich doch auf das Proton stürzen. Du siehst also: Aus klassischer Sicht würden in jedem Fall die Teilchen aufeinander „kleben“ und nach außen hin neutral sein.*

*Was passiert aber in der Realität, wenn ein Elektron auf ein Proton trifft? Es entsteht ein **Wasserstoffatom**! Du siehst also, warum es unmöglich war, Anfang des 20. Jahrhunderts ein schlüssiges Atommodell zu finden. Aus klassischer Sicht dürfte es Atome nämlich gar nicht geben! **Was verhindert aber den Kollaps des Atoms? Die Unschärferelation!***

*Die Unschärferelation führt zu einem sehr spektakulären Schluss: Je kleiner der Raum ist, in dem man ein Quant einsperrt, desto größer wird seine Energie, die sogenannte Lokalisationsenergie. Je näher also das Elektron an das Proton herangezogen wird, desto geringer wird seine Ortsunschärfe und desto größer seine **Lokalisationsenergie**. Diese summiert sich zur potenziellen Energie, die durch die Anziehung zwischen den Teilchen gegeben ist. Das System Elektron-Proton stellt sich nun so ein, dass die **Energiesumme ein Minimum** wird.*

*Es stellt sich also ein stabiler Zustand ein, bei dem die Energiesumme ein Minimum ist. Daraus ergibt sich aber wiederum eine ganz bestimmte Ortsunschärfe des Elektrons. **Diese***

²³² Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 5ff

²³³ Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 17

Ortsunschärfe entspricht dem Radius des Atoms. In der Quantenmechanik verliert der Bahnbegriff ja seine Gültigkeit. Das Elektron ist also quasi über den gesamten Bereich der Ortsunschärfe zu finden. Es ist salopp gesagt, überall und gleichzeitig nirgends. **Man nennt den Aufenthaltsbereich des Elektrons auch Orbital.**

Es ist paradox und zugleich faszinierend: Das, was allen Dingen die Masse verleiht (Der Atomkern), hat so gut wie kein Volumen. Das, was den Dingen das Volumen verleiht (die Elektronenhülle), hat so gut wie keine Masse. Und überdies ist dieses Volumen nur darauf zurückzuführen, dass man dem Elektron keinen bestimmten Ort zuordnen kann. **Das Volumen entsteht durch die Ortsunschärfe der Elektronen.** Die Tatsache, dass Atome nicht kollabieren, ist also eine glänzende Bestätigung für die Richtigkeit der Unschärferelation.²³⁴

Die Ausbildung von Orbitalen wird durch die bereits bekannte Analogie des Quantenkäfigs untermauert. Die Quantisierung des Elektrons wird mit Hilfe von Begriffen aus der Wellenlehre erklärt:

Im Quantenkäfig

[...] Das Elektron in der Hülle eines Wasserstoffatoms kann mit einer stehenden Wahrscheinlichkeitswelle beschrieben werden. Sie erlaubt die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, das Elektron an bestimmten Punkten messen zu können. Diese wird auch als Orbital bezeichnet.

Wie bei einer schwingenden Saite sind auch bei den Orbitalen Oberwellen möglich, die den Wahrscheinlichkeitswellen der angeregten Elektronen entsprechen. Da aber nur ganz bestimmte Konfigurationen erlaubt sind, kann das Elektron auch nur ganz bestimmte Energien annehmen. Die Energie des Elektrons ist quantisiert.²³⁵

Die Ausführungen zur Quantentheorie finden am Ende des Buches der elften Schulstufe ihre grandiose Abrundung, indem Wolfgang Pauli wie folgt zu Wort kommt:

Ein Elektron sieht nicht aus!

[...] WOLFGANG PAULI, österreichischer Physiknobelpreisträger, soll einmal auf die Frage: „Wie sieht ein Elektron aus?“ geantwortet haben: „Ein Elektron sieht nicht aus!“. Quantenobjekte wie Elektronen entziehen sich einfach unserer bildlichen Vorstellungskraft.²³⁶

²³⁴ Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 19f

²³⁵ Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 21

²³⁶ Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 24

6.3.4 Erkenntnisse & Rückschlüsse

Vergleicht man die drei verschiedenen didaktischen Aufarbeitung der Quantentheorie der exemplarisch analysierten Schulbuchserien, lassen sich zum Teil eine Vielzahl an Gemeinsamkeiten finden - ebenso deutliche Unterschiede. Als Einführung in die Thematik beginnen alle drei mit einem historischen Abriss der Entwicklung der Quantentheorie. Ein probates Mittel, zeigt es doch den langen, steinigen Weg bis zum Status quo und vermittelt zudem ein realistisches Bild, wie Naturwissenschaft „stattfindet“.

*An der Entwicklung der Optik lässt sich gut das Schicksal physikalischer Theorien verfolgen. Sie entstehen, liegen miteinander im Wettstreit, werden widerlegt und modifiziert und gehen schließlich ganz überraschend in umfassenderen Konzepten auf.*²³⁷

Die historischen Erzählungen beginnen unisono bei Newtons Korpuskeltheorie des Lichts, welcher die Wellentheorie Huygens gegenübergestellt wird. Bereits hier trennt sich das erste Mal die Spreu vom Weizen. Es handelt sich um die Grundsatzfrage, welchen Weg man zur Beschreibung des Lichts gewillt ist einzuschlagen. Dabei wählen zwar alle drei den sicheren²³⁸ Weg: „Licht ist eine Welle und kann Teilcheneigenschaften aufweisen, diese lassen sich aber mit Einsteins Teilchenhypothese in Einklang bringen.“, allerdings unterscheiden sie sich in der Vehemenz, mit der dieses Bild vermittelt wird. Hier gehen die Formulierungen auseinander, das vermittelte Bild ist bei allen aber sehr artverwandt. So findet man bei „Sextl et al.: Physik“ die Rechtfertigung der akzeptierten Lichtwelle:

*Weißes Licht setzt sich aus Wellen verschiedener Frequenzen zusammen. [...] In Materie laufen die Lichtwellen mit hoher Frequenz (blau) langsamer als die Lichtwellen mit niedriger Frequenz (rot).*²³⁹

*Lichtwellen sind Transversalwellen.*²⁴⁰

*Wenn Licht nicht nur Welleneigenschaften, sondern auch Teilcheneigenschaften haben soll, warum soll dies nicht auch für Elektronen - in umgekehrter Weise - gelten?*²⁴¹

Auch in „Apolin: Big Bang“ befindet sich eine ähnlich scharfe Formulierung, wenngleich hier insgeheim das Hauptaugenmerk bereits auf eine etwaige Dualität gelegt wird:

²³⁷ Sextl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 5

²³⁸ Diesen Weg als sicher zu bezeichnen fußt auf zwei Gründen, die sich streng genommen auch gegenseitig bedingen. Erstens ist die Wellentheorie des Lichts die historisch gewachsene Theorie, die nach wie vor in der Beschreibung einiger optischer Experimente ihre Erfolge feiert. Zweitens, als Folge daraus, haben sich im naturwissenschaftlichen Sprachgebrauch im Umgang mit Licht Begriffe eingebürgert, welche der Beschreibung mechanischer Schwingungen und Wellen entspringen, wie zB Wellenlänge, Frequenz, Interferenz. Um mit dieser Tradition zu brechen würde es einen Gewaltakt benötigen, der nach wie vor auf sich warten lässt.

²³⁹ Sextl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 29

²⁴⁰ Sextl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 32

²⁴¹ Sextl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 40

*Es war nun also nachgewiesen, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften besitzt.*²⁴²

Dem wird in „Jaros et al.: Physik Compact“ eine vergleichsweise vorsichtige Formulierung gegenübergestellt, die bereits deutlich die Hinwendung zu den Photonen empfiehlt:

*Licht weist neben Welleneigenschaften auch Teilcheneigenschaften auf. Licht mit der Wellenlänge λ verhält sich unter bestimmten Bedingungen wie ein Teilchenstrom, dessen Einzelteilchen (Photonen) einen Impuls $p = h/\lambda$ aufweisen.*²⁴³

*Man sagt auch, die Aussendung von Licht erfolgt in Wellenzügen. Experimente zeigen, dass die Energie nicht über einen unendlich langen Wellenzug verteilt, sondern „lokalisiert“ ist. Dies legt nahe, von Energiequanten (**Photonen**, photons, quanta of light) zu sprechen.*²⁴⁴

Sind die jeweiligen Standpunkte erst einmal gefunden, wird in allen drei Serien Albert Einstein auf den Plan gerufen. Seine Formulierung des äußeren Photoeffekts liefert den unumstößlichen Hinweis auf die Existenz der Photonen. Dennoch wird dieser Wink mehr hin- als aufgenommen und auch der weitere Schritt zu de Broglie wird von allen dreien gemeinsam getätigt. Die grobe Abrundung der Quantentheorie unternimmt schließlich die Einführung in das Feld der Wahrscheinlichkeitsaussagen. Hier wird mit unterschiedlicher Intensität auf Wahrscheinlichkeitsfunktionen hingewiesen, hauptsächlich wird dafür der Begriff Wahrscheinlichkeitswelle verwendet. Dabei findet man große Übereinstimmungen in den Formulierungen bei „Jaros et al.: Physik Compact“ und „Apolin: Big Bang“:

*Man spricht von einer **Wahrscheinlichkeitswelle**. Die Amplitude der Wahrscheinlichkeitswelle wird mit dem Formelbuchstaben Ψ bezeichnet. Ähnlich wie die Energie einer Schallwelle oder einer elektromagnetischen Welle proportional zum Quadrat ihrer Amplitude ist, ist die Wahrscheinlichkeit p , ein Teilchen an einem bestimmten Ort zu finden, mit dem Quadrat der Wahrscheinlichkeitswelle verknüpft.*²⁴⁵

*Ein weiteres wichtiges mathematisches Werkzeug in der Quantenmechanik ist die **Wellenfunktion**, mit der man die Wahrscheinlichkeitswelle beschreibt. Sie wird mit Ψ bezeichnet, das ist ein griechisches Psi. Wenn man zum Beispiel die Wellenfunktion eines Quants kennt, dann kann man berechnen, wie es sich hinter einem Doppelspalt verhält.*²⁴⁶

Dabei wird der Eindruck erweckt, die Autorenschaft rastet sich zufrieden verschlaufend auf dem Begriff der Wahrscheinlichkeitswelle aus. Impliziert man damit ja bereits einen Teil des Problems und bezieht Stellung ohne sich genau zu positionieren. Die Wellenfunktion erfährt ihre Legitimation durch ihre Erscheinungsform und pflanzt dabei das Bild von sich in Wellen bewegendem Teilchen ein.

²⁴² Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 7

²⁴³ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 13

²⁴⁴ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 27

²⁴⁵ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 11

²⁴⁶ Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 11

In „Sexl et al.: Physik“ wird darauf explizit hingewiesen, der entscheidende Schritt, in diesem Zusammenhang ganz auf den Begriff Welle zu verzichten, wird aber nicht unternommen:

Die Amplitude der mit Teilchen verknüpften Welle wird üblicherweise mit dem griechischen Buchstaben Ψ (Psi) bezeichnet. Die Bezeichnung Materiewelle (Elektronenwelle, Neutronenwelle usw.) ist zwar gebräuchlich, führt jedoch zu Missverständnissen, da sie suggeriert, dass eine Wellenbewegung materieller Teilchen vorliegt. Die Wellenfunktion Ψ ist jedoch als Wahrscheinlichkeitswelle zu deuten, deren Quadrat Ψ^2 die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der zugehörigen „Teilchen“ bestimmt.²⁴⁷

Die Herangehensweisen an die zweite wichtige Frage der Quantentheorie, der Frage nach einem konsistenten Atommodell, unterscheiden sich ebenfalls kaum. Nachdem der Grundstein zur genaueren Betrachtung des Atommodells in Form der Wahrscheinlichkeitsfunktion gelegt ist, wird das neu erlangte Wissen auf die Beschreibung des Aufbaus der Materie angewendet:

Der Begriff einer genau vorhersagbaren Bahn verliert für Elektronen (und für Photonen) seinen Sinn: Man kann nur die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der sich Elektronen in Raumbereichen nahe dem Atomkern befinden.²⁴⁸

Die Elektronenhülle entspricht den stehenden Wahrscheinlichkeitswellen der Elektronen. Auf Elektronenbahnen wird verzichtet.²⁴⁹

Was verhindert aber den Kollaps des Atoms? Die Unschärferelation! [...] Je kleiner der Raum ist, in dem man ein Quant einsperrt, desto größer wird seine Energie, die sogenannte Lokalisationsenergie. Je näher also das Elektron an das Proton herangezogen wird, desto geringer wird seine Ortsunschärfe und desto größer seine Lokalisationsenergie. [...] Diese Ortsunschärfe entspricht dem Radius des Atoms. In der Quantenmechanik verliert der Bahnbegriff ja seine Gültigkeit. [...] Man nennt den Aufenthaltsbereich des Elektrons auch Orbital. [...] Das Volumen entsteht durch die Ortsunschärfe der Elektronen.²⁵⁰

Die Erklärung des Atoms mit Hilfe der Unschärferelation ist ein sehr eleganter Weg, der mit wenigen Hindernissen aufzuwarten vermag. Das Atom ist und bleibt nach einer derartigen Beschreibung ein Abstraktum der Vorstellung, allerdings führt die stringente Betrachtung zu keinen Widersprüchen, was der Einprägsamkeit in großem Maße dient.

In Bezug auf die prinzipielle Problematik der Mittelbarkeit und Anschaulichkeit der Quantentheorie wird insgesamt allerdings kaum Stellung genommen. Man beschränkt sich durchwegs auf die Darstellung und Erklärung der Thematik. In der Einführung zur Quantentheorie erklärt „Apolin: Big Bang“ aber die „Sinnlosigkeit unserer Wahrnehmung“ wie folgt:

²⁴⁷ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 48

²⁴⁸ Sexl, Kühnelt, Stadler, Sattlberger: PHYSIK 7, öbvht 2007, S. 40

²⁴⁹ Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 16

²⁵⁰ Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 19f

Wir haben aber keine „Quanten-Sinne“ entwickelt. Die Dinger sind einfach viel zu klein, als dass sie für unser Leben direkt von Bedeutung wären. Und weil wir sie nicht sinnlich erfassen können, fehlt uns auch die konkrete Vorstellung davon.²⁵¹

Zum Konflikt der unmittelbaren Mittelbarkeit quantentheoretischer Ereignisse vermöge unserer Sprache wird man knapp - aber immerhin - bei „Jaros et al.: Physik Compact“ fündig:

Dieser [Welle-Teilchen-]Dualismus beinhaltet aber nach wie vor einen echten Widerspruch, wenn man auf Quantenobjekte Begriffe anwendet, die aus der Alltagswelt stammen.²⁵²

Würde dieser Hinweis konsequent verfolgt werden, bedarf es streng genommen gar nicht dem Akt, um an Anschaulichkeit zu gewinnen, auf alle Begriffe des Alltags zu verzichten, und ausschließlich in eine abstrakte Quantensprache abzurutschen. Ein Anfang wäre bereits damit getan, Begriffe, deren Ursprung in den frühen Anfängen der Quantentheorie liegen, wie zB „Welle-Teilchen-Dualismus“ aus den Schulbüchern zu verbannen. Der Entwicklung der physikalischen Theorie des Lichts sollte ausschließlich historische Bedeutung in der Darstellung der Quantentheorie zukommen. Von einem Dualismus zu sprechen ist spätestens seit der Erklärung des Photoeffekts obsolet. Auch auf missverständliche Begriffe wie „Wellenfunktion“ und „Wahrscheinlichkeitswelle“ kann man verzichten. Stattdessen lässt sich für jedes Teilchen eine entsprechende „Zustandsfunktion“ angeben, welche eine identische Beschreibung zulässt, ohne unterschwellig einen falschen Charakter zu vermitteln. Licht besteht aus Lichtteilchen, Photonen. Alle diesbezüglichen Wellenphänomene entspringen dem Wellencharakter der Wahrscheinlichkeit, welcher für jede Zustandsfunktion eines jeden Teilchens definiert ist. Oder aber eben auch als Kontrapunkt:

Auch MAX BORN hatte zunächst Probleme mit dem Akzeptieren der Quantenmechanik und schrieb einmal ironisch in einem Brief an Albert Einstein: „Die Quanten sind doch eine hoffnungslose Schweinerei.“²⁵³

²⁵¹ Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 4

²⁵² Jaros, Nussbaumer, Nussbaumer, Kunze: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007, S. 16

²⁵³ Apolin: Big Bang 7, öbvht 2008, S. 4

6.4 Modellvorschläge

Aufbauend auf der vorangegangenen Textanalyse finden sich in diesem Kapitel zwei Themenausarbeitungen, konzipiert als Unterrichtsgrundlage sowohl für Lehrpersonen als auch für Schülerinnen und Schüler - zu sehen als Modellvorschläge. Es handelt sich dabei um die Erklärung der zwei herausgearbeiteten Grundfragen der Quantentheorie „Aufbau der Materie“, „Aufbau der Materie II“ und „Was ist Licht?“.

Diese orientieren sich prinzipiell am aktuellen österreichischen Lehrplan und sind daher für die elfte und zwölfte Schulstufe vorgesehen. Allerdings bietet speziell die Frage nach dem Aufbau der Materie bereits in der Unterstufe - mitunter sogar in der allerersten Physikstunde der sechsten Schulstufe - einen interessanten Alternativvorschlag zur traditionellen Debatte, ob man die Einführung in die grundlegenden physikalischen Fragen mit Hilfe des Kraftbegriffs oder doch der Energie beginnt.

Wenngleich das Thema ohne Zweifel ein überdurchschnittliches Maß an Abstraktheit aufweist, bietet es dennoch für den weiteren Weg eine Vielzahl an physikalisch richtigen Erklärungen, auf welche man in weiterer Folge zurückgreifen kann. Beispielgebend sind hier physikalische Konzepte wie Wärme, Energie, Radioaktivität, Kernkraft angeführt.²⁵⁴

Die Frage nach der Natur des Lichts gliedert sich in diese Aufzählung automatisch ein. Zusätzliche wurde bei den Formulierungen verstärktes Augenmerk auf eine altersgerechte Art und Weise gelegt. Ausgangspunkt dazu waren die Ergebnisse der unveröffentlichten Dissertation „Die Sprache in Physikschulbüchern unter besonderer Berücksichtigung von Texten zur speziellen Relativitätstheorie“ von DDr. Martin Apolin:

Zusammenfassung:

Der Text soll so einfach wie möglich geschrieben sein. [...]

Der Text soll in einer möglichst konkreten Alltagssprache geschrieben sein. [...]

Der Text soll in möglichst kurzen Sätzen geschrieben sein. [...]

Kürze und Prägnanz sollen im Mittelbereich liegen. [...]

Der Text soll optimal gegliedert sein. [...]

*Der Text soll anregende Zusätze enthalten [...]*²⁵⁵

²⁵⁴ Dieses didaktische Konzept zur Einführung in die Physik wurde im Schuljahr 2008/09 sowie im darauf folgenden Schuljahr 2009/10 in insgesamt sechs Unterstufenklassen (zwei 2. Klassen, drei 3. Klassen, eine 4. Klasse) im Ausmaß von 3-5 Wochenstunden vom Autor am GRG 21 Bertha von Suttner - Schulschiff durchgeführt. Wenngleich man natürlich im Vergleich von Schulstufe zu Schulstufe gewisse Inhalte nicht immer in voller Tiefe behandeln kann, und speziell in den niedrigeren Schulstufen darauf achten muss, den schwierigen und abstrakten Stoff durch Experimente späterer Kapitel aufzulockern, zeigt sich im weiteren Unterricht der deutliche Vorteil, da man quasi immer auf dieses „Urwissen“ zurückgreifen kann. Charakteristisch für dieses Konzept ist ein guter Umgang mit den jeweiligen Klassen, da man im Sinne von „Ich beginne jetzt mit einem wirklich schwierigen Kapitel, aber wenn wir das verstanden haben, können wir damit alles weitere auf einfache Weise verstehen!“ einen enormen Vertrauensvorschuss benötigt. Dieser rechtfertigt sich aber in weiterer Folge!

²⁵⁵ Apolin, Martin: Die Sprache in Physikschulbüchern unter besonderer Berücksichtigung von Texten zur speziellen Relativitätstheorie. Unveröffentlichte Dissertation, Wien 2002, S. 231ff

6.4.1 Aufbau der Materie

Die Grundidee hinter dem folgenden Konzept beruht darauf, anhand einiger Postulate (Im Atomkern befinden sich Protonen und Neutronen; Die Masse der Elektronen ist deutlich geringer als die der Kernteilchen; Es gibt verschiedene Arten von Kräften) ein in sich konsistentes Atommodell zu entwickeln. Dieses führt Elektronen als Elementarteilchen an und beinhaltet Quarks als ebensolche als Grundbausteine der Kernteilchen. Auf die Einführung der Gluonen als Austauschteilchen der starken Wechselwirkung wird vorerst verzichtet, da sich das dadurch zu behandelnde Feld über die Grundintention des Konzepts hinaus erstreckt.

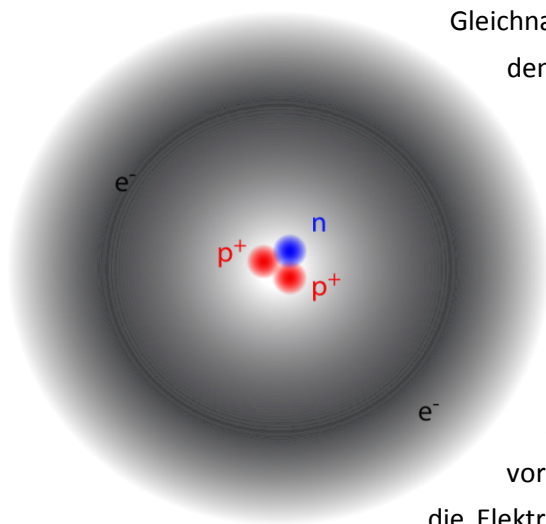
Primäres Anliegen ist es, die relevanten Elementarteilchen samt den wirkenden Kräften im Atom zu beschreiben. Dadurch soll ein Gefühl für die unterschiedliche Massenverteilung sowie die Dimensionen eines Atoms erlangt werden. Aufbauend auf dem Konzept der Orbitale lässt sich in weiterer Folge elegant die Aufenthaltswahrscheinlichkeit herleiten, wodurch eine Überleitung zur Heisenberg'schen Unschärferelation vorliegt, mit deren Hilfe sich das Atommodell quasi „abrunden“ lässt.

Aufbau der Materie

Unter Materie versteht man jeden Stoff, den man theoretisch „berühren“ kann. (z.B. Holz, Wasser, Metall, Luft) Bereits vor knapp 2500 Jahren postulierte der griechische Philosoph DEMOKRIT, dass die gesamte Natur aus kleinsten, unteilbaren Einheiten, den **Atomen**, zusammengesetzt sei.

„Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter; in Wirklichkeit gibt es nur Atome und leeren Raum.“ [Demokrit]

Doch hatte er mit seinen unteilbaren Atomen (griechisch: *átomos* - unteilbar) tatsächlich Recht? Jede Materie besteht aus Atomen! Aber woraus bestehen Atome? Kann man Atome vielleicht doch noch weiter teilen? JA! Und zwar in einen kleinen, aber sehr massiven **Atomkern** und in ein oder mehrere kugel- oder keulenförmige **Orbitale**, die sich in einem gewissen Abstand um den Atomkern befinden.



Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab. Der Kern ist aber dennoch stabil! Denn obwohl sich die positiven Protonen abstoßen, werden sie durch die **Kernkraft** zusammengehalten. Für diese Kernkraft sind die **Neutronen** verantwortlich. Diese Kraft ist sehr stark, hat aber nur eine enorm kurze Reichweite, die auf den Kern beschränkt ist.

Ein **Orbital** darf man sich nicht wie eine Bahn vorstellen! Es ist einfach nur der **Bereich**, in dem sich die Elektronen befinden! Ein Orbital besteht aus nichts, es

bezeichnet einfach nur einen gewissen **Ort**! In einem **neutralen Atom** befinden sich immer **gleich viele Protonen wie Elektronen**, deren Ladungen sich ausgleichen. Bei elektrisch geladenen Atomen ist dies nicht der Fall, man bezeichnet diese Atome als **Ionen**.

In einem stabilen Atom hängt die Anzahl der **Neutronen** mit der Anzahl der **Protonen** zusammen. Je mehr Protonen sich in einem Kern befinden, desto größer ist ihre gesamte Abstoßungskraft. Um dieser mittels der Kernkraft entgegenzuwirken, benötigt man eben mehr Neutronen.

KERNTAILCHEN

Name	Symbol	Ladung	Masse
Proton	p^+	positiv	schwer
Neutron	n	neutral	schwer

ORBITALTEILCHEN

Name	Symbol	Ladung	Masse
Elektron	e^-	negativ	leicht

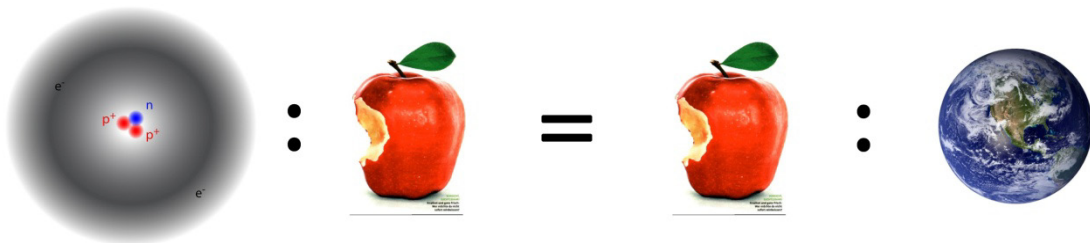
Die Anzahl der Protonen im Kern bestimmt die jeweiligen **Eigenschaften** der vom Atom gebildeten Materie. **Luft** besteht zum Beispiel hauptsächlich aus Stickstoffatomen (7 Protonen) und Sauerstoffatomen (8 Protonen). **Blei** im Gegensatz dazu besitzt 82 Protonen! Nach momentanem Stand gibt es 118 verschiedene Atome, welche im so genannten **Periodensystem der Elemente** zusammengefasst sind, wobei Atome, mit einer Kerngröße über 94 Protonen auf der Erde nicht vorkommen, sondern nur künstlich erzeugt werden.

Je größer ein Atom ist, d.h. je mehr Protonen und Neutronen sich im Kern befinden, desto mehr Elektronen müssen im Orbital untergebracht werden. Dieser Bereich bietet aber nur für ein paar Elektronen genügend Platz. Daher bilden sich **mehrere Orbitale** aus. Rundherum um einen großen, schweren Atomkern befinden sich also verschiedene Bereiche, in denen sich die Elektronen aufhalten können. Dadurch ist das Atom **ausgedehnter**, also größer.

Hmm? Aber wie groß ist so ein Atom eigentlich?

Sagen wir es so: Ziemlich klein! Der Durchmesser eines durchschnittlichen Atoms beträgt 0,1 nm! Das „nm“ steht für Nanometer, und bedeutet ein Milliardstel eines Meters! Also 0,000 000 001 m! [Man schreibt auch: $10^{-10}\text{m} = 1 \text{ \AA}$ ström]

Anschaulicher kann man sich die Größe eines Atoms machen, wenn man sich vor Augen führt, dass Alufolie 250 000 Atome dick ist. Oder wenn man bedenkt, dass ein Atom relativ zu einem Apfel so groß ist, wie dieser Apfel zur Erde.

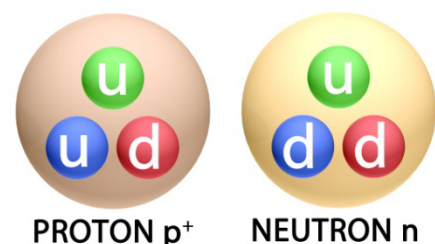


Abschließende Frage: Woraus bestehen eigentlich p^+ , n , e^- ?

Die winzigen **Elektronen** sind nach heutigem Stand der Wissenschaft nicht mehr teilbar. Sie sind also grundlegend, elementar! Man nennt sie daher auch **Elementarteilchen**. Die schweren **Protonen** und **Neutronen** hingegen bestehen aus so genannten **Quarks**! Jeweils drei dieser Quarks bauen ein Proton oder ein Neutron auf. Quarks sind genauso wie die Elektronen Elementarteilchen.

Insgesamt gibt es sechs verschiedenen Quarks: Up, Down, Strange, Charm, Bottom, Top. Für den Aufbau der Materie sind aber nur zwei davon relevant:

Das **Up-Quark (u)** und das **Down-Quark (d)**.



6.4.2 Aufbau der Materie II

Auf dem vorangegangenen Unterrichtskonzept zum Aufbau der Materie fußend, stellt das nun angeführte Konzept eine weiterführende Erklärung des stabilen Aufbaus der Materie dar. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Einführung in die Heisenberg'sche Unschärferelation, anhand derer sowohl die Stabilität von Atomen, als auch ihre Ausdehnung im Raum elegant erklärt werden können. Dazu bedarf es nur der Einführung einiger weniger Begriffe wie Orts- und Impulsunschärfe, sowie der Lokalisationsenergie.

Durch den konsequenten Verzicht auf obsoletere Begriffe wie Bahn, Schale, Hülle, sowie durch die stringente Anwendung der physikalischen Erkenntnisse der Heisenberg'schen Unschärferelation auf ein Atom, wird die Möglichkeit geboten, sich die Abstraktheit eines Atoms physikalisch zu erklären.

Aufbau der Materie II

Werfen wir zu Beginn einen Blick auf das Periodensystem der Elemente. In der ersten Zeile ganz links in der ersten Spalte ist das chemische Element **Wasserstoff H** eingetragen. Es trägt die Ordnungszahl 1. Daher können wir ablesen, dass sich nur ein Proton im Wasserstoffatomkern befindet. Da es sich bei den Atomen des gasförmigen Wasserstoffs um **elektrisch neutrale Atome** handelt, wissen wir auch, dass sich im Orbital nur ein Elektron befinden kann. Und das ist auch schon alles - ein Proton und ein Elektron, und schon haben wir ein Wasserstoffatom.

Aber wie kann das funktionieren? Aus klassischer Sicht ziehen sich doch beide Teilchen aufgrund ihrer ungleichnamigen Ladung an, und es gibt nichts, das sie bremst. Eigentlich sollten die zwei Teilchen aneinander „kleben“ und nach außen hin neutral sein? Das Atom wäre nie stabil und räumlich ausgedehnt, sondern würde immer sofort kollabieren!

Weg von der klassischen Physik!

Die klassische Sichtweise bringt uns also nicht weiter. Diese Erkenntnis mussten die Physikerinnen und Physiker bereits vor mehr als 100 Jahren machen. Doch glücklicherweise schuf der deutsche Physiker WERNER HEISENBERG 1927 Abhilfe, indem er die nach ihm benannte **Heisenberg'sche Unschärferelation** entdeckte:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \approx \frac{h}{13}$$

Δp ... Impulsunschärfe [kgms^{-1}]

Δx ... Ortsunschärfe [m]

h ... Planck'sches Wirkungsquantum [Js] $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$

Diese besagt: **Es ist unmöglich, sowohl den exakten Ort als auch den exakten Impuls eines Teilchens gleichzeitig zu bestimmen!** Das bedeutet zum Beispiel, dass man zwar den Ort eines Teilchens genau bestimmen kann, allerdings hat man dann keine Information über seinen Impuls bzw. seine Geschwindigkeit. Misst man wiederum die exakte Geschwindigkeit eines Teilchens, kann man keine genaue Aussage über den Ort des Teilchens tätigen. Je genauer die eine Größe bestimmt wird, desto ungenauer wird die Bestimmung der anderen Größe. Wie man es auch dreht und wendet, immer bleibt eine gewisse Unschärfe über!

Und was hat das jetzt mit dem Wasserstoffatom zu tun?

Eine ganze Menge! Wollen wir nämlich beschreiben, wie sich Elektron und Proton im Wasserstoffatom verhalten, stoßen wir rasch auf die Unschärferelation. Je näher das Elektron nämlich an das Proton herangezogen wird, desto geringer wird seine **Ortsunschärfe**. Das heißt der Bereich, in dem sich das Elektron am wahrscheinlichsten aufhält, wird immer kleiner.

Dadurch nimmt allerdings aufgrund der Unschärferelation die **Impulsunschärfe** zu. Indem man das Elektron also in der Nähe des Protons quasi „einsperrt“, erhöht sich zwangsläufig sein Impuls p . Diese Impulserhöhung bedeutet ebenso auch eine Erhöhung der **kinetischen Energie** des Teilchens. Aber aufgepasst: diese kinetische Energie kommt **nicht** durch irgendeine Bewegung zu Stande, sondern einzig und allein durch die Einschränkung des Aufenthaltsbereiches. Man bezeichnet sie daher auch als **Lokalisationsenergie**, da sie eben durch Lokalisation, also Einschränkung des Ortes, entsteht.

Endlich stabile Atome!

Im Atom spielen also zwei spezielle Energien eine große Rolle. Einerseits die soeben eingeführte **Lokalisationsenergie**, und andererseits die **potenzielle Energie**, welche durch die elektrische Anziehung zwischen den Teilchen gegeben ist. Im konkreten Fall des Wasserstoffatoms also die Anziehungskraft zwischen Proton und Elektron. Diese zwei Energien summieren sich immer! Das System Proton-Elektron stellt sich so ein, dass die **Energiesumme ein Minimum** wird! Dadurch ergibt sich eine ganz bestimmte Ortsunschärfe des Elektrons. **Diese Ortsunschärfe entspricht dem Radius des Wasserstoffatoms!**

Durch die Ablösung der klassischen Sichtweise kann man somit nicht mehr von einer Elektronenbahn sprechen, sondern ausschließlich von einem gewissen Bereich der Ortsunschärfe, in dem das Elektron zu finden ist. Dieser Aufenthaltsbereich entspricht genau dem **Orbital**.

Es ist paradox und zugleich faszinierend: Das, was allen Dingen die Masse verleiht, der massive **Atomkern**, hat so gut wie kein Volumen. Das, was allen Dingen das Volumen verleiht, das räumlich ausgedehnte **Orbital**, hat so gut wie keine Masse. Zudem entsteht dieses Volumen nur deshalb, weil man den Elektronen keinen exakten Ort zuordnen kann. Das Volumen eines Atoms entsteht durch die Ortsunschärfe der Elektronen. Die Tatsache, dass Atome stabil sind und nicht kollabieren, steht im Einklang mit der Gültigkeit der Unschärferelation.

Zusammenfassung & Schlussbemerkungen

Das Wasserstoffatom kollabiert deshalb nicht, weil das durch die Unschärferelation verhindert wird. Die Größe des Wasserstoffatoms ist nichts anderes als die Ortsunschärfe des Elektrons.

Diese räumliche Ausdehnung, das Volumen des Atoms, spielt für uns eine wichtige Rolle. Schließlich ist diese Ausdehnung erst die Grundlage für unsere sinnlich wahrnehmbare Existenz. Diese beruht ausschließlich auf der **elektromagnetischen Wechselwirkung** zwischen Materie, also Atomen, oder ganz genau: Elementarteilchen.



«Teilchen, Teilchen, Teilchen...»

6.4.3 Was ist Licht?

Dieses Konzept dient zur Einführung sowohl in die Quantentheorie, als auch in die grundlegende Optik. Dabei wurde vehement darauf geachtet, ein spezielles Bild der Natur des Lichts zu zeichnen. Als einziges Postulat liegt dabei nur die Existenz von Photonen zu Grunde, ganz im Sinne von Richard P. Feynman, der sich bereits 1985 in seinem Buch „QED - The Strange Theory of Light and Matter“ dafür aussprach, das Verhalten von Licht ausschließlich mit Hilfe der Existenz von Lichtteilchen zu erklären:

*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.*²⁵⁶

Nun könnte man behaupten, einzige Hauptmotivation hinter dem Bestreben, ein stringentes Konzept für eine adäquate Erklärung des Lichts ausschließlich auf der Existenz von Photonen aufzubauen, wäre die, sich im Schein Feynmans zu sonnen, ohne selbst zu strahlen.²⁵⁷

Vielmehr soll damit aber ein weiterer Schritt in eine neue Richtung der Physikdidaktik getan werden, spielen doch nach wie vor Wellen die Hauptrolle in der aktuellen Beschreibung des Lichts, wie die oben angeführte Schulbuchanalyse offen gelegt hat. Da derartige Begriffe ausschließlich zur Unterstreichnung der sogenannten Doppelnatur des Lichts dienen, und einem grundlegenden Verständnis kaum zuträglich sind, sondern eher verwirrend wirken, fordert eine moderne Physikdidaktik einen vollkommenen Verzicht dieser Begriffe.

Ein Konzept zur Theorie des Lichts, welches sich ausschließlich auf die Existenz von Photonen und deren Energievielfalt stützt, kommt in weiterer Folge dann zum Beispiel gänzlich ohne Begriffe wie „Wellenlänge“ und „Frequenz“ aus, welche in diesem Kontext nicht mehr relevant sind, sondern eher eine störende Nebenrolle einnehmen. Ein weiterer Vorteil zeigt sich auch in der Erklärung der Dispersion, welche mit dem Begriff „Photonenenergie“ anschaulich erklärt werden kann, wodurch dem zentralen Begriff der Energie der Vorzug gegenüber Wellenlängen und Frequenzen geleistet wird.

²⁵⁶ Feynman, Richard P.: QED - Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie, Piper Verlag, 14. Auflage 2009, S. 26

²⁵⁷ Es ist eben nicht so, dass das Gleichnis „Wir seien gleichsam Zwerge, die auf den Schultern von Riesen sitzen, um mehr und Entfernteres als diese sehen zu können - freilich nicht dank eigener scharfer Sehkraft oder Körpergröße, sondern weil die Größe der Riesen uns emporhebt.“ (Johannes von Salisbury: Metalogicon 3,4,46-50) umgewandelt wird zu „Wir sind gleichsam Zwerge, die auf den Schultern von Riesen sitzen, um besser gesehen zu werden.“

Was ist Licht?

Gibt's was Schöneres, als sich an einem Wintertag im Freien in die Sonne zu stellen und das angenehm wärmenden Sonnenlicht auf der Haut zu spüren? Das Sonnenlicht löst die Produktion von Vitamin D und die Ausschüttung von Endorphinen (Glücksbotenstoffe) aus. Wir Menschen empfinden dies dann als angenehm. Physikalisch betrachtet erscheint dieser Vorgang allerdings nicht mehr so romantisch: Halten wir unsere Hand ins Sonnenlicht, treffen pro Sekunde $4 \cdot 10^{19}$ Lichtteilchen auf! Diese Lichtteilchen nennt man **Photonen**.

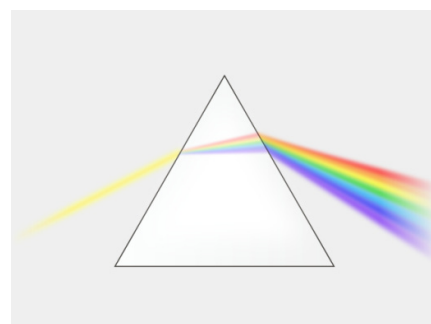
„Licht und Geist, jenes im Physischen, dieser im Sittlichen herrschend, sind die höchsten denkbaren unteilbaren Energien.“ [Johann Wolfgang von Goethe]

Der deutsche Physiker ALBERT EINSTEIN postulierte 1905 die Existenz der Photonen. Photonen lassen sich mit speziellen Messgeräten zB mit Hilfe eines „Photonenklickers“ nachweisen. Dabei handelt es sich um einen Detektor, welcher jedes eintreffende Photon registriert. Für jedes detektierte Photon ertönt ein einzelnes Klicken. Hält man einen Photonenklicker in helles Licht, ertönt vor lauter Photonen nur mehr ein Rauschen. Schirmt man das einfallende Licht durch mehrere Filter (dunkle Glasplatten) ab, wird das Rauschen schwächer und schwächer, bis nur mehr einzelne Klicks ertönen.

Sind alle Photonen gleich?

Wir wissen nun, dass Licht aus Photonen besteht. Ebenso wissen wir aus unserer Erfahrung, dass Licht aus verschiedenen Farben besteht. Gibt es verschiedene Photonen? Wodurch unterscheiden sie sich? Diesen Fragen ging ISAAC NEWTON bereits um 1672 nach. Er gilt als der wahre Begründer der Teilchentheorie des Lichts. Demnach sendet eine Lichtquelle (zB Lampe, Sonne) eine enorme Anzahl winzig kleiner Lichtteilchen aus, und dieses Licht breitet sich mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig aus. Die Lichtteilchen können sich allerdings durch ihre Energie voneinander unterscheiden. Es gibt energiereichere und energieärmere Photonen. Einige Photonen mit mittlerer Energie können wir mit unseren Augen als Farben wahrnehmen. Andere wiederum verfügen über so viel Energie, dass sie sogar ohne Probleme den menschlichen Körper durchdringen können. (Photonen mit dieser Energie verwendet man unter anderem zur Erstellung von Röntgenbildern.)

Leuchtet man mit Licht, welches aus Photonen mit vielen unterschiedlichen Energien besteht (zB weißes Licht), auf ein Glasprisma, werden die Photonen je nach ihrer Energie unterschiedlich abgelenkt, und treten unter unterschiedlichen Winkeln aus dem Prisma wieder aus. Dieses Phänomen bezeichnet man als **Dispersion**.

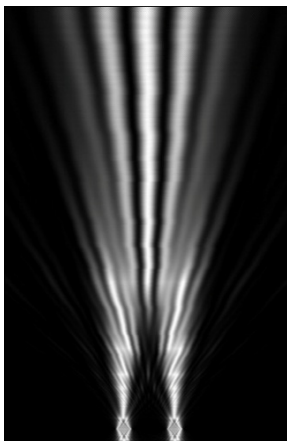


Lässt sich die Energie der Photonen nutzen?

Überfliegt man die Ausrüstungslisten diverser Abenteurer, wie zum Beispiel die des deutschen Naturforschers ALEXANDER VON HUMBOLDT, findet man bei fast allen neben Schlafsack, Wasserkännchen und Landkarten auch immer eine Lupe. Diese leistete ihm bei seiner Amerikaexpedition in den Jahren um 1800 immer wieder hilfreiche Dienste. Damit kann man nämlich nicht nur den Sehwinkel vergrößern und etwa kleine Gesteinsspuren untersuchen, vor allem lässt sich das Sonnenlicht damit auf einen kleinen Punkt bündeln. Dadurch konzentriert man die gesamte Energie aller einfallenden Photonen auf eine kleine Fläche, und kann somit sogar ein Feuer entfachen.

Physikalisch viel interessanter ist allerdings der so genannte **Photoeffekt**. Dieser wurde von Einstein in seinem annus mirabilis (Wunderjahr) 1905 zum ersten Mal korrekt beschrieben, und lieferte den ersten experimentellen Beweis der Lichtteilchenhypothese. Zum Photoeffekt kommt es, wenn man eine Metalloberfläche mit monochromatischem Licht (einfarbiges Licht, also bestehend aus Photonen gleicher Energie) bestrahlt. Dann wird ein Teil der Photonen reflektiert beziehungsweise erwärmt das Metall. Der andere Teil der Photonen kann allerdings unter gewissen Umständen Elektronen aus dem Metall herauslösen. Dabei ist äußerst interessant, dass es nicht von der **Intensität** des Lichts (wie viele Photonen auf der Metalloberfläche auftreffen) abhängt, sondern nur von der jeweiligen **Energie** der Photonen. Erst wenn diese einen gewissen Wert überschreitet, lässt sich der Photoeffekt beobachten!

Von Quanten und Spalten



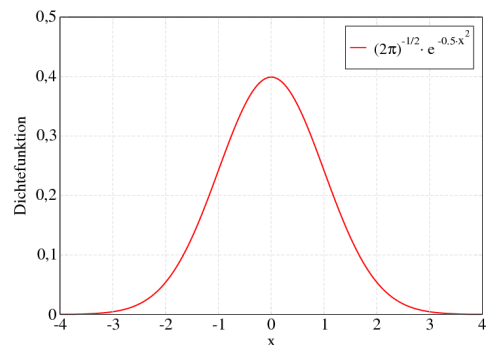
Ein Highlight der Optikexperimente ist das sogenannte **Doppelspaltexperiment**. Dabei schickt man Photonen durch einen hauchdünnen Doppelspalt und fängt sie dahinter auf einem Schirm auf. Dort bilden sich überraschenderweise helle und dunkle **Lichtstreifen**. Verblüffend erscheint dabei, dass der hellste Lichtfleck genau hinter dem Spalt erscheint - eigentlich ja ein verbotener Bereich für die Photonen.

Nun könnte man argumentieren, dass sich die Vielzahl an Photonen beim Durchtritt durch den Doppelspalt auf irgendeine Art und Weise gegenseitig beeinflussen und in verschiedene Richtungen drängen, fast wie kaufwütige Kunden zu Beginn des Schlussverkaufs. Allerdings, und jetzt wird es wirklich merkwürdig, gelangt man zu demselben Ergebnis, wenn man das Experiment mit einzelnen Photonen durchführt. Diesmal verwendet man anstelle des Schirms eine Fotoplatte, welche durch auftreffende Teilchen „belichtet“ wird. Tritt nun ein Teilchen nach dem anderen durch den Spalt, kann man zwar nie vorhersagen, wo es auf der Fotoplatte einen Punkt anschwärzen wird, aber nach einer großen Anzahl einzelner Teilchen erhält man die hellen und dunklen Lichtstreifen, die sich exakt vorhersagen lassen!

Und wie erklärt man sich das?

Um dieses Phänomen zu erklären, muss man sich ein wenig der Mathematik bedienen. Zunächst schreibt man jedem Teilchen eine eigene komplexe Zustandsfunktion Ψ zu. Diese beschreibt nichts anderes als den physikalischen Zustand des Teilchens zu einem gewissen Zeitpunkt t . Sie gibt also zum Beispiel an, wo sich ein Teilchen zu einer bestimmten Zeit befindet. Kennt man die Zustandsfunktion eines Teilchens, dann kann man zum Beispiel berechnen, wie es sich hinter einem Doppelspalt verhält. Dazu bildet man das Quadrat des Betrages dieser Funktion, also $|\Psi|^2$, und erhält somit die **Wahrscheinlichkeitsdichte**. Diese gibt Aufschluss, wo man das Teilchen finden kann.

Für jedes einzelne Teilchen gibt es Bereiche am Schirm, in denen es wahrscheinlicher zu finden ist, und andere Bereiche, in denen es unwahrscheinlicher zu finden ist. Diese **Aufenthaltswahrscheinlichkeit** ist also in einem Bereich sehr groß, und nimmt mit zunehmender Entfernung von diesem Ort immer mehr ab.



Das Beugungsmuster von hellen und dunklen Lichtstreifen am Schirm kann man dann so erklären, dass sich die jeweilige Aufenthaltswahrscheinlichkeit für jedes Teilchen miteinander so überlagert, dass es mathematisch gesehen zur gegenseitigen Beeinflussung von Wellen kommt. Dadurch verstärken sich die einzelnen Maxima (Wellenberge) und Minima (Wellentäler), und es kommt zur Ausbildung des Beugungsmusters.

Zum Abschluss noch ein kleiner Überblick

Die Bandbreite an Photonen mit verschiedenen Energien ist breit gefächert. Man ordnet die unterschiedlichen „Strahlungen“ im **Elektromagnetischen Spektrum** an. Der Bereich der sichtbaren Photonen nimmt dabei nur einen sehr kleinen Bereich ein. Daneben gibt es noch Strahlungen mit **hochenergetischen Photonen** (wie zB Gammastrahlung und Röntgenstrahlung) und Strahlungen mit **niederenergetischen Photonen** (wie zB Mikrowellenstrahlung und Radiowellenstrahlung).

Die Energie der sichtbaren Photonen beträgt etwa 1,6 eV. Das Sonnenlicht setzt sich aber nicht nur aus sichtbaren Photonen auseinander, es besteht auch noch aus Photonen mit höherer Energie, die als **UV-Strahlung (Ultraviolettstrahlung)** bezeichnet werden. Ihre Energie liegt zwischen 20 - 1000 eV. UV-Licht ist für den Menschen unsichtbar, allerdings gefährlich. Ein vernünftiger Umgang mit Sonnenlicht (**Sonnenschutz!**) ist daher unverzichtbar.

Ebenso besteht das Sonnenlicht auch noch aus Photonen mit niedriger Energie, der **Infrarotstrahlung**. Ihre Energie liegt zwischen 1 - 500 meV. IR-Licht ist für den Menschen ebenfalls unsichtbar. Allerdings erzeugen ihre Photonen die für uns so angenehme Wärme, weshalb man IR-Licht auch als **Wärmestrahlung** bezeichnet.

6.5 Didaktisches Resümee und Zusammenfassung

„7 Wovon man nicht sprechen kann, darüber muss man schweigen.“²⁵⁸ - wohl das bekannteste Zitat Wittgensteins. Der Umstand, dass dieses Zitat erst zum Schluss der vorliegenden Arbeit seine Veröffentlichung findet, ist prinzipiell logisch: Hält man sich vor Augen, dass der Inhalt dieser Arbeit, breit ausgerollt auf einer Vielzahl beschriebener Seiten, einzig und allein auf die zeitgemäße Beschreibung der physikalischer Theorie der Quanten abzielt, hätte im Grunde auch tatsächlich nur das oben angeführte Zitat ausgereicht. Es ist doch vermessen den Anspruch zu stellen, eine zeitgemäße - damit implizierend: eine bessere - Beschreibung der Quantentheorie entwickeln zu wollen. Wie soll man eine Beschreibung verbessern, wenn doch im Grunde das Beschreibende an sich fehlt. Es wäre ein Kinderspiel, jegliche Bemühungen von sich zu schieben, und sich stattdessen auf Wittgenstein zu berufen - frei nach Ernst Mach, der zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts noch die Vorstellung Boltzmanns, dass alle Materie aus Atomen aufgebaut sei, mit dem Sager "Habens schon eins gesehen?" entkräften konnte. Doch genauso wie Machs Standpunkt in Bezug auf die Existenz von Atomen mit der Zeit widerlegt wurde, und durch die Weiterentwicklung der Forschung sogar zu einer amüsanten Fußnote der Geschichte wurde²⁵⁹, ist es auch bei der aktuellen Beschreibung der Quantentheorie ratsam, nicht zu verweigern, sondern sich kühn einer stringenten Darlegung der Theorie zu widmen.

Im Schulalltag wird man dabei auf eine harte Probe gestellt. Gilt es doch die Quantentheorie in einem ausreichenden Maße adäquat didaktisch aufzubereiten. Adäquat in dem Sinne, dass man sich auf die jeweiligen Schülerinnen und Schülern einstellt. Dabei kann es bereits in der prinzipiellen Gegebenheit diverse Unterschiede geben. Das Vorwissen ist von Gruppe zu Gruppe unterschiedlich, die intrinsische Motivation variiert von Person zu Person, der allgemeine Rahmen des Unterrichts unterscheidet sich je nach Schulzweig, was man zum Beispiel anhand der Wochenstunden, die einem für den Unterricht zur Verfügung stehen, erkennen kann. Doch all diese Aspekte sind reine Makulatur. Allen gemeinsam ist der Umstand, dass die Quantentheorie - sei sie auch noch so elegant aufbereitet - nach wie vor merkwürdig und schwer anschaulich ist.

In der klassischen Physik kann man so gut wie jede „Warum?-Frage“ mit Hilfe eines Alltagsbeispiels oder dem Verweis auf eine anschauliche Analogie beantworten. In der Quantentheorie ist die „Warum?-Frage“ allerdings bereits das Problem an sich. Die Physik der Quanten erlaubt keine Frage nach dem „Warum?“, sie vermag prinzipiell nur das „Wie?“ zu erklären. Feynman erläutert diesen Umstand bereits zu Beginn seiner Vorlesung über die Natur des Lichts, um etwaige zu hoch angetragene Erwartungshaltungen bereits früh auf Normalniveau zu bringen:

²⁵⁸ Wittgenstein, Ludwig: Ein Reader, Tractatus logico-philosophicus, Reclam 1994, S. 45

²⁵⁹ Heute genügt ein Blick in ein Transmissionselektronenmikroskop, um Mach die gebührende Antwort zu geben.

*Ein weiterer Grund, warum sie das, was ich Ihnen vortrage, nicht zu verstehen glauben könnten, mag sein, dass Sie nicht begreifen, warum die Natur so verführt, während ich Ihnen doch beschreibe, wie sie verführt. Das Warum versteht nämlich niemand. Ich kann nicht erklären, warum sich die Natur so und nicht anders verhält.*²⁶⁰

Es gilt somit also die schwierige Aufgabe zu bewältigen, einerseits die Quantentheorie in ihren ganzen Ausmaßen darzustellen, andererseits aber auch den Unterricht so zu gestalten, dass die vermittelten Inhalte für die Schülerinnen und Schüler noch attraktiv erscheinen. Akzeptiert man die Grenzen seiner eigenen Sprache, wie wir sie bei Wittgenstein herausgefiltert haben, akzeptiert man zwar gleichwohl die Grenzen seiner Welt - im konkreten Fall: die Grenzen der Tätigkeit als Lehrperson - allerdings gilt es diesen definierten Rahmen zumindest auszureizen. Dass man im Unterricht nicht auf die Alltagssprache verzichten kann, erscheint logisch. Ebenso liegt eine Vielzahl an Alltagsbegriffen als Mittel zum Zweck parat. Es gilt also den Mittelweg zu finden, zwischen dem was sich noch sagen lässt, und dem was sich gerade nicht mehr sagen lässt. Ein zusätzliches Maß an Verständlichkeit gewinnt man zudem, wenn die Begriffe und Phänomene der Quantentheorie nicht als Exoten der Physik dargestellt werden, sondern vielmehr als einen der wenigen großen Grundpfeiler der Naturwissenschaft. Die Quantentheorie ist ein viel zu wichtiges Kapitel der Physik, als dass man sie durch Misskredit für zukünftige Generationen unattraktiv gestaltet!

Wie übersetzt man nun also die „Sprache der Quantentheorie“ in die „Sprache der Schule“? Ein Großteil des mathematischen Apparates wird dabei aufgrund der Komplexität vermutlich außen vor bleiben, die Frage ist, in welchem Ausmaß gelingt eine derartige Übersetzung dennoch? Sprichwörtlich drängt sich sofort der italienische Gedanke „Traduttore, Traditore!“ (Übersetzung ist Verrat!) auf. Der deutsche Physiker und Aphoristiker Georg Christoph Lichtenberg (1742-99) merkt dazu versöhnlich an:

Ist es nicht sonderbar, dass eine wörtliche Übersetzung fast immer eine schlechte ist? Und doch lässt sich alles gut übersetzen. Man sieht hieraus, wie viel es sagen will, eine Sprache ganz verstehen; es heißt, das Volk ganz kennen, das sie spricht.

Ein konsequenter Weg beginnt demnach damit, die moderne Physik bereits früh in den Physikunterricht einfließen zu lassen. Der Umgang mit naturwissenschaftlichen Begriffen und Formulierungen mag in gewisser Weise für Jugendliche abschreckend wirken. Umso mehr sind diese bereits in der Unterstufe zu erwähnen, um ihnen quasi den Mantel des Schreckens zu nehmen. Dass in einer derartigen Didaktik natürlich von Anfang an auch die Mathematik zumindest in einer gewissen Form ihren Platz finden muss, liegt auf der Hand. Erteilt einem doch Galileo Galilei höchstpersönlich die Erlaubnis, indem er feststellt:

*Die Philosophie steht in jenem großen Buch geschrieben, das uns ständig offen vor Augen liegt (ich spreche vom Universum) [...]. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben.*²⁶¹

²⁶⁰ Feynman, Richard P.: QED - Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie, Piper Verlag, 14. Auflage 2009, S. 20

²⁶¹ Munowitz, Michael: Physik ohne Formeln, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 2005, S. 13

Isaac Newton schaffte es nicht, seine Himmelsmechanik ohne Einführung der Differenzialrechnung zu formulieren. Michael Faraday scheiterte am entscheidenden Schritt zur vollständigen Beschreibung einer elektro-magnetischen Theorie, da ihm die notwendige Mathematik fehlte. Diese wurde erst im Nachhinein von James Clark Maxwell nachgeliefert. Albert Einstein musste sich erst die Sprache der nichteuklidischen Geometrie aneignen, um die Allgemeine Relativitätstheorie zu formulieren.²⁶² Die Physik kommt nun mal nicht ohne die Mathematik aus. Allerdings bedeutet dies im Umkehrschluss nicht, dass das Universum für nicht „Eingeweihte“ ein Buch mit sieben Siegeln bleiben muss. Sich über die Schwierigkeit der mathematischen Beschreibung den Kopf zu zerbrechen obliegt tatsächlich den Naturwissenschaftlern. In der Schule genügt die Beschränkung auf die Darstellung einer Welt, in der Abstoßung und Anziehung, Gewissheit und Wahrscheinlichkeit, Beständigkeit und Wandel vorherrschen. Wo Äpfel zu Boden fallen, und Atomkerne zerfallen, wo Quarks, Photonen und Elektronen zu Hause sind. Eine Welt, in der strenge Regeln herrschen, aber dennoch der Zufall König ist.

Und über all dies hüllen sich die Worte Heisenbergs, mit denen er seiner Biographie den Schlusspunkt setzt:

*V. Holst hatte seine Bratsche geholt, er setzte sich zwischen die beiden jungen Menschen und begann, mit ihnen jene von dem jugendlichen Beethoven geschriebene Serenade in D-dur zu spielen, die von Lebenskraft und Freude überquillt und in der sich das Vertrauen in die zentrale Ordnung überall gegen Kleinmut und Müdigkeit durchsetzt. In ihr verdichtet sich für mich beim Zuhören die Gewissheit, dass es, in menschlichen Zeitmaßen gemessen, immer wieder weitergehen wird, das Leben, die Musik, die Wissenschaft; auch wenn wir selbst nur für kurze Zeit mitwirken können - nach Niels' Worten immer zugleich Zuschauer und Mitspieler im großen Drama des Lebens.*²⁶³

²⁶² Vgl. Munowitz, Michael: Physik ohne Formeln, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 2005, S. 14

²⁶³ Heisenberg, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971, S. 334

7 ANHANG

Die Appendix findet sich üblicherweise
im rechten Unterbauch, liegt intraperitoneal
und weist ein eigenes Mesenterium, das Mesoappendix, auf.

Bibliographie

APOLIN, Martin: Die Sprache in Physikschulbüchern unter besonderer Berücksichtigung von Texten zur speziellen Relativitätstheorie. Unveröffentlichte Dissertation, Wien 2002

APOLIN: Big Bang 7, öbvht 2008

ARISTOTELES, drittes Buch der Metaphysik

AUDRETSCH, Jürgen: Die sonderbare Welt der Quanten, C.H. Beck oHG, München 2008

BEZZEL, Chris: Wittgenstein, Grundwissen Philosophie, Reclam 2007

CAPRA, Fritjof: Das Tao der Physik, Die Konvergenz von westlicher Wissenschaft und östlicher Philosophie, Droemersch Verlagsanstalt Th. Knaur Nachf., München, 1997

DEMTRÖDER, Wolfgang: Experimentalphysik 1, Springer Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2004

DEMTRÖDER, Wolfgang: Experimentalphysik 2, Springer Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2004

EINSTEIN Albert, INFELD Leopold: Die Evolution der Physik, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 19. Auflage, 2004

EINSTEIN, Albert: Mein Weltbild, Ullstein Taschenbuch 2005, 29. Auflage

FEYNMAN, Richard P.: Physikalische Fingerübungen für Fortgeschrittene, Piper Verlag, 2. Auflage 2006

FEYNMAN, Richard P.: QED - Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie, Piper Verlag, 14. Auflage 2009

FEYNMAN, Richard P.: Vom Wesen physikalischer Gesetze, Piper Verlag, 7. Auflage 2005

FRIEDENTHAL, Richard: Goethes Werke in zwei Bänden, Erster Band, Faust - Der Tragödie erster Teil, Dromersche Verlagsanstalt München Zürich, 1957

FRITSCH, Harald: Elementarteilchen, Bausteine der Materie, CH Beck Verlag, München, 2004

GANTEN Detlev, DEICHMANN Thomas, SPAHL Thilo: Naturwissenschaft, Alles was man wissen muss, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 2005

GRAYLING, A.C.: Wittgenstein, Verlag Herder, Freiburg im Breisgau, 1999

GRIBBIN, John: Auf der Suche nach Schrödingers Katze, Quantenphysik und Wirklichkeit, Piper Verlag, München, 2. Auflage, 2004

HEINRICH, Richard: Wittgensteins Grenze, Deuticke 1993

HEISENBERG, Werner: Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik, Piper & Co. Verlag, München, 1971

HEISENBERG, Werner: Physik und Philosophie, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 7. Auflage, 2007

JAROS, NUSSBAUMER, NUSSBAUMER, KUNZE: Physik Compact Basiswissen 7, öbvht 2007

KANT, Immanuel: Prolegomena zu einer jeden künftigen Metaphysik, die als Wissenschaft wird auftreten können

KANT, Immanuel: Was ist Aufklärung

KREISLER, Georg: Letzte Lieder, Autobiographie, Arche Literatur Verlag, Zürich, Hamburg, 2009

KUHN, Thomas S.: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1979

KUNZMANN, Peter, Burkard Franz-Peter, Wiedmann Franz: dtv-Atlas Philosophie, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 12. Auflage 2005

LUDWIG, Ralf: Kant für Anfänger, Die Kritik der reinen Vernunft, DTV, München, 8. Auflage, 2002

MUNOWITZ, Michael: Physik ohne Formeln, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 2005

OESER, Erhard: Wissenschaftstheorie als Rekonstruktion der Wissenschaftsgeschichte, Band 2, Oldenbourg Verlag Wien München, 1979

PIETSCHMANN, Herbert: Geschichten zur Teilchenphysik, Physiker sind auch nur Menschen, Ibero Verlag, Wien, 2007

PIETSCHMANN, Herbert: Phänomenologie der Naturwissenschaft, Wissenschaftstheoretische und philosophische Probleme der Physik, Ibero 2007, 2. erweiterte Auflage

PIETSCHMANN, Herbert: Quantenmechanik verstehen, Eine Einführung in den Welle-Teilchen-Dualismus für Lehrer und Studierende, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2003

POPPER, Karl Raimund: Alle Menschen sind Philosophen. Piper Verlag, München, 4. Auflage, 2006

RAATZSCH, Richard: Ludwig Wittgenstein zur Einführung, Junius 2008

SCHIEHMANN, Gregor: Werner Heisenberg, CH Beck Verlag, München, 2008

SCHULTZ, Uwe: Kant, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 1984

SEXL, KÜHNELT, STADLER, SATTLBERGER: PHYSIK 7, öbvht 2007

TIPLER Paul A., MOSCA Gene: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Akademischer Verlag, München, 2. Auflage, 2006

VOCELKA, Karl: Österreichische Geschichte, CH Beck Verlag, München, 2. Auflage, 2007

WARTBURTON, Nigel: Philosophie: Die Klassiker, Von Platon bis Wittgenstein, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 2000

WITTGENSTEIN, Ludwig: Ein Reader, Reclam 1994

WITTGENSTEIN, Ludwig: Über Gewißheit, Werkausgabe Band 8, Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft, Frankfurt am Main, 1984

WOLNY, Christian: Wissenschaftliche Nachrichten, Fortbildungsorgan des Bundesministeriums für Unterricht, Kunst und Kultur für AHS- und BHS-Lehrer, Nr. 137 November/Dezember, Wien, 2009

ŽMEGAC Viktor, ŠKREB Zdenko, SEKULIC Ljerka: Kleine Geschichte der deutschen Literatur, Von den Anfängen bis zur Gegenwart, Scriptor Verlag, Frankfurt am Main, 1981

http://www.bmukk.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_ahs_oberstufe.xml, Stand: 07.09.2009

http://www.bmukk.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_ahs_oberstufe_alt.xml, Stand: 07.09.2009

<http://www.f davidpeat.com/interviews/heisenberg.htm>, Stand: 18.08.2009

<http://www.lrz-muenchen.de/~hgvm/Hegel-PhG.pdf>, Stand: 21.02.2010

<http://www.oebv.at/sixcms/list.php?page=titelfamilie&snv=5&ssnv=5&titelfamilie=Big+Bang>, Stand: 25.01.2010

<http://www.oebv.at/sixcms/list.php?page=titelfamilie&snv=5&ssnv=5&titelfamilie=Physik+compact>,
Stand: 25.01.2010

<http://www.oebv.at/sixcms/list.php?page=titelfamilie&snv=5&ssnv=5&titelfamilie=Sexl+Physik>,
Stand: 25.01.2010

<http://www.zeno.org/Philosophie/M/Fichte,+Johann+Gottlieb/Grundlage+der+gesamten+Wissenschaftslehre/1.+Grunds%C3%A4tze+der+gesamten+Wissenschaftslehre/%C2%A7+1.+Erster,+schlechthin+unbedingter+Grundsatz>, Stand: 18.02.2010

Angaben zum Autor

Gerfried Wiener

Geburtsdatum: 13.11.1985

Geburtsort: St.Veit/Glan

Staatsbürgerschaft: Österreich

Lebenslauf

seit 02/2009	Lehrtätigkeit am GRG 21 Bertha von Suttner - Schulschiff, Donauinselplatz 1, 1210 Wien
2008 – 2010	Tutor, Fachdidaktik und e-Learning Universität Wien - Fakultät für Physik
2004 – 2010	Studium der Unterrichtsfächer Physik, Psychologie und Philosophie an der Universität Wien
1996 – 2004	BG/BRG St.Veit/Glan
1991 – 1995	Volksschule St.Veit/Glan