

2

1933

Die Wandlung des Begriffssystems der Physik.

~~Entropie, Feinstrukturkonstante, die Schleuderungsquotient, Induktion u.s.w.  
von ~~Hans Thirring~~ Hans Thirring.  
Nur unter Zuhilfenahme von Begriffe sind wir in der Lage, physikalische  
Ergebnisse exakt zu benennen, ~~die~~ sind die Voraussetzung der wissenschaft-~~

Von einem Vortragenden, der sich an ein größeres Publikum wendet, verlangt die Zuhörerschaft meist einen möglichst gedrängten Bericht über den neuesten Stand des Gebietes : Ganz frisch aus dem Ofen gebacken, wie die Semmeln und die Morgenzeitung zum Frühstück soll dem Zuhörer serviert werden, was sich in der letzten Zeit ereignet hat, oder womöglich, was morgen geschehen wird. Gegen diesen Appetit nach Neuesten vom Neuen wendete sich kürzlich der bekannte Physiker Millikan, ~~in einem~~ indem er ganz ~~speach über den~~ Service, den wissenschaftlichen Nachrichtendienst der Amerikaner. Millikan sagt ganz mit Recht, daß zu einer wahren Volksbildung nicht so sehr die Verbreitung der wissenschaftlichen Neuigkeiten als vielmehr der wichtigsten "Altigkeiten" erforderlich sei. Nicht allein die allerneuesten Ideen, sondern vor allem die wichtigsten grundlegenden Ideen, mögen sie alt oder neu sein, müssen immer wieder und wieder gepredigt werden, um das Publikum in naturwissenschaftlichem Geiste zu erziehen. Nun ist es ja allerdings nicht der Zweck des heutigen Abends, Ihnen einen Vortrag über klassische Physik zu bringen, wir wollen uns vielmehr mit der krisenhaften Gegenwart und mit der sich in unserer Zeit vollziehenden Wandlung des Begriffssystems der Physik beschäftigen. Trotzdem muß ich aber ein bißchen weiter ausholen und auf einige Jahrzehnte in die Vergangenheit zurückgräifen, um Ihnen die Ursache und das Wesen der Krise wenigstens andeutungsweise schildern zu können. Um das gründlich zu machen, würde man eine Vorlesung durch ein ganzes Semester halten müssen; was ich Ihnen hier innerhalb einer kurzen Stunde bringen kann, ist ein recht lückenhafter Bericht, mehr oder weniger Streiflichter und aphoristische Geistesblitze; was ich bestenfalls leisten kann ist das, was ein geschickter Karikaturenzeichner macht mit einigen Strichen die markantesten Züge unseres Gebietes zu zeichnen, wobei freilich die feineren Details verloren gehen müssen.

Zunächst einige Worte über die Bedeutung des Begriffssystems in der Physik : Wir verstehen darunter das System der in der theoretischen Physik verwendeten Begriffe wie Kraft, Impuls, Geschwindigkeit, Temperatur,

# Die Wandlung des Begriffssystems der Physik

von

Hans Thirring.

Die letzten Jahrzehnte physikalischer Forschung haben jene Fülle von neuem, zum Teil ungeahntem Tat- sachenmaterial zutage gefördert, über das Ihnen Herr Mark im ~~d~~ ersten Vortrage dieser Serie berichtet hat. Wir wollen uns nun heute mit der Frage beschäftigen, welche Umbildung an dem Begriffssystem der Physik vorgenommen werden mußte um den neu beobachteten Tatsachen Rechnung zu tragen. Dabei müssen wir uns allerdings angesichts des Umfanges dieses Stoffes auf einen recht lückenhaften Bericht beschränken; was ich Ihnen hier bestenfalls geben kann, ist das, was ein geschickter Karrikaturenmaler leistet mit einige Strichen die markantesten Züge des betreffenden Gebietes zu zeichnen, wobei freilich die feineren Details verloren gehen müssen.

Zunächst einige Worte über die Bedeutung des Begriffssystems in der Physik: Wir verstehen darunter das System der in der theoretischen Physik verwendeten Begriffe, wie Kraft, Impuls, Geschwindigkeit, Temperatur,

Anm. f. d. Setzer:

— Sperrdruck (für Eigennamen)  
nur Kursiv

Entropie, Feldstärke, Wellenfläche, Brechungsquotient, Induktion u.s.w. Nur unter Zuhilfenahme dieser Begriffe sind wir in der Lage, physikalische Erscheinungen exakt zu beschreiben, ~~und~~ sie sind die Vokabeln der wissenschaftlichen Sprache des Physikers und sind als solche ebenso unentbehrlich wie die gewöhnlichen Vokabeln unserer Umgangssprache zur Darstellung irgend eines Tatbestandes des Alltagslebens.

Der Inhalt der Naturlehre gipfelt ja in Aussagen über Relationen zwischen einzelnen Begriffen. So können wir beispielsweise das Galilei-Newton'sche Grundgesetz der Mechanik in die Form ~~der~~ kleiden : Das Produkt aus Masse mal Beschleunigung eines Körpers ist gleich der auf ihn wirkenden Kraft. Das Energieprinzip für konservative Systeme sprechen wir in der Form aus : Die Summe aus kinetischer und potentieller Energie ist konstant, u.s.w. Dasjenige, was wir also Naturgesetz nennen, sind bestimmte Behauptungen über Relationen, die zwischen den einzelnen physikalischen Begriffen bestehen. Der Physiker hat diese Behauptungen so zu wählen, daß er die physikalischen Erscheinungen dadurch möglichst exakt, richtig und dabei möglichst einfach beschreibt; im übrigen sind ihm aber hinsichtlich der Auswahl der dabei verwendeten Begriffe von vorneherein gar keine Vorschriften gemacht. Er kann sie selbst nach seinem Gutdünken bilden und je nach der Art, wie sich ~~dann~~ die Begriffe und die mit ihrer Hilfe formulierten physikalischen Gesetze bewähren, gehen sie ~~dann~~ allmählich in den gesicherten Besitzstand der Physik über oder verschwinden mit der Zeit wieder aus der Literatur.

Aus dieser Willkür in der Wahl des Begriffssystems ergibt sich folgender bemerkenswerter Umstand, den man sich eigentlich öfters vor Augen halten sollte, als es tatsächlich geschieht : Die Physik, die sich ja mit den Erscheinungen der unbelebten Natur, mit den Wechselwirkungen von Kraft, Materie, Strahlung u.s.w. beschäftigt, ist hinsichtlich ihres Gegenstandes eine Art Universalwissenschaft : Die Physik beschäftigt sich mit den Erscheinungen der unbelebten Natur, mit Wechselwirkungen von Kraften, Materie, Strahlung usw. ~~beschäftigt~~ Unter gleichen äußeren Bedingungen muß sich irgend ein physikalischer Vorgang nicht nur in Amerika so wie in Europa, sondern auch auf den fernsten ähnlich gearteten Objekten im Weltraum genau so abspielen wie auf der Erde. Diese Universalität, dieser kosmische Gültigkeitsbereich bezieht sich aber nur auf das Naturgeschehen als solches, also auf das

hypothesen über den inneren, unserer Beobachtung nicht zugänglichen Objekt der physikalischen Wissenschaft. Die Physik als Lehrgebäude ist daher mechanismus der Vorgänge macht (man denkt z.B. an das Atommodell) gegen eine durchaus humane Wissenschaft mit anthropomorphen Zügen, die andererseits schafft ~~es~~ oder erfindet er jene Begriffe, für deren Hilfe all auf der Welt ganz anders aussehen kann. Wenn es also fern draußen im Weltraum auch ~~XX~~ andere bewohnbare Planeten gibt, was angesichts einer Zahl von rund  $10^{23}$  Fixsterne<sup>n</sup> in der Welt ziemlich wahrscheinlich ist, und wenn es auf ihnen Lebewesen ähnlicher geistiger Entwicklung wie die Menschen gibt, so würde wahrscheinlich jede dieser Weltenkolonien ihre eigene Physik gebildet haben, deren Begriffe sich von unseren sehr weitgehend unterscheiden, so weitgehend, daß wir sie uns in unserer Phantasie gar nicht vorstellen können. Denn die elementaren Grundbegriffe, mit denen die Naturwissenschaft operiert, würden uns von Kindheit an eingeimpft und sind so mit unserem geistigen Aufbau nicht mehr hypothetisch, sondern rein empirisch. Sie sind uns in den Leben verwurzelt, daß wir uns von ihnen nie mehr ganz emanzipieren können, obwohl allerdings in einzelnen feinen Verästelungen des Begriffssystems, fern vom ursprünglichen Stamm, immer wieder neue Begriffe entstehen können. Ein von nichtirdischen Lebewesen errichtetes physikalisches Lehrgebäude könnte aber von den Fundamenten angefangen ~~radikal~~ anders konstruiert sein, wie das unsere.

Aus diesem Grunde ist es auch nicht ganz richtig, wenn man sich vorstellt, die Tätigkeit des Forschers bestehe darin, die Gesetze der Natur zu erforschen, ähnlich wie ein Geograph unbekannte Gegenden erforscht. Die theoretische Physik ist also durchaus ein menschliches Produkt, sie ist noch dazu bis zu einem gewissen Grade ein Zufallsprodukt, der Unterschied liegt darin, daß die unerforschten Gegenden, sagen wir der Munich, ganz unabhängig vom Forscher fix und fertig daliegen und - abgesehen vom ~~Klimawechsel~~ Klimawechsel - eine ganz bestimmte, Physik ist, wie Mach immer betont, durch eine Zuchtwahl, durch natürliche gegebene Beschaffenheit haben, die sich dem Forscher eindeutig offenbaren muß, sobald er zu ihnen vordringen kann. Die Naturgesetze sind dagegen Maßnahmen, die sich als nützlich erweisen, die Übrigens wandern in der nicht von vornherein fix und fertig vorgegeben, sondern werden vom Physiker großen Papierkorb und ~~s~~aten mit der Zeit wieder in Vergessenheit selbst erst gemacht. Dajenige, was von der Natur an sich schon eindeutig vorgegeben wird, ist der Ablauf der Erscheinungen. Der Experimentalphysiker leistet reine Forschungsarbeit, indem er den Ablauf gewisser physikalischer Ideen sichtlos vorlibergibt und andererseits ~~bestimmt~~ Versuchsbestimmungen studiert. Der Theoretiker hingegen, der die Gesetze der Vorgänge finden soll, leistet eine Arbeit, die ein Mittelstellung zwischen reinem Forschen und einer anderen Betätigung einnimmt, die eher mit Erfinden, Dichten oder Komponieren zu vergleichen wäre. Denn einerseits betätigt er seine Phantasie, in der er Theorien halten können, die sich zur Naturbeschreibung wenden.

Auf alle Fälle aber - ob mit guter oder mit schlechter Zuchtwahl - Hypothesen über den inneren, unserer Beobachtung nicht direkt zugänglichen Mechanismus der Vorgänge macht (man denke z. B. an das Bohrsche Atommodell) Andererseits schafft ~~der~~ oder erfindet er jene Begriffe, mit deren Hilfe die Beschreibung der Naturvorgänge vollzogen werden; mit anderen Worten : Er prägt die Vokabeln für die Naturgesetze. Ich erwähne, daß ~~die~~ Beispiel ~~heranzu~~<sup>um ein</sup> ~~nebenbei~~, dazu Zeiten von Faraday und Maxwell neben den ohne weiters ~~sicher~~ verständlichen Begriffen der elektrischen und magnetischen Feldstärke noch Begriffe wie elektrische Verschiebung, magnetische Induktion~~at~~, Maxwellsche Spannungen u.s.w., eingeführt worden sind, ~~die~~ übrigens damals unter Grundlegung der Äthervorstellung eine ziemlich konkrete, anschauliche Bedeutung, allerdings mit hypothetischem Charakter hatte, während sie in der jetzigen Auffassung nicht mehr hypothetische, sondern rein Phänomenologische ~~die den Physikern vom~~ aber ziemlich abstrakte Begriffe darstellen. Sie sind ~~und~~ heute ein unhe ~~sehr~~ ding notwendiger Behelf geworden, denn gerade sie gehen als ~~abhängige~~ Variablen in die Maxwellschen Differentialgleichungen des elektromagnetischen ~~Aussage machen~~ Feldes ein, - ohne sie wären wir in äußerster Verlegenheit, wie man die elektromagnetischen Erscheinungen beschreiben könnte. Ich sage ausdrücklich wir, denn in der Physik ~~XXXX~~ der Bewohner eines Sirius-Planeten brauchten diese Begriffe überhaupt nicht vorzukommen.

Die theoretische Physik ist also durchaus ein menschliches Geistesprodukt, sie ist noch dazu bis zu einem gewissen Grade ein Zufallsprodukt, in ähnlichem Sinne wie die ganze Welt der Lebewesen unseres Planeten ein Zufallsprodukt ist. Denn auch das Begriffssystem der theoretischen Physik ist, wie Mach immer betont, durch eine ~~Zucht~~ <sup>Art</sup> Zuchtwahl, durch natürliche Auslese des Besten entstanden. Es werden jene Begriffe von der Wissenschaft übernommen, die sich als nützlich erweisen, die übrigen wandern in den großen Papierkorb und geraten mit der Zeit wieder in Vergessenheit. - Dabei ist es ~~gar~~ nicht sicher, ob die Auslese auch im einzelnen immer unfehlbar das Richtige trifft. Es ist leicht möglich, daß man an manchen guten Ideen achtlos vorübergegangen ist und andererseits mag es vorkommen, daß manche Begriffe nur so aus Gewohnheit mitgeschleppt werden, wie man Möbelstücke in der Wohnung beläßt, auch wenn ~~man~~ sie gar nicht mehr brauchen kann. Im großen und ganzen kann man wohl sagen, daß die Wissenschaftler einen guten Instinkt haben und daß sich auf Dauer nur jene Begriffe und jene Theorien halten können, die sich zur Naturbeschreibung wirklich gut eignen.

Auf alle Fälle aber - ob mit guter oder mit schlechter Zuchtwahl - ist das Begriffssystem ständig im Fluß und in der Entwicklung begriffen. Unsere zunehmenden Kenntnisse vom Naturgeschehen erfordern die Neueinstellung immer weiterer Begriffe in den Dienst der Theorie. Dabei ist natürlich eine Tendenz zu fortschreitender Abstraktion zu beobachten; mit fortschreitender Komplikation der Theorie werden die Begriffe immern abstrakter und unanschaulicher.

In den Anfängen der theoretischen Physik, zu Zeiten von Galilei und Newton, operierte man in erster Linie noch mit Begriffen, die aus unmittelbaren Anschaung aus Sinnesempfindung hervorgegangen sind. Ich nenne nur die Begriffe : Geschwindigkeit, Beschleunigung, Trägheit, Kraft, Masse, Gewicht, Wucht, Gravit, lebendige Kraft, Aether, Temperatur und dergl. Es handelt sich da um Begriffe, denen auch die Nichtphysiker ohne weiteres einen gewissen Sinn beilegen können. Mit zunehmender Verfeinerung der mathematischen Methoden der Physik erwies es sich nun als zweckmäßig, weitere Begriffe einzuführen, die aus den ursprünglichen elementaren Grundbegriffen durch mathematische Operationen hervorgehen, die also Produkte einer Abstraktion vorganges sind. In der folgenden Tabelle sind willkürlich neue Begriffe Kontprobe einige Beispiele physikalischer Begriffe aus den drei Teilgebieten zusammengestellt. Mechanik, Elektrizität und Wärme aufgelistet, wobei zu oberst die Elementargrundbegriffe stehen, während nach unter hin die durch weitere Abstraktion hergeleiteten Begriffe angeordnet sind. Jeder von Ihnen wird mit den unter dem Strich stehenden Begriffen ganz leicht eine bestimmte Vorstellung verknüpfen können, während die unter dem Strich stehenden Begriffe sicher auch für manche sonst hochgebildete Leute, die physikalische Laien sind, leere Worte ohne vorstellbaren Inhalt bedeuten.

Mechanik ist ein ganz altes Fach, das man erwartet werde in

Geschwindigkeit	Ladung	Temperatur
Masse	Feldstärke	Wärmemenge
Kraft	Spannung	spez. Wärme
Dichte	Strom	Volume
Energie	Widerstand	Druck

Trägheitsmoment	Gegeninduktivität	Polytrop
Spannungstensor	Widerstandsoperator	Adiabate
Lagrange-Funktion	Vektorpotential	Thermodynam. Koeffiz.
Hamilton-Funktion	Strahlvektor	Entropie
Wirkungsintegral	Maxwellsche Spannung	Freie Energie
Kanonische Variable	Feldimpuls	Stoffpotentiale

VerüstlungSublimierung

- 6 -

Diese Verüstlung und Stabilisierung des Begriffssystems durch fortschreitende Abstraktionen haben nun an sich mit der Krise, von der wir hier reden, gar nichts zu tun. Sie ist ein Prozeß, der sich in der Physik ganz genau so wie in anderen Wissenschaften vollzieht. In der Mathematik, in den anderen Zweigen der Naturwissenschaften, in der Biologie und auch in den Geisteswissenschaften, wie Philosophie, Rechtswissenschaft, Soziologie erweitert und vereinfacht sich das Begriffssystem ungefähr in ähnlicher Weise.

Jede einzelne dieser Wissenschaften könnten wir mit einem Bäumchen vergleichen, das immer neue Knospen und Zweige ansetzt und sich so beim Wachsen immer mehr verästelt. Auch das Verdorren einzelner Zweige findet sein Analogon in der Wissenschaft, dort, wo irgendwelche, sich als unnütz erwiesene Begriffe und Hypothesen wieder abgestoßen werden und in Vergessenheit geraten. Das organische Wachstum des Begriffssystems einer Wissenschaft ist ein völlig normaler Vorgang, der ständig auch in nicht krisenhaften Zeiten stattfindet. Die Besonderheit in der Entwicklung der Physik der letzten Jahrzehnte liegt nun aber darin, daß unser Bäumchen plötzlich ganz bizarre Formen annimmt, daß das organische Wachstum nicht mehr auf der bisherigen Linie weitererfolgt, sondern ganz eigenartige Wege einschlägt.

Der Beginn dieser neuen Entwicklung fällt, so weit es die experimentelle Seite der Physik betrifft, in die Neunzigerjahre des vorigen Jahrhunderts. Wie schon Kollege Mark im letzten Vortrag bemerkt hat, war man so um 1895 herum der Meinung gewesen, daß die Physik im großen und ganzen fertig sei und daß man auf diesem Gebiet im wesentlichen nur mehr Details aber kaum mehr grundlegend Neues erlernen könne. Nun hier! Wie so oft im Leben, ist es ganz anders gekommen, als man es erwartet hat, gerade in jenem Moment, wo man glaubt hat, der Roman sei beim happy end angelangt, haben sich ganz neue Verwicklungen und spannende Situationen ergeben, aus denen wir heute noch keinen Ausweg erblicken können.

Die Schicksalsstunde der Physik schlug im Jahre 1895, als C. W. Röntgen in Würzburg die denkwürdige Entdeckung machte, daß die Kathodenstrahlen erregten Sekundärstrahlung imstande sei, undurchsichtige Körper zu durchdringen und einen dahinter angebrachten Fluoreszenzschirm zum Leuchten zu bringen. Was diese Entdeckung für die Medizin bedeutet hat, braucht man wohl erst niemandem zu sagen. Für die Physik war nicht so sehr Röntgens Entdeckung an sich von entscheidender Bedeutung als vielmehr der Impuls, den sie der

revolutionärer Rinnstein nach so weitreichen revolutionären, die entzündeten sich viele weiteren physikalischen Forschung gegeben hat, ein Impuls, der eine ganz neue Epoche dieser Wissenschaft eingeleitet ~~hat~~. Röntgens Entdeckung hatte nämlich das Interesse der Physiker für jene Substanzen geweckt, die Fluoreszenzstrahlung verursachen. Der französische Physiker ~~Max~~ Becquerel ~~Max~~ in Paris fand, daß Uransalze ganz von selbst eine Strahlung aussenden, die Fluoreszenz erregt, <sup>und</sup> in konsequenter Verfolgung der Becquerelschen Versuche konnte das Ehepaar Curie im Jahre 1898 das Wunder des Radiums entdecken. Die weitere Entwicklung ist zunächst den englischen Forschern, in erster Linie Rutherford zu verdanken. Von Rutherford und Soddy stammt die Erkenntnis des Atomzerfalls, Rutherford gelangte durch Versuche mit radioaktiven Strahlen zur Konzeption seines Kernmodells des Atoms, <sup>worauf</sup> Bohr hat dann durch Anwendung der Planckschen Quantenhypothese auf das Rutherford'sche Kernmodell die Enträtselung der Spektren erfolgreich beginnen ~~könnte~~. Inzwischen waren durch Laue's Entdeckung der Röntgeninterferenzen als neues empirisches Material die Röntgenspektren hinzugekommen, die sich, wie namentlich Sommerfeld zeigte, ausgezeichnet in das von Bohr konzipierte Bild der Spektralgesetze <sup>empfingen</sup>, hineinpasst und von jener Zeit an, also von ungefähr 1913 an, begann die Flut neuer Erkenntnisse, Spekulationen, Theorien und Experimentaluntersuchungen über uns hereinzubrechen, die mit der Quantentheorie zusammenhängen und die die Physiker und zum Teil auch die Chemiker seitdem dauernd in Atem halten. deutet Parallel mit jener Entwicklung läuft auch jener Relativitätstheorie, die im Jahre 1905 einsetzte und schon 10 Jahre später von ihrem Schöpfer, selbst mit der Aufstellung der allgemeinen Relativitätstheorie zu einem gewissen Abschluß gebracht worden ist. Alles in allem kann man jedenfalls sagen, daß die Zeit von 1895 bis heute für die Physiker wie übrigens auch für die Techniker eine an Überraschungen und Aufregungen reiche, äußerst fruchtbare Zeit gewesen ist, und daß wir heute noch gar nicht absehen können, wann diese Epoche neuer überraschender Entdeckungen zum Abschluß kommen wird.

Wir können die neuen Erkenntnisse, die in dieser Forschungsperiode der letzten 3 - 4 Jahrzehnte gewonnen worden sind, ohne Rücksicht auf das spezielle physikalische Teilgebiet, nur nach dem Grade ihres revolutionären Charakters, etwa in drei Kategorien einteilen. Dabei ergibt sich folgender bemerkenswerter Umstand: Gerade jene von den neu entdeckten Tatsachen, die am offenkundigsten und auch für den Laien ganz deutlich im Widerspruch mit den Dogmen der sogenannten klassischen Physik stehen, sind in rein be-

grifflicher Hinsicht noch am wenigsten revolutionär, sie entpuppen sich vielmehr bei näherer Betrachtung als ganz harmlos. Die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie, die von dem staunenden Laien oft als der Gipfelpunkt des Absurden und gedanklich Verwogenen betrachtet wird, nimmt in dieser Hinsicht eine Art Mittelstellung ein, während manche an sich vollkommen ~~unwahrscheinlich~~ unscheinbar aussehende und knapp an der Grenze der Beobachtungsmöglichkeit stehenden Erscheinungen der Quantenphysik eine vollkommene Revolutionierung unseres Begriffssystems bewirkt und die theoretische Physik in eine Art Sackgasse geführt haben, in der sie gegenwärtig noch steckt, ohne daß die gescheitesten Köpfe unserer Wissenschaft einen Ausweg wissen.

Als Beispiel für die heueren Erkenntnisse der ersten Kategorie betrachten wir die höchst interessanten Lehren, die wir aus dem Studium der radioaktiven Erscheinungen gewonnen haben. Die auf diesem Gebiet gewonnenen Ergebnisse haben eines der Grunddogmen der Physik und Chemie erschüttert und ad absurdum geführt, an das man bis zur Jahrhundertwende so sicher geglaubt hatte, daß jeder ausgelacht worden wäre, der es gewagt hätte, daran zu zweifeln. Dieses Dogma lautet : Die chemischen Elemente sind einheitliche Stoffe von bestimmten Atomgewicht; eine gegenseitige Verbindung von Elementen ineinander ist prinzipiell ausgeschlossen. Wie man heute weiß, sind beide Hälften dieses Gesetzes falsch. Nämlich 1.) Die Elemente können ineinander ~~umgewandelt werden~~ <sup>handlung</sup>; man kennt heute außer den drei radioaktiven Umwandlungsreihen noch eine Reihe anderer Elementverbindungen, die künstlich erzeugt werden können. und 2.) Es ist gar nicht wahr, daß alle Elemente einheitliche Stoffe sind; die meisten sind vielmehr sogenannte Isotopengemische, sie setzen sich aus Bestandteilen mit verschiedenem Atomgewicht aber gleicher Kernladungszahl zusammen. Eines der Grunddogmen der Chemie des 19. Jahrhunderts wird also durch unsere neueren Einsichten so kategorisch dementiert, wie eine falsche Zeitungsmeldung durch eine tatsächliche Berichtigung nach ~~dem~~ § 12 des Pressegesetzes.<sup>7</sup>

Und doch gehören die neueren Erkenntnisse über Isotopen und Elementverbindungen in rein begrifflicher Hinsicht noch zu den harmlosesten Ergebnissen, die uns die Physik der letzten Jahrzehnte gebracht hat. Sie bringen eine Bereicherung unseres Wissens ohne unser Denken umstüdzend zu beeinflussen. Denn im Grunde genommen lehren sie uns nur, daß die Atome der Elemente nicht die letzten unteilbaren Bausteine der Materie sind, was man ja schon nach den Ergebnissen der Ionentheorie voraussehen konnte. Die Resultate der

Isotopenforschung sind sogar geeignet, unser Weltbild hinsichtlich des Aufbaus der Materie wesentlich zu ~~MAKKE~~ vereinfachen, indem sie die Vorstellung ermöglichen, daß alle materiellen Körper letzten Endes aus den beiden Urbausteinen, Elektron und Proton, zusammengestzt sind. Die neueren Erkenntnisse über Isotopie und über Elementveränderung sind also mehr erfreulich als aufregend. Wenn sie die einzigen Ergebnisse der letzten Jahrzehnte physikalischer Forschung wären, so könnte man nur von einem Zeitalter der wachsenden Aufklärung und Evolution, aber nicht von einer Krise reden. Aus diesem Grunde hat Herz auch Kollege Mark in seinem Vortrag mit vollem Recht diese hier genannten Ergebnisse, so interessant sie auch sonst sein mögen, nicht unter jenen Experimentellen Tatsachen aufgezählt, die eine Erschütterung der klassischen Physik bewirkt haben. die auf dem im ersten Vortrag erwähnten negation Ausfall des Michelsonversuches basiert und

Etwas ernsthafter sieht schon die Lage bei der Relativitätstheorie aus, die bis zu einem gewissen Grade auch hinsichtlich der Begriffe umstürzlerisch gewirkt hat. Ich kann im Rahmen dieses Vortrages der Relativitätstheorie nicht mehr als eine Viertelstunde widmet, es ist daher ganz ausgeschlossen, daß ich Ihnen hier in aller Geschwindigkeit auch nur das Ideengerippe dieser dargelegt wird. Ich muß diesbezüglich jene, die sich näher dafür interessieren, auf mein gemeinverständliches Buch "Die Idee der Relativitätstheorie" im mit unseren Erörterungen verweisen. Was uns hier in diesem Zusammenhang angeht, ist nur die Frage: "Wie hat die Relativitätstheorie das Begriffssystem der Physik beeinflußt?"

Es wird wohl manchen von Ihnen bekannt sein, daß die Überlegungen Einsteins in erster Linie zu einer Revision der Begriffe Raum und Zeit geführt haben. Minkowsky hat die diesbezüglichen Ergebnisse kurz in die These gekleidet: "Der Raum für sich und die Zeit für sich haben ihre begriffliche Selbständigkeit verloren, bloß eine Union von Raum und Zeit, die wir als "Welt" bezeichnen wollen, besitzt selbständige, absolute Bedeutung."

Diese kurze Aussage wird für viele von Ihnen gänzlich unverständlich sein, bevor ich versuche, Ihnen den Sinn dieses Satzes zu verdeutschen, möchte ich ihn in eine für den ~~MAKKE~~ Mathematiker ohne weiteres verständliche Form bringen. Analytisch formuliert stellt sich wie die Minkowskische Fassung der speziellen Relativitätstheorie so dar: Schon in der klassischen Physik mußten die Naturgesetze so gefaßt sein, daß die Gleichungen gegenüber einer Drehung des Koordinatensystems, also gegenüber einer linearen Orthogonaltransformation der drei räumlichen Koordinaten unter sich invariant blieb. Die Relativitätstheorie verlangt nun weiter folgendes: Wenn wir neben den drei

Raumkoordinaten  $x_1, x_2, x_3$  noch eine vierte Koordinate  $x_4 =$  ~~ist einführen, so~~ müssen die physikalischen Gesetze so beschaffen sein, daß sie gegenüber der Gruppe der linearen Orthogonaltransformation aller dieser vier Koordinaten  $x_1, x_2, x_3, x_4$  invariant sind. Dann ist sowohl das Relativitätsprinzip als auch das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erfüllt. Das ist in zwei Sätzen der succus der speziellen Relativitätstheorie, so weit sie auf den Raum - Zeitbegriff Bezug hat. Allerdings nur ~~in einer für den Mathematiker verständlichen Form.~~ Wie soll man aber das dem gewöhnlichen nichtmathematischen Sterblichen klar machen? Ich werde es versuchen, bitte aber von vornherein um Nachsicht, wenn der Versuch mißlingt.

~~Ich beginne mit einer einfachen Überlegung, die noch durchaus auf klassischem, nichtrelativistischen Boden steht. Ich habe auf diese Tafel einen horizontalen Strich und darüber zwei Punkte A und B in einem gegenseitigen Abstand von einem Meter gezeichnet und habe darunter die beiden Behauptungen geschrieben: 1) B liegt höher als A, ~~XXXXXX Asia~~.~~

~~1)  $AB = 1 \text{ m}$~~

Wir beginnen mit einer einfachen Überlegung, die noch durchaus auf klassischem, nichtrelativistischen Boden steht. In Abbildung 1 sind ein horizontaler Strich und darüber zwei Punkte A und B ~~XXXXXX~~ in einem gegenseitigen Abstand von 6 cm von einander gezeichnet. Wir stellen nun die folgenden beiden

Abb.1. Relativität der Begriffe Horizontalabstand und Vertikalabstand

Behauptungen auf:

- 1) B liegt höher als A.
- 2) Die Entfernung A-B beträgt 6 cm.

Wir wollen uns nun darüber Rechenschaft geben, welcher von diesen beiden Behauptungen der Charakter einer absoluten oder einer relativen Aussage zukommt. Die Aussage 1, wonach B höher liegt als A, besitzt Giltigkeit, solange die ausgezogenen Gerade der Abbildung tatsächlich eine Horizontale ~~XX~~ darstellt. Sie ~~XX~~ kann aber auch falsch werden, sobald man die Figur schief hält, oder - selbst bei ganz horizontal gehaltener Figur - sobald es uns etwa einfällt, die Bezeichnung "höher" bzw. "tiefer" nicht auf den Horizont unseres eigenen Standortes, sondern auf den Horizont eines anderswo auf der Erdoberfläche gelegenen Ortes zu beziehen. Es sei etwa die gestrichelte Gerade eine Parallelle zum Horizont ~~XXXXXX~~ eines irgendwo in Asien gelegenen Ortes ~~XXXXXX~~, auf den wir unsere Aussage beziehen wollen. Dann müßte die Behauptung 1) gerade umgekehrt lauten: "A liegt höher als B".

~~Wir wollen uns nun überlegen, welcher dieser beiden Behauptungen der Charakter einer absoluten und einer relativen Aussage zukommt. Da erkennt man nun leicht folgendes : Die Aussage 1 bezieht sich auf den Horizont von Wien. Würden wir sie beispielsweise auf den Horizont von Moskau beziehen, das um rund  $22^{\circ}$  weiter östlich liegt, derart, daß der dortige Horizont etwa der gestrichelten Linie parallel läuft, so müßte die Aussage 1) gerade umgekehrt lauten, A liegt höher als B. Die Aussage 1 ist also eine relative, sie hat nur für ein bestimmtes Bezugssystem Giltigkeit. Dagegen ist die Aussage 2 eine absolute, eine invariante Aussage, die in allen Bezugssystemen Giltigkeit besitzt. Man kann diesen Sachverhalt mit jenen Hilfsmitteln der elementaren analytischen Geometrie, wie man sie im Gymnasium lernt, auch so zum Ausdruck bringen: wie ich es hier aufgeschrieben habe : Wir fixieren die Lage der beiden Punkte durch Angabe ihrer rechtwinkeligen Koordinaten und zwar einmal durch die Koordinate x und y bezogen auf jenes System, dessen X-Achse in der Hori-~~

~~unserer eigenen Standortes~~

~~zontalebene Wiens liegt und hierauf in Bezug auf ein Koordinatensystem des unzählten Fernorts x', y', dessen X' Achse parallel zur Horizontalebene von Moskau liegt.~~

Dann gilt <sup>en</sup> die hier aufgeschriebenen Bezeichnungen :

$$\left. \begin{array}{l} x_2 - x_1 \neq x_2' - x_1' \\ y_2 - y_1 \neq y_2' - y_1' \end{array} \right\} r^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = (x_2' - x_1')^2 + (y_2' - y_1')^2, \quad (1)$$

Die in Worten folgendes ausdrücken : Horizontalabstand und Vertikalabstand von A und B fallen in beiden Bezugssystemen verschieden aus, dagegen muß der in der Luftlinie gemessene Abstand A B unabhängig vom Bezugssystem immer den gleichen Wert  $r$  haben. Man bringt das in der Mathematik so zum Ausdruck, daß man sagt : Die Koordinatendifferenzen sind gegenüber einer Drehung des Koordinatensystems nicht invariant, hingegen ist die aus ihnen gebildete quadratische Form  $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = r^2$  eine Invariante. Das gilt für den hier betrachteten 2dimensional Fall; im dreidimensionalen Raum werden die Invarianten durch einen entsprechenden dreigliedrigen Ausdruck gebildet.

*Oder, nochmals:*  
Wir versuchen das jetzt wieder in Worten auszudrücken : Die Begriffe Horizontalentfernung und Vertikalentfernung haben keine absolute, selbständige Bedeutung, Aussagen über sie haben nur relative Giltigkeit, nämlich in Relation auf ein bestimmtes Bezugssystem. Absolute vom Bezugs-

system unabhängige Bedeutung hat dagegen eine Aussage über den räumlichen Abstand zweier Punkte. Das sind, wie gesagt, Überlegungen der rein klassischen Geometrie. Wir gehen nun zu den dazu analogen Aussagen der speziellen Relativitätstheorie über. Da in die Gleichungen der Relativitätstheorie, wie man sie schon aus der früher erwähnten Minkowski-Substitution  $x_4 = ct$  erkennen, immer die Lichtgeschwindigkeit  $c$  eingeht, die den normalen Wert  $3 \cdot 10^{10}$  cm/sec hat, brauchen wir für unser Beispiel ~~noch~~ mehr Raum zur Verfügung, so daß wir gleich mit kosmischen Dimensionen operieren wollen. Wir stellen uns also Beobachter auf verschiedenen Sternen des Weltraumes verteilt vor, wobei wir um kürzer sprechen zu können, immer den Namen des betreffenden Fixsternes selbst für den dort allfällig vorhandenen bewohnbaren Planeten setzen wollen. Wir denken uns nun, es geschieht an einer Stelle des Weltraumes irgendein räumlich und zeitlich schaff begrenztes Ereignis, ein sogenanntes Punktereignis, ~~sagen wir~~: Heute Abend um  $21^h 35\frac{1}{2}^m$  findet plötzlich eine Eruption des Vesuvs statt, wir wollen ~~sie~~, das Ereignis A nennen. Denken Sie sich weiter: 24 Stunden später explodiert auf dem Planeten des Sirius ein Pulvermagazin, das sei das Ereignis B. Bezuglich dieser beiden Ereignisse würde man nun vom Standpunkt der vorrelativistischen Raum-Zeit-Auffassung aus die folgenden Aussagen machen: Der räumliche Abstand der Orte der beiden Ereignisse hat einen ganz bestimmten Wert von  $8,21 \cdot 10^{17}$  cm und der zeitliche Abstand der beiden Ereignisse war  $t = 24^h$ , wie immer man die Sache betrachtet. Ob ~~dagegen~~ das Ereignis B "höher oben" im Weltraum stattfand als A, oder "tiefer unten", das hängt natürlich davon ab, wie man im Weltraum eine Horizontalebene legt und welche Seite davon man als oben und unten bezeichnet. Daß ~~dagegen~~ A früher stattfand als B und daß das genaue Zeitintervall zwischen beiden Ereignissen  $t = 24^h$  war, gilt in der vorrelativistischen Auffassung als eine ~~absolut~~ Aussage von absoluter Bedeutung, ebenso wie daß der räumliche Abstand  $r = 8,21 \cdot 10^{17}$  cm beträgt. Beide Aussagen sind von einem gewählten Bezugssystem völlig unabhängig.

Da kommt nun der Relativitätstheoretiker und sagt: Pardon mein Herr, hier behaupten Sie doch ein bisschen zu viel. Ihre Aussage ist zwar unabhängig von der Lage des Bezugssystems, nicht aber von dessen Bewegungszustand. Nehmen wir der Einfachheit halber an, daß Sirius und Sonne keine nennenswerte Relativbewegung gegeneinander ausführen. Dann werden sich die Beobachter auf dem Sirius und auf der Erde allerdings darüber einig sein, daß das Ereignis B um 24 Stunden später stattgefunden hat als A.

wirken

Denken Sie sich aber, die beiden Explosionen A und B seien auch von einem dritten Stern, sagen wir vom Prokyon aus beobachtet worden, von dem wir für die Zwecke unserer Überlegungen für den Augenblick voraussetzen wollen, daß er in einer raschen Relativbewegung gegen Sirius und gegen unser Sonnensystem begriffen sei. Da würde nun gemäß der Relativitätstheorie auf Grund von Rechnungen, die ich hier natürlich nicht bringen kann, folgendes eintreten: Auch wenn der Beobachter am Prokyon ganz konkret die Zeit in Rechnung zieht, die die Lichtstrahlen vom Sirius und von der Erde bis zu ihm brauchen, so würde er doch für das Zeitintervall zwischen den Ereignissen A und B einen Wert  $t'$  erhalten, der nicht 24 Stunden beträgt, ja es könnte sogar der Fall eintreten, daß nach seinen Berechnungen das Ereignis B überhaupt früher stattgefunden hat als A. Und auch für den räumlichen Abstand der beiden Ereignisse würde der Beobachter auf dem Prokyon einen Wert  $r'$  finden, der von  $8,21 \cdot 10^{17}$  cm stark abweicht. Und ein dritter Beobachter auf der Betelgeuze würde für den räumlichen und zeitlichen Abstand der beiden Ereignisse wieder ganz andere Werte erhalten, sagen wir  $r''$  und  $t''$ . Es scheint also ein schreckliches Durcheinander zu herrschen, aber die Relativitätstheorie lehrt weiter, daß hinsichtlich eines Punktes zwischen all diesen drei Beobachtern und auch noch beliebig vielen anderen, die richtige Messungen vornehmen, volle Übereinstimmung bestehen würde. Bildet man nämlich den Ausdruck  $s^2 = r^2 - c^2 t^2$  (2) so würde gelten:

Haben Sie nun wieder die Lichtgeschwindigkeit:  $c = 3,10^{10}$  cm/sec. (3)  
Erinnern Sie sich nur daran, daß auch schon im Rahmen der nicht-relativistischen Geometrie gewisse Ausdrücke, wie z. B. die Koordinatendifferenzen selbst, eine Invariante gegenüber Drehungen des Bezugssystems also Horizontal- und Vertikalabstand, Werte hatten, die von der Lage des Bezugssystems abhängen, während der räumliche Abstand selbst eine Invariante gegenüber Drehungen des Bezugssystems darstellen.  
 In analoger Weise wird nun gemäß der speziellen Relativitätstheorie auch der räumliche und der zeitliche Abstand zweier Ereignisse zwar nicht von der Lage, wohl aber vom Bewegungszustand des Bezugssystems abhängen; nur der aus räumlichem und zeitlichem Intervall in bestimmter Weise zusammengesetzte Ausdruck  $s^2$  bedeutet eine Invariante. Das ist also der Sinn der Mikowskischen Aussage: Raum und Zeit für sich haben ihre Selbständigkeit verloren; nur die Union  $\#$  zwischen beiden, die wir als "Welt" bezeichnen wollen,

behält ~~die~~ selbständige, absolute Bedeutung." philosophical sehr stark anfechtbar

Um Mißverständnissen vorzubeugen, die vielfach gemacht werden, sei betont, daß der Zeitbegriff in der speziellen Relativitätstheorie zwar seine absolute Selbständigkeit verliert, daß aber die Zeit in die Raum-Zeit-Union nicht etwa in gleicher Weise eingeht, wie die drei räumlichen Dimensionen. Man erkennt dies an der Formel  $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$ .

Die Zeit verliert zwar ihre absolute Selbständigkeit, spielt aber nach wie vor eine ausgezeichnete Rolle, während von den drei räumlichen Dimensionen ~~die~~ theoretischen Physik unter anderem durch den Begriff der system

~~ist, der dem Raum- und dem Zeitbegriff übergeordnet ist,~~ Die spezielle Relativitätstheorie hat uns also den Begriff der "Welt" gebracht und die allgemeine Relativitätstheorie hat darüber hinaus noch die folgenden fundamentalen Erkenntnisse geliefert : Das Wesen der Schwerkraft besteht darin, daß sie eine Krümmung dieser vierdimensionalen Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit "Welt" verursacht. Und zwar ist die Krümmung umso stärker, je stärker das Schwerkraftfeld ist; in unendlicher Entfernung von allen Maßen würde die Krümmung unendlich klein sein. Es ist Ihnen wohl bekannt, daß Einstein mit dieser Auffassung vielfach auf Widerspruch gestoßen ist. Man hat eingewendet, daß die Idee eines gekrümmten Raumes und noch mehr die einer gekrümmten Zeit absurd sei, daß die Theorie in sich nicht widerspruchsfrei sei u.s.w., u.s.w. Es fehlt mir hier die Zeit, in Debatten über diesen Punkt einzugehen und Ihnen näher zu erläutern, was unter der Krümmung der "Welt" konkret zu verstehen ist. Ich kann mir die Behandlung dieser Frage hier umso eher ersparen, als Sie ja im vierten Vortrag dieses Zyklus durch Hans Nöbeling noch Näheres darüber erfahren werden.

Ich möchte nur kurz die Stellung der theoretischen Physik gegenüber dieser Kritik charakterisieren : Die maßgebenden theoretischen Physiker der Welt sind wie alle Gelehrten in vielen Punkten uneinig und tragen mit mehr oder weniger Temperament ihre gegenseitigen Meinungsverschiedenheiten aus. Über die Zulässigkeit und die logische Berechtigung der Vorstellungen der Relativitätstheorie besteht ~~unter~~ doch allen jenen, die genügend gründlich in die Theorie eingedrungen sind, gar kein Zweifel. Ja viele Physiker stehen schon seit längerer Zeit auf dem Standpunkt : "Die Relativitätstheorie ist eigentlich viel zu richtig, um noch interessant zu sein". Wenn also der, meist einem andern Fach angehörige Kritiker der Relativitätstheorie kommt und sagt : "Na, Herr Professor, Ihre Wissenschaft hat sich da mit der Relativität-

nutte, unseren Antipoden müßte ja das Blut in den Kopf steigen, wenn die Tätstheorie auf ein recht schlüpfriges und philosophisch sehr stark anfechtbares Gebiet begeben," so kann man ihm nur erwidern : "Herr Kollege - gar keine andern Sorgen möchte ich haben !" Über diese größeren Sorgen des Physikers werden wir sogleich sprechen; ich möchte nur abschließend zum Kapitel Relativitätstheorie folgendes bemerken : Obwohl die Erscheinungen der Natur eindeutig vorgegeben sind, kann ihre Beschreibung durch die Physik in prinzipiell ganz verschiedener Weise ausfallen. Die Relativitätstheorie operiert beispielsweise bei der Behandlung des Planetenproblems mit Begriffen, die der Newtonschen Theorie völlig fremd waren, wie z. B. Weltkrümmung, Krümmungstensor, geodätische Linie im  $R_4$  u.s.w. Dafür braucht der Begriff Schwerkraft gar nicht vorzukommen, er geht in jenen der Weltkrümmung auf. Es ist Leb möchte in diesem Zusammenhange erwähnen, daß H. Hertz schon vor vier Jahrzehnten den Versuch gemacht hatte, den im Grund genommen überzähligen Begriff der Kraft aus der Mechanik zu eliminieren.

In der Relativitätstheorie ist also ein neues Begriffssystem zur Anwendung gelangt, das schon direkt vom Stamm jenes Bäumchens, von dem ich früher sprach, ganz nahe der Wurzel abzweigt. Wir haben es nicht mit einer neuen Verästelung an einem bestehenden Zweig zu tun, sondern mit einem am Stamm direkt angesetzten, ganz neuen Ast.

Trotz alledem ist aber die von der Relativitätstheorie bewirkte Revolutionierung der Physik, nachträglich beurteilt, recht harmlos verlaufen. Einstein hat, sagen wir, einen Flügel des Lehrgebäudes der klassischen Physik niedergeissen, er hat ihn aber auch säuberlich, Stein für Stein, nur im Stile moderner Sachlichkeit, wieder aufgebaut, er hat auf diesem Gebiet keinen Trümmerhaufen hinterlassen. Der Begriff einer gekrümmten Welt mag ja dem oft mißbrauchten gesunden Menschenverstand gewisse Schwierigkeiten bereiten, dies liegt aber nur an dem Mangel an Anschaulichkeit. Die spezielle Relativitätstheorie ist trotzdem für alle, die sie wirklich verstehen, ein logisch gut fundiertes Gebäude, sie ist abgesehen davon, daß sie die Erfahrung besser approximiert, ein der Newtonschen Mechanik und Gravitationslehre mindestens ebenbürtiges, in sich geschlossenes Lehrgebäude. Die Erkenntnis, daß der Weltraum gekrümmmt sei, ist in sublimerer, abstrakterer Weise doch nur von jener Art, wie die der Menschheit schon vor Jahrhunderten aufgedämmerte Erkenntnis, daß die Erdoberfläche kugelförmig sei. Auch diese letztere Vorstellung war von den Zeitgenossen als absurd bekämpft worden, denken Sie nur daran, daß der damalige gesunde Menschenverstand eingewendet

hatte, unseren Antipoden müßte ja das Blut in den Kopf steigen, wenn sie fortwährend mit den Füßen nach oben herumgehen.

Abschließend kann man vielleicht sagen : Jener Teil der Krise, der nach dem negativen Ausfall des Michelson-Versuches verursacht wurde, ist durch die Relativitätstheorie scheinbar restlos überwunden worden; auf diesem Gebiet scheint der ~~Neuaufbau~~ bereits vollendet zu sein.

Wir kommen nun zur dritten Kategorie von Umwälzungen in der Physik und geben uns damit jetzt wirklich auf ein schlüpfriges Gebiet. Man hat immer ein recht unbehagliches Gefühl, wenn man vor Nichtphysikern über diese Dinge sprechen soll. Viele Autoren sind nicht mit Unrecht der Ansicht, daß man dieses strittige Gebiet heute überhaupt noch nicht populärnisieren sollte. Eddington sagt in einem seiner ausgezeichneten Werke : "Vor dem Gebäude der Quantentheorie sollte man folgende Warnungstafel aufhängen: Wegen Umbau und vollständiger Renovierung geschlossen, Nichtbeschäftigte ist der Eintritt strengstens untersagt."

~~W~~ Trotz dieses Eddingtonschen Verbotes möchte ich Sie einen flüchtigen Blick auf die in etwas chaotischem Zustand befindliche Baustelle der Quantentheorie werfen lassen, denn es kann ja nicht viel schlimmeres passieren, als daß Sie sich nachher gerade so wenig auskennen wie früher, womit Sie sich dann in ungefähr derselben Lage befinden wie der Physiker selbst. Das ist nämlich der Unterschied zwischen der Relativitätstheorie und der Quantentheorie : Die Relativitätstheorie scheint dem Uneingeweihten schrecklich schwierig zu sein, kann aber von den Fachleuten ~~verstanden~~, grundsätzlich wenigstens, ohne weiteres verstanden werden. Die Quantentheorie ist dagegen ihren Schöpfern selbst zugestandenermaßen ein undurchdringliches Rätsel geblieben.

Die Schwierigkeit liegt, kurz gesagt darin, daß es bis heute noch nicht gelungen ist, das zur Behandlung der Quantenerscheinungen adaequate Begriffssystem zu finden. Die aus der makroskopischen Physik übernommenen Begriffe gestatten eben nicht eine Übertragung auf die atomaren Vorgänge selbst, die Gegenstand der Quantentheorie bilden. Die Quantentheorie Quantenphysik beschäftigt sich bekanntlich mit den Vorgängen der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Einzelatom: Die Prozesse der Strahlungsemision, also Entstehung der Spektren, ferner der Strahlungsabsorption, der Zerstreuung, Dispersion, des Compton-Effektes, von dem Ihnen <sup>Herz</sup> Kollege Mark im letzten Vortrag berichtet hatte - alle diese Elementarakte der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie gehören in das Gebiet der Quan-

tenphysik.

Es ist nun vornherein klar, daß zur Beschreibung der Atome und ihrer Vorgänge gewisse physikalische Begriffe deplaciert erscheinen müssen und deshalb sinnlos werden. Also wären z. B. Aussagen folgender Art vollkommen sinnlos: Das Wasserstoffatom ist grün und hat eine Temperatur von  $500^{\circ}$  und besitzt einen Elastizitätskoeffizienten von so und so viel absoluten Einheiten! Es ist eben klar, daß man jene der makroskopischen Physik entlehnten Begriffe, die sich ihrer Bedeutung gemäß immer nur auf ein Kollektiv von Atomen beziehen, nicht auf das einzelne Individuum anwenden kann.

Man kann ja auch nicht von der Sterblichkeitsziffer eines einzelnen Menschen sprechen. Anderseits gibt es natürlich physikalische Begriffe, von denen von vornherein zu erwarten war, daß sie sich ohne weiteres auch auf die Atome übertragen lassen, weil ja ~~ein~~ Grund vorliegt, weshalb sie etwa in atomaren Dimensionen ihren Sinn verlieren sollten. Ich erwähne als Beispiel nur den Begriff der Geschwindigkeit. Man kann die Geschwindigkeit von ~~3~~<sup>3</sup> ~~1~~<sup>1</sup> Planeten und Fixsternen messen, ebenso auch die Geschwindigkeit eines Zepelin-Luftschiffes, eines Gewehrgeschoßes, eines Sonnenstaubchens und eines gerade im Ultramikroskop sichtbaren Partikels. Es scheint also von vornherein gar kein Grund vorzuliegen, warum wir nicht auch von der Geschwindigkeit eines Elektron sprechen sollten. In der Tat mißt man ja auch auf indirektem Wege die Geschwindigkeit der Elektronen eines Kathodenstrahles, man kann sie sogar so genau messen, daß man die von der Relativitätstheorie geforderte Massenveränderlichkeit bei hoher Geschwindigkeit feststellen konnte. Also scheint es durchaus logisch zu sein, daß <sup>es</sup> präziell gestattet sein müßte, auch von der Umlaufgeschwindigkeit eines Elektrons im Wasserstoffatom zu sprechen.

Ein weiterer Fall, bei dem es sich auch nicht von vornherein einsehen läßt, war weshalb die Anwendung der diesbezüglichen Begriffe auf atomaren Dimensionen unzulässig sein sollte, ist die Erzeugung eines elektrischen magnetischen Wellenfeldes durch eine bewegte elektrische Ladung. Wenn wir eine elektrische Ladung genügend rasch längs einer vertikalen Geraden auf und ab bewegen, so erzeugt sie ein bestimmtes elektromagnetisches Wellenfeld, das sich sehr genau berechnen läßt. Dieser Vorgang entspricht im wesentlichen gerade jenem, der sich in der Vertikals ~~Antenne~~ eines Radiosenders abspielt. Man sollte nun folgendes erwarten: Wenn ich die Ladung

und die Schwingungsdauer immer kleiner mache, so wird selbstverständlich in entsprechender Weise auch das Wellenfeld schwächer und die Wellenlänge kürzer werden. Es werden sich also die Verhältnisse in entsprechendem Maße quantitativ ändern. Dagegen wäre qualitativ kein Unterschied zu erwarten, weil ja die elementaren Grundgesetze der Elektrodynamik über den Größenmaßstab der Vorgänge gar keine Voraussetzungen machen.

Nun gibt es tatsächlich auch Erscheinungen, aus denen eine Zeit lang man ~~ANNAHME~~ zu schließen glaubte, daß die Maxwell'schen Gesetze hinsichtlich der Wirkung eines Wellenfeldes auf eine Ladung und hinsichtlich der Erzeugung eines Wellenfelde durch eine schwingende Ladung ohne weiteres auch auf das Einzelatom anwendbar seien und das richtige Resultat liefern müten. Zu diesen Erscheinungen gehört hinsichtlich der Wirkung des Feldes auf das Elektron beispielsweise das Phänomen der normalen Dispersion und hinsichtlich des umgekehrten Vorganges, nämlich Aussendung eines Wellenfeldes durch ein bewegtes Elektron, die Erscheinung des normalen Zeeman-Effektes. Bezuglich gewisser Erscheinungen schien demnach alles zu stimmen und sich genau so zu verhalten, wie es die klassische Elektrodynamik verlangt, es findet die im ersten Vortrage erwähnte klassische Wechselwirkung statt.

Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts gaben jedoch, wie im ersten Vortrag ausführlich dargetan, die Messungen über die Verteilung der Energie im ~~spektrum~~ Wärmestrahlenspektrum eines schwarzen Körpers bestimmte Abweichungen zwischen Beobachtung und Theorie. Zur Erklärung dieser ganz unscheinbaren Abweichungen konzipierte Max Planck im Jahre 1900 jene genial revolutionäre Idee, die eine von ihrem Schöpfer selbst kaum vorhergesehnte Tragweite besaß und dazu auserkoren war, eine neue Eposche der Physik einzuleiten. Die von Planck im Jahre 1900 ausgesprochene Quantenhypothese lautete folgendermaßen: Ein Atom, das Strahlung aussendet, kann nicht beliebig wenig Energie abgeben, sondern nur solche Mengen der Strahlung, die ein ganzzahliges Vielfaches eines bestimmten Minimalquantums sind, das der Frequenz der Strahlung proportional ist. Bezeichnet man die Frequenz (Zahl der Schwingungen pro Sekunde) mit  $\nu$ , die abgegebene Energie mit  $E$ , so gilt nach Planck

$$E = n \cdot h \cdot \nu$$

19

wobei  $n$  eine ganze Zahl ist und  $h$  eine Universelle Konstante (Plancksche Konstante) bedeutet, deren Wert  
~~und die Bezeichnung~~  
 $h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$

beträgt. Die Idee, daß die Strahlung nicht beliebig schwach sein könnte, also eine diskontinuierliche, atomare Struktur habe, war der klassischen Theorie durchaus wesensfremd. ~~arten,~~  
~~weil ja später hat man weiter noch erkannt, daß es auch Fälle~~  
~~gibt, wovon nicht nur eben merkliche Abweichungen zwischen der klassi-~~  
~~schen Theorie und der Erfahrung auftreten, sondern, wo die~~  
~~Sache überhaupt ganz und gar nicht stimmt. Ich erwähne nur als~~  
~~Beispiel, daß nach der Bohrschen Theorie der Wasserstoffspektren,~~  
~~die sich bis in die feinsten Details an der Erfahrung bestätigt~~  
~~hat, das Elektron des Wasserstoffatoms auf den sogenannten~~  
~~"stationären Bahnen" vollkommen strahlungslos umläuft, also~~  
~~gar kein Wellenfeld erzeugt, was in unlösbarem Widerspruch mit~~  
~~den Grundgesetzen der Elektrodynamik steht.~~  
~~solchen Vorgängen, nämlich Auslösung eines Wellenfeldes durch ein bewegtes Elektron, die Erzeugung der normalen Deauvilloeffekte, berücksichtigt zu werden.~~  
~~Die Erscheinungen schmeißen einen so starken Widerspruch vor, daß sie nicht mehr verstanden werden können, wie es die heutige Elektrodynamik verlangt; es findet sich im ersten Volumen des Lehrbuches Schrödinger'sches Gesetz.~~  
~~Später hat man aber erkannt, daß es auch Fälle gibt, wo nicht nur~~  
~~merkliche Abweichungen auftreten, sondern wo die Sache überhaupt~~  
~~ganz und gar nicht stimmt. Ich nenne nur als Beispiel, daß nach der Bohrschen Theorie des Wasserstoffatoms, die sich bis in die feinsten Details an der Erfahrung bestätigt hat, das Elektron des Wasserstoffatoms auf einer sogenannten stationären Bahn vollkommen strahlungslos umläuft, also gar kein Wellenfeld erzeugt, was in unlösbarem Widerspruch mit den Grundgesetzen der Elektrodynamik steht. Dazu kommt noch weitere die vor Prof. Max Leiden vortrag erwähnten Versuche, aus denen sich die rätselhafte Doppelcharakter des Lichts offenbart, derart, daß die Strahlen einmal Wellencharakter, einmal körpukularer Natur haben. Zur allen Interferenzen und Polarisationserscheinungen des Lichtes glaubte man schon längst endgültig sichergestellt zu haben, daß die Lichtstrahlen WELLENCHARAKTER und zwar elektromagnetische Wellen sind. Wenn also ein Atom Licht aussendet, müßte sich nach den Voraussetzungen der ~~Welle~~ <sup>Wellen</sup> ~~Theorie~~ <sup>Theorie</sup> des Atoms ein Wellenfeld nach außen hin immer schwächer wird; die Intensität muß ja mit dem Quadrat der Entfernung abnehmen. Nun liegen aber auf der anderen Seite Erfahrungen, die notwendiger Weise zu dem Schluß zu führen~~

Vorlesung

~~und die Schwingungsdauer immer kleiner mache, so wird selbstverständlich in entsprechendem Maße auch die Wellenfelder schwächer und die Wellenlänge kürzer werden. Es werden sich also die Verhältnisse in entsprechender Weise quantitativ ändern. Dagegen wäre qualitativ kein Unterschied zu erwarten, weil ja die elementaren Grundgesetze der Elektrodynamik über den Größenmaßstab der Vorgänge gar keine Voraussetzungen machen.~~

~~Nun gibt es tatsächlich auch Erscheinungen, aus denen man anfänglich zu schließen glaubte, daß die Maxwell'schen Gesetze hinsichtlich der Wirkung eines Wellenfeldes auf eine Ladung und hinsichtlich der Erzeugung eines Wechselfeldes durch eine schwingende Ladung ohne weiters auch auf das Einzelatom anwendbar seien, und das richtige Resultat liefern.~~

~~In diesen Annahmen gehört Es ist das hinsichtlich der Wirkung des Feldes auf das Elektron beispielsweise die Erscheinung der normalen Dispersion und hinsichtlich des umgekehrten Vorganges, nämlich Aussendung eines Wellenfeldes durch ein bewegtes Elektron, die Erscheinung des normalen Zeeman-Effektes. Beziiglich gewisser Erscheinungen schien also alles zu stimmen und sich zu verhalten,~~

~~kommen, wie es die klassische Elektrodynamik verlangt, es findet sie im ersten Vortrag erwähnte "klassische Wechselwirkung" statt.~~

~~Später hat man aber erkannt, daß es auch Fälle gibt, wo nicht nur etwa merkliche Abweichungen auftreten, sondern wo die Sache überhaupt ganz und gar nicht stimmt. Ich erwähne nur als Beispiel, daß nach der Bohrschen Theorie des Wasserstoffatoms, die sich bis in die feinsten Details an der Erfahrung bestätigt hat, das Elektron des Wasserstoffatoms auf einer sogenannten stationären Bahn vollkommen strahlungsfrei umläuft, also gar kein Wellenfeld erzeugt, was in unlösbarem Widerspruch mit den Grundgesetzen der Elektrodynamik steht. Dazu kommen noch weiters die von Prof. Mark in seinem Vortrag erwähnten Versuche, aus denen sich die rätselhafte Doppelnatürlichkeit des Lichts offenbart, derart, daß die Strahlen einmal Wellencharakter, einmal korpuskulare Natur haben. Aus allen Interferenz- und Polarisationserscheinungen des Lichtes glaubte man schon längst endgültig sichergestellt zu haben, daß die Lichtstrahlen Wellen sind und zwar elektromagnetische Wellen sind. Wenn also ein Atom Licht ausstrahlt, müßte sich nach den Verstellungen der Wellentheorie eine Kugel vom Atom als Mitte ausbreiten, derart daß das Wellenfeld nach außen hin immer schwächer wird; die Energie muß ja mit dem Quadrat der Entfernung abnehmen. Nun liegen aber auf der anderen Seite Erfahrungen, die notwendiger Weise zu dem Schluß zu führen~~

scheinen, daß beim Absorptionsakt plötzlich die ganze vom Atom ausgestrahlte ~~Energie~~ Energie, die man sich über die Oberfläche der um das Atom geschlagenen Kugel ~~ausbreite~~ vorstellte, in einem einzigen Punkt des Feldes lokalisiert auftaucht. Und das selbst dann, wenn beispielsweise ~~emittierende~~ das Atom sich auf einem ~~viele~~ <sup>tausend</sup> Lichtjahre entfernten Stern befindet. Kurz die betreffenden Versuche fallen ganz so aus, als wären die Lichtstrahlen winzig kleine Korpuskeln von atomaren Dimensionen, die von der Lichtquelle geradlinig nach einer bestimmten Richtung ausgesendet werden. Mit dieser letzteren Vorstellung können wir aber andererseits die Tatsache der Interferenzerscheinungen nicht erklären. Die Physiker sind auf diese Weise in die peinliche Lage gekommen, zugeben zu müssen, daß ihnen die Lichtstrahlen, die sie mehr als hundert Jahre hindurch endgültig durchschaut zu haben glaubten, heute so rätselhaft sind wie mystische Fabeltiere, ebenso wie die Kentauren : Unten Pferd, oben Mensch.

Die Sachlage wurde noch verwickelter, aber auch noch interessanter, als sich aus den durch eine geniale Idee De Broglies angeregten Versuchen von Germér und Davissón ergab, daß auch umgekehrt die Kathodenstrahlen Wellencharakter besitzen. Diese ursprünglich in Amerika ausgeführten Versuche sind später in England und Deutschland wiederholt worden; zu den allerschönsten dieser Beispiele aufnahmen gehören die von Mark und Wierl, und Sie hatten ja das letzte Mal Gelegenheit, ein solches Interferenzbild dieser Verrücktheit hier projiziert zu sehen. Das Ergebnis ist ein durchaus überraschendes, denn man hatte die Kathodenstrahlen als rein korpuskulare Strahlen von jeher als etwas von den Wellenstrahlen ~~ganzlich~~ grundsätzlich verschiedenes dem Licht gegenübergestellt – in ganz derselben Weise verschieden, wie etwa der Regen grundsätzlich etwas anderes ist als der Schall, der von den aufprasselnden Regentropfen erzeugt wird. Die Entdeckung der Elektronenbeugung, die zweifellos die wichtigste physikalische Entdeckung der letzten Jahrzehnte darstellt, zeigt nun, daß eins solcher prinzipieller Unterschied bei den Elementarwellen nicht durchwegs besteht, sondern unter Umständen nach beiden Seiten hin ~~verschwunden~~ verwischt wird.

Diesem Tatsachenmaterial gegenüber versagt das Begriffssystem der klassischen Physik, aber ebenso auch jenes der relativistischen Elektrodynamik. Ich erwähne nebenher, daß man unter den theoretischen Physikern heute meist die Relativitätstheorie auch schon in die klassische Physik einbezieht. Die große Zäsur zwischen „klassisch“ und „nichtklassisch“ liegt

heute jenseits der Relativitätstheorie vor der Schwelle der Quantenphysik.) - Die klassischen Begriffe haben also versagt und ausgespielt und die Zeit war reif zu einer Reform des Begriffssystems. Eine solche Reform ist im Jahre 1925 gleichzeitig und unabhängig voneinander von zwei genialen Physikern, Heisenberg und Schrödinger in Angriff genommen worden. Von den Gedankengängen der Heisenbergschen Theorie wollen wir bloß ~~ein~~ dem Allgemeinverständnis ~~etablieren~~ leichter zugänglichen und dabei grundlegenden Lehrsatz kennen lernen, der als die "Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation" bezeichnet wird. Wir sprachen früher davon, daß selbst bei den winzigen, dem Auge unsichtbaren Elektronen eine Messung der Geschwindigkeit mit verhältnismäßig großer Genauigkeit vorgenommen werden kann. Man könnte sich nun prinzipiell vorstellen, daß man durch eine fortschreitende Verfeinerung der optischen Hilfsmittel (durch eine Art "Ultra-Ultra-Mikroskop") die Möglichkeit finden könnte, einzelne Elektronen sichtbar zu machen, ihren Ort zu bestimmen, also ihre ~~xx~~ räumlichen Koordinaten zu messen. Die Heisenbergsche ~~WIGENANIXX~~ Unbestimmtheitsrelation besagt nun folgendes: Wenn es uns auch gelänge, derartige Messungen vorzunehmen, so wäre es doch grundsätzlich unmöglich, Ort und Geschwindigkeit eines Elektrons (oder eines Protons oder einer anderen elementaren Korpuskel) gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit zu messen. Je genauer wir vielmehr seine Geschwindigkeit messen, desto ungenauer wird die Ortsbestimmung und ~~WIGENANIXX~~ vice versa. In Formeln drückt sich dieser Sachverhalt folgendermaßen aus: Es sei  $x$  eine Koordinate des Elektrons, also sein in bestimmter Richtung gemessener Abstand von einem willkürlich gewählten Ausgangspunkt. Es sei ferner  $v$  seine Geschwindigkeitskomponente in derselben Richtung und  $m$  seine Masse. Das Produkt  $mv$  wird bekanntlich als die Bewegungsgröße oder der Impuls des Korpuskel bezeichnet. Unter  $\Delta x$  bzw.  $\Delta mv$  wollen wir ferner den bei der Messung von Koordinate bzw. Impuls begangenen Fehler, also die Abweichung zwischen wirklichem und gemessenen Wert bezeichnen. Dann gilt nach Heisenberg die Beziehung:

$$\Delta x \cdot \Delta mv \geq h \quad (5)$$

wobei  $h$  die wiederholt erwähnte Plancksche Konstante ist, deren Wert  $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$  erg.sec beträgt. Löst man die

22

Umstand ergibt sich, daß

Gleichung (5) nach  $\Delta x$  bzw.  $\Delta m v$  auf, so erhält man

$$\Delta x = \frac{\hbar}{\Delta m v} \quad \Delta m v = \frac{\hbar}{\Delta x} \quad (6)$$

woraus hervorgeht, daß tatsächlich die Ungenauigkeit in der Bestimmung des Impulses (also der Geschwindigkeit) umso größer wird, je kleiner der Fehler in der Ortsbestimmung ist und vice versa.

Die Wurzeln dieser eigenartigen Beziehung liegen einerseits ~~XXXXX~~ in der schon von Planck erkannten atomaren Struktur der Strahlung und andererseits in der durch den Compton-Effekt offenbar gewordenen Stoßwirkung der Strahlung auf die Elektronen. Jenes physikalische Agens, mit dessen Hilfe wir überhaupt feinere Ortsbestimmungen bzw. Geschwindigkeitsmessungen vornehmen können, ist das Licht bzw. die noch kurzwelligeren Strahlen wie Ultraviolet, Röntgenstrahlen oder Gamma-Strahlen. Da nun elektromagnetische Wellen gemäß Planck immer nur in ganzzahligen Vielfachen eines Minimalquantum  $\hbar v$  auftreten können, hat die Strahlung selbst gewissermaßen eine atomare, körnige Struktur, derart, daß ~~mm~~ einer versuchten immer weitergehenden Verfeinerung der Messungen diese Körnigkeit eine unübersteigbare Grenze setzt, ähnlich wie, sagen wir, die Korngröße einer photographischen Platte eine letzte Grenze für den verwendbaren Vergrößerungsmaßstab einer photographischen Platte bildet. Daß es dabei gerade zu der durch die ~~XXXXXXXX~~ Formel ( ) gegebenen Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation kommen muß, läßt sich in folgender Weise plausibel machen: Nach Planck beträgt die Energie eines einzelnen Strahlungsquants  $\hbar v$ . Einstein hat später die wichtige Erkenntnis hinzugefügt daß der Impuls (die "Stoßkraft") jedes solchen Strahlungsquants durch  $\frac{\hbar v}{c}$  gegeben sei, wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit ist. Wie nun aus der Erscheinung des Comptoneffektes hervorgeht, findet beim Auftreffen eines Strahlungsquants auf ein Elektron tatsächlich eine Impulsübertragung statt, d.h. das Elektron erleidet einen Rückstoß, sein Impuls ändert sich um einen Betrag  $\Delta m v$ , der proportional  $\frac{\hbar v}{c}$  ist, also umso größer ausfällt, je größer die Frequenz  $v$  bzw. je kleiner die Wellenlänge der betreffenden Strahlung ist. Aus diesem

Umstand ergibt sich, daß tatsächlich Ort und Impuls (Geschwindigkeit) eines Elektrons nie gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit gemessen werden können. Wenn wir nämlich seinen Ort sehr genau bestimmen, also seine Koordinate  $x$  mit möglichst kleinem Fehler  $\Delta x$  messen wollen, so haben wir als Beobachtungsmittel eine möglichst kurzwellige Strahlung anzuwenden, denn der Fehler in der Ortsbestimmung ist nach unten hin durch die Größe der Wellenlänge begrenzt. Sobald wir aber mit sehr kurzwelliger Strahlung beobachten, wird durch diesen Vorgang selbst die Geschwindigkeit des Elektrons geändert, also ein Fehler in der Impulsmessung hervorgerufen und zwar nach der Einstinsche Formel ein umso größerer Fehler je kleiner die Wellenlänge der Strahlung ist. Will man dagegen die Geschwindigkeit möglichst genau messen, so hat man, um das Messresultat nicht durch einen Compton-Stoß zu verfälschen, Strahlung möglichst großer Wellenlänge anzuwenden, wodurch wieder die Ortsbestimmung in entsprechendem Maße ungenauer wird.

### Genauigkeit der

Man erkennt aus der Heisenbergschen Formel (5), daß die atomare Struktur der Strahlung sich auf die mit Hilfe irgendwelcher Strahlen vorgenommenen Messungen in komplizierter Weise auswirkt als etwa die atomare Struktur der Materie überhaupt auf die Längenmessungen der Körper. Die Tatsache, daß materiellen Körper aus Atomen aufgebaut sind, deren Durchmesser in der Größenordnung von rund  $10^{-8}$  cm liegen, hat einfache Folge, daß man die Länge eines Körpers, beispielsweise eines Präzisionsmaßstabes auch bei unbegrenzter Verfeinerung unserer Meßmethoden nie mit einer größeren Genauigkeit als bis auf ein Zehnmillionstel Millimeter angeben könnte. Die atomare Struktur der Materie setzt also eine absolute untere Schranke für den Meßfehler bei Längenmessungen an materiellen Körpern fest. Die auf die Quantennatur der Strahlung zurückgehende Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation (5) ist dagegen weniger radikal, sie ließe grundsätzlich für die Ortsbestimmung und für die Geschwindigkeitsbestimmung für sich jede beliebige Genauigkeit, also ebenso kleine Meßfehler zu, nur negiert sie die Möglichkeit einer gleichzeitig völlig genauen Orts- und Geschwindigkeitsbestimmung.

Über die hier erläuterte Unbestimmtheitsrelation hinaus hatte Heisenberg im Jahre 1925 eine höchste interessante mathe-

matische Theorie, die sogenannte Quantenmechanik entwickelt, mit deren Hilfe es prinzipiell möglich ist, Wellenlängen, Polarisationszustand und Intensitäten der ~~Maxwell'schen~~ der Spektrallinien aus den supponierten Eigenschaften des die Strahlung emittierenden Atomes zu berechnen. Heisenbergs Quantenmechanik geht von dem durchaus gesunden und einleuchtenden Grundsatz aus, daß die Theorie nur Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen, wie Wellenlänge der Strahlung etc. enthalten solle, während jene "halbmetaphysischen" Größen, wie Koordinaten und Geschwindigkeiten der einzelnen Elektronen, deren Messung praktisch nie erfolgen kann, in die Theorie gar nicht eingehen sollen. Leider stellt die Heisenbergsche Theorie so enorm hohe Anforderungen an die Auffassungskraft des Studierenden, daß wir hier nicht näher auf sie eingehen können. Wir wollen uns vielmehr darauf beschränken, einige Andeutungen über die von ~~Max~~ Schrödinger stammende Wellenmechanik zu machen, was wir umso eher tun können, als trotz ihres ganzlich verschiedenen Ausgangspunktes die beiden Theorien von ~~Max~~ Heisenberg und von Schrödinger hinsichtlich der konkreten physikalischen Resultate durchwegs miteinander übereinstimmen.

heute jenseits der Relativitätstheorie vor der Schwelle der Quantenphysik.)  
 Also, wie gesagt, die klassischen Begriffe hatten versagt und ausgespielt und  
 die Zeit war reif zu einer Reform des Begriffssystems. Eine solche Reform  
 ist im Jahre 1925 gleichzeitig und ganz unabhängig voneinander von zwei  
 genialen Physikern, Heisenberg und Schrödinger, in Angriff genommen worden.  
 Die Heisenbergsche Theorie ist derart abstrakt, daß ich hier nicht einmal  
 Andeutungen darüber bringen kann. Übrigens deckt sie sich trotz ihres  
 völlig verschiedenen Ausgangspunkte hinsichtlich der konkreten physikalischen  
 Resultate durchwegs mit jener von Schrödinger, so daß ich mich darauf be-  
 schränken kann, einige Andeutungen über diese Theorie zu machen. Schrödin-  
ger, ein Wiener Kind, auf ~~dem~~ <sup>das</sup> wir alle sehr stolz sein können, hatte im  
 Jahre 1925 durch eine unfassbar geniale Intuition seine berühmte Wellenglei-  
chung gefunden, die seit sechs Jahren das Gebiet der Quantentheorie fast  
 souverän beherrscht. Die Schrödingersche Gleichung stellt die Differential-  
 gleichung für die De Broglie-Wellen dar; ihre Anwendung hat zu ungeahnten  
 Erfolgen und neuen Einsichten geführt, aber das eigentlich Wichtigste Ziel,  
 nämlich die begriffliche Klärung des Quantenrätsels, ist noch ~~unge~~ nicht <sup>a</sup>  
~~erreicht~~. Ja es sieht fast so aus, als wären wir weiter vom Ziel als je. Die  
Schrödingersche Gleichung ist eine typische Zauberformel; man rechnet mit  
 ihr und wenn man sie richtig behandeln kann, so erhält man auch mit der  
 Erfahrung übereinstimmende Resultate, aber man versteht sie nicht. Ich will  
 Ihnen möglichst kurz andeuten, was eigentlich bei der Schrödingerschen  
 Theorie grundsätzlich unverständlich ist und mystisch bleibt. Zunächst  
 fehlt bei den Schrödingerschen Wellen oder De Broglieschen Wellen das  
 Subjekt zu dem Prädikat "schwingt". Bei den Schallwellen wissen wir, daß  
 die Luftteilchen schwingen, also ~~hinf~~ <sup>und</sup> hergehende Bewegungen ausführen.  
 Bei den elektromagnetischen Wellen hatte man ursprünglich einen hypotheti-  
 schen Äther eingeführt, dessen einzige Funktion darin bestand, als Subjekt  
 zu dem Verbum schwingen zu dienen. Später war ~~man dann~~ sachlicher geworden  
 und hatte eingesehen, daß man gar kein ~~schwingendes~~ konkretes, schwingendes  
~~Etwas~~, wie den Äther braucht, sondern daß man sich die elektromagnetischen  
 Wellen auch ganz gut so vorstellen kann, daß die elektrischen und magneti-  
 schen Feldstärke Schwingungen, d.h. periodische Intensitätsänderungen  
 ausführen. Zu den De Broglieschen Wellen findet man aber eigenartiger Weise  
 nicht einmal ~~ein~~ passendes abstraktes Subjekt. Schrödinger hatte zwar eine

plausibel

Deutung der Wellen versucht, die in gewisser Hinsicht recht passabel aussieht, aber gewisse innere Widersprüche in sich trug, so daß sie gegenwärtig von der Mehrzahl der Physiker abgelehnt wird. Schlimmer vielleicht als die ungelöste Frage nach dem Subjekt der Schwingungen ist der Umstand, daß die als Lösung der Schrödingerschen Gleichungen auftretenden Wellen gar keine Schwingungen im eigentlich physikalischen Sinn, also in Raum und Zeit periodisch veränderliche Vorgänge sind. Sie spielen sich nämlich ~~noch~~ gar nicht im dreidimensionalen Raum der realen Welt, sondern im sogenannten Phasenraum des Systems, ~~das ist ein fiktiver~~, gedachter Raum, der so viel mal drei Dimensionen hat als die Zahl der miteinander in Wechselwirkung stehenden Partikeln des betrachteten Systemes beträgt. Das wäre beispielweise bei einem einzelnen Uran- Atom schon ein Raum von rund 280 Dimensionen, und bei Systemen von mehreren Atomen ein ~~noch mehrdimensionaler~~ Raum.

Die Schrödingersche Gleichung ist in den letzten Jahren noch durch eine von dem hochbegabten englischen Physiker Dirac stammenden Theorie erweitert und verallgemeinert worden. Dirac ist es gelungen, die Schrödingersche Gleichung in eine relativistisch invariante Form zu bringen, wodurch sich überraschender Weise zeigte, daß ~~der~~ im Jahre 1924 von Uhlenbeck und Goudsmit als kühne Hypothese eingeführte Elektronenspin, ~~aber~~ die ~~noch~~ Eigenrotation des Elektrons um seine eigene Achse, zwangsläufig schon aus der Wellengleichung folgt. Die an der Erfahrung sehr gut bewährte Theorie des Elektronenspins wäre dann also keine ad hoc eingeführte Zusatzannahme mehr wie früher, sondern ~~wurde~~ als ~~ein~~ organischer Bestandteil der allgemeinen Theorie schon in die Grundgesetze selbst ein. Dies ist zweifellos ein bedeutender Erfolg der Diracschen Theorie. Leider hat sie ~~auch~~ einen Haken, der kurz gesagt, darin besteht, daß nach ihren Formeln gelegentlich auch eine spontane Ladungsumkehr der elementaren Partikeln zu erwarten wäre, so daß man beispielsweise mit positiven Elektronen und negativen Protonen zu rechnen hätte. Da dies unseren bisherigen Erfahrungen widerspricht, scheint die Theorie doch wieder in eine Sackgasse geraten zu sein, in der sie nun schon seit drei Jahren dauerhaft steckt.

~~Wenn Ihnen jetzt der Kopf brummt, so werden Sie nur sagen müssen, daß Eddington mit seinem Verbot für Nichtbeschäftigte doch recht hatte. Im Frühjahr 1932 hatte ein Herr Leszynski den kühnen Versuch gemacht, den Lesern der Zeitschrift Koralle durch einen gemeinverständlich sein sollenden Artikel~~

die Theorie von Schrödinger und Dirac zu erläutern. Ich habe den Artikel selbst nicht gelesen; welchen Wiederhall er aber im Publikum gefunden hat, geht aus einem schönen Gedicht im Stile von Christian Morgenstern hervor, das ein Herr Baader aus Altona an die Koralle gerichtet hat. Das Gedicht lautet so :

Vom Einstein  
 Durch das Bohrloch der Planck zum Heisenberg,  
 Nahe bei Schrödingen an der Broglie,  
 Bin ich gegangen mit Ihnen,  
 Meine Damen und Herren Physikaliker,  
 Ehrenhaft, allen Ernstes, etcetera.  
 Und ich habe die Seele gefunden bei Ihnen  
 In der Richtung,  
 Mit der die Zeiträume des Geschehens  
 Und ihre Grenzen gestaltet werden  
 Vom ursprunglosen Ursprung in sich selber.

Aber jetzt mache ich Schluß mit Ihnen !  
 Denn in der Zauberei der photonen Magnetone  
 Neben dem Wasserstoffkern als dem Protonpol  
 Der Elektrone,  
 Zuzüglich der Neutrone, Matrone, Patrone,  
 Ba-, Ka-, Yin-, Yang-, Chinone, Zapone, Ione und Zitrone  
 Die insgesamt alle weit über das Bohnenlied  
 Hinausgehen,  
 Finden Sie selber sich nicht mehr zurecht, pardone !  
 Und ich verzichte mit Dank und mit Kompliment  
 Fürderhin  
 Auf Ihre Anschauungen und auf Ihre Nichtanschauungen,  
 Und auf alle Ihre Formeln !

Also sprach der gesunde Menschenverstand  
 Zur Koralle,  
 Da sie als Allerneuestes vom Allerneuesten  
 den Homo DIRACIENSIS LESZYNSKI  
 In die staunende Mitwelt und Umwelt  
 Ihrer atomalen Raumwellenspringfluten  
 Einfügte.

Sie sehen daraus ganz deutlich, daß der gesunde Laienverstand auf die neue Entwicklung der Theorie - milde gesagt - stark sauer reagiert. Die Abneigung gegen die Überspitzung der Theorie mag ja bis zu einem gewissen Grade gerechtfertigt sein; man darf aber nicht vergessen, daß die Schrödingersche Zauberformel tatsächlich wichtige neue Einsichten gewährte, auf die experimentelle Physik befruchtend eingewirkt hat und auch neue Erfahrungstatsachen vorauszusagen in der Lage war. Ich erwähne nur beispielweise, daß mit Hilfe der Schrödingerschen gleichung das Problem des Wasser-  
erwähnt

stoffmoleküls als  $H_2$  behandelt wurde und daß man durch Betrachtungen über die Symmetrie der Lösungen daraufgekommen ist, daß es zwei verschiedene Arten von Wasserstoffmolekülen geben ~~mögl.~~<sup>würde</sup>, die man als Para- und Ortho-Wasserstoff bezeichnet. Diese Verschiedenheit ist später durch Bonhoeffer und Harteck auch tatsächlich experimentell verifiziert worden. Weiters beginnt man auf Grund der Schrödingerschen Theorie jetzt allmählich das Wesen der sogenannten homöopolaren Valenz<sup>(en)</sup> zu ergründen; man hat Fortschritte auf dem Gebiet der statistischen Mechanik gemacht, erhält Aufklärungen über den Mechanismus der elektrischen Stromleitungen in Metallen u.s.w. Kurz gesagt, die Zauberformel erweist sich als ein vorzüglicher Führer und wirkt befruchtend auch jetzt schon, bevor man noch ihre Bedeutung richtig zu verstehen gelernt hat.

(richtig angepasste  
mitteilig)

Sicher ist aber, daß auf dem Gebiet der Quantenphysik ~~das adaequatae~~ Begriffssystem noch nicht gefunden worden ist. Die bisherigen Wandlungen haben nicht ausgereicht; ~~so~~ es wird der Phantasie und dem Spürsinn künftiger Theoretiker vorbehalten bleiben, jene Begriffe zu finden, mit denen man das Wirken der elementaren, atomaren Kräfte der Natur widerspruchsfrei beschreiben kann.