

1933

Die Wandlung des Begriffssystemes der Physik.

Entropie, Feinstärke, Wellenlänge, Brechungsquotient, Induktion u.a.w.
 von ~~W. Thirring~~ Hans Thirring.
 Nur unter Zuhilfenahme dieser Begriffe sind wir in der Lage, physikalische
 Erscheinungen exakt zu beschreiben, sie sind die Vokabeln der wissenschaftl.

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 ^{dem} neuesten vom Neuen wendete sich kürzlich der bekannte Physiker Millikan, ^{indem er ganz} in einem Speech über den Science 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 ^{wollen} bringen, wir ~~müssen~~ uns vielmehr mit der krisenhaften Gegenwart und mit der sich in unserer Zeit vollziehenden Wandlung des Begriffssystemes der Physik beschäftigen. Trotzdem muß ich aber ein bißchen weiter ausholen und auf einige Jahrzehnte in die Vergangenheit zurückgreifen, 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 Begriffssystemes 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 ungeahnten Tatsachenmaterial zutage gefördert, über das Ihnen Herr Mark im ~~ersten~~ 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,

Num. f. d. Setzer:

— Sperrdruck (für Eigennamen)
Kursiv

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

Der Inhalt der Naturlehre gipfelt ja in Aussagen über Relationen zwischen ^{den} einzelnen Begriffen. So können wir beispielsweise das Galilei-Newtonsche Grundgesetz der Mechanik in die Formel kleiden: Das Produkt aus Masse mal Beschleunigung eines Körpers ist gleich der auf ihn wirkenden Kraft. Das Energieprinzip ^{der Mechanik} ~~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~~ ^{ne} möglichst exakt, richtig und dabei ^{auch} 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 ^{ihrer} ~~eines~~ Gegenstandes eine Art Universalwissenschaft: ~~Die Physik, die sich ja mit den Erscheinungen der unbelebten Natur, mit Wechselwirkungen von Kräften, Materie, Strahlung u.s.w. beschäftigt.~~ Unter gleichen äußeren Bedingungen muß sich irgendein 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 direkt zugänglichen Mechanismus der Vorgänge macht (man denke z. B. an das Bohrsche Atommodell) Andererseits schafft ~~er~~ 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, ^{um ein} ~~daß~~ als Beispiel ^{heranzugreifen} ~~nur nebenbei~~, daß zu Zeiten von Faraday und Maxwell neben den ohne weiters verständlichen Begriffen der elektrischen und magnetischen Feldstärke ^(elektromagnetischen) noch Begriffe wie elektrische Verschiebung, magnetische Induktion, Maxwellsche Spannungen u.s.w., eingeführt worden sind, ~~die übrigens damals unter Zugrundelegung 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 von} aber ziemlich abstrakte Begriffe darstellen. Sie ^{sind} ~~sind~~ heute ein unbedingtes ^{sehr} notwendiger Behelf geworden, denn gerade sie ^{sind dasjenige, worüber} ~~gehen als abhängige Variablen in~~ die Maxwellschen Differentialgleichungen des elektromagnetischen Feldes ein, ^{Aussage machen} 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 ^{Art} 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, ^{aber} auch wenn ~~man~~ sie gar nicht mehr brauchen kann. Im großen und ganzen kann man ^{aber} wohl sagen, daß die Wissenschaftler einen guten Instinkt haben und daß sich auf ^{der} 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 ^{der} unmittelbaren Anschauung ^{und} Sinnesempfindungen hervorgegangen sind. Ich nenne nur die Begriffe: Geschwindigkeit, Beschleunigung, Trägheit, Kraft, Masse, Gewicht, ^{Wucht} lebendige Kraft, ^{Arbeit} ~~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 eines ^{Abstraktionsvorganges} sind. ^{In der folgenden Tabelle sind} ~~Ich habe Ihnen hier als~~ ^{willkürlich herausgegriffene} ~~Kostprobe~~ einige Beispiele physikalischer Begriffe aus den drei Teilgebieten Mechanik, Elektrizität und Wärme ^{zusammengestellt} ~~aufgeschrieben~~, wobei zu ^{oberst} ~~unten~~ die ^{Elementar} ~~Grund~~ begriffe stehen, während nach ^{unten} ~~oben~~ hin die durch weitere Abstraktion hergeleiteten Begriffe angeordnet sind. ^{Auch die Willkürlichkeit} ~~Jeder von Ihnen~~ wird ^{wohl} ~~mit den~~ ^{über} ~~unter~~ dem Strich stehenden Begriffen ~~ganz leicht~~ eine bestimmte Vorstellung verknüpfen können, während die ^{unter} ~~über~~ dem Strich stehenden Begriffe sicher auch für manche sonst hochgebildete Leute, die physikalische Laien sind, leere Worte ohne vorstellbaren Inhalt bedeuten.

Mechanik

Elektrizität

Wärme

Geschwindigkeit
Masse
Kraft
Dichte
Energie

Ladung
Feldstärke
Spannung
Strom
Widerstand

Temperatur
Wärmemenge
spez. Wärme
~~spez. Volumen~~
Druck

Trägheitsmoment
Spannungstensor
Lagrange-Funktion
Hamilton-Funktion
Wirkungsintegral
Kanonische Variable

Gegeninduktivität
Widerstandsoperator
Vektorpotential
Strahlvektor
Maxwellsche Spannung
Feldimpuls

Polytrope
Adiabate
Thermodynam. Koeffizient
Entropie
Freie Energie
Stoffpotentiale

Verästelung *Sublimierung*
 Diese ~~Verstellung~~ 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 *verfeinert* 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 Wissenschaften 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, soweit es die experimentelle Seite der Physik betrifft, in die *Neunziger* Jahre des vorigen Jahrhunderts. Wie schon *Hier* 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 ~~wird~~ lernen können. *hier* Wie so oft im Leben, ist es *aber auch hier* ganz anders gekommen, als man es erwartet hat, gerade in jenem Moment, wo man *meinte* geglaubt 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 *von* Kathodenstrahlen erregte 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

weiteren physikalischen Forschung gegeben hat, ein Impuls, der eine ganz neue Epoche dieser Wissenschaft eingeleitete. Röntgens Entdeckung hatte nämlich das Interesse der Physiker für jene Substanzen geweckt, die Fluoreszenzstrahlung verursachen. Der französische Physiker ~~Henri~~ Becquerel ~~XXXX~~ in Paris fand, daß Uransalze ganz von selbst eine Strahlung aussenden, die Fluoreszenz erregt, ^{und} 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, ^{worauf} Bohr hat dann durch Anwendung der Planckschen Quantenhypothese auf das Rutherfordsche Kernmodell die Enträtselung der Spektren erfolgreich beginnen können. Inzwischen waren durch Laues 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 ^{empfielen}, ~~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 ^{sogenannten} Quantentheorie zusammenhängen und die die Physiker und zum Teil auch die Chemiker seitdem dauernd in Atem halten. Parallel mit ^{dieser} ~~jener~~ Entwicklung läuft auch jene der Relativitätstheorie, die im Jahre 1905 einsetzte und schon 10 Jahre später von ihrem Schöpfer, Einstein, mit der Aufstellung der allgemeinen Relativitätstheorie zu einem gewissen Abschluß gebracht worden ist. Alles in allem kann man jedenfalls sagen, ^{Chemiker} 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 ~~unerschütterlich~~ unscheinbar aussehende und knapp an der Grenze der Beobachtungsmöglichkeit stehenden Erscheinungen der Quantenphysik eine vollkommene Revolutionierung unseres Begriffssystems bewirkteⁿ und die theoretische Physik in eine Art Sackgasse geführt haben, in der sie gegenwärtig noch steckt, ohne daß die gescheiterten Köpfe unserer Wissenschaft einen Ausweg wissen.

Als Beispiel für die neueren 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 ^{Umwandlung} Verbindung von Elementen ineinander ist prinzipiell ausgeschlossen. Wie man heute weiß, sind beide Hälften dieses Gesetzes falsch. Nämlich 1.) ^{Eine gegenseitige Verwandlung von} ~~Die Elemente können ineinander~~ ^{Umwandlung} ~~verwandelt werden~~; man kennt heute außer den drei radioaktiven Umwandlungsreihen noch eine Reihe anderer Elementerbindungen, 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 ^d also durch unsere neueren Einsichten so kategorisch dementiert, wie eine falsche Zeitungsmeldung durch eine tatsächliche Berichtigung nach ~~dem~~ ^{dem} ~~§ 12 des~~ Pressegesetz~~es~~.

Und doch gehören die neueren Erkenntnisse über Isotopen und Element-^{Umwandlungen} ~~verbindungen~~ 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 umststützend 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 ~~MAKKT~~ vereinfachen, indem sie die Vorstellung ermöglichen, daß alle materiellen Körper letzten Endes aus den beiden Urbausteinen, Elektron und Proton, zusammengesetzt sind. Die neueren Erkenntnisse über Isotopie und über Elementver**änd**lung 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 auch ~~Kollege~~ ^{Herr} 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 erörterten negativen 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~~ ^{umstürz-}lerisch gewirkt hat. Ich ~~kann~~ ^{im Rahmen dieses Vortrages} der Relativitätstheorie nicht mehr als eine Viertelstunde ~~widmet~~ ^{widmet}, es ist daher ganz ausgeschlossen, daß ich Ihnen hier ~~in aller Geschwindigkeit~~ ^{angezeigt wird} auch nur das Ideengerippe dieser Theorie ~~darlege~~ ^{darlege}. Ich muß diesbezüglich jene, die sich näher dafür interessieren, auf mein ~~gemeinverständliches~~ ^{im} Buch "Die Idee der Relativitätstheorie" ~~verweisen~~ ^{mit unseren Betrachtungen}. Was uns hier in diesem Zusammenhange ~~angeht~~ ^{angeht}, ist nur die Frage:

"Wie hat die Relativitätstheorie das Begriffssystem der Physik beeinflusst?"

Es wird ~~von den meisten~~ ^{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, ~~aber~~ ^{bevor} ich versuche, Ihnen den Sinn dieses Satzes zu verdeutschen, möchte ich ihn in einer für den ~~MAKKA~~ ^{Mathematiker} ohne weiteres verständliche Form bringen. Analytisch formuliert stellt sich ~~MAKKA~~ ^{MAKKA} die Minkowskische Fassung der speziellen Relativitätstheorie so da: Schon in der klassischen Physik mußten die Naturgesetze so gefaßt sein, daß die Gleichungen ~~gegenüber~~ ^{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 $x_4 = ict$ 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 nicht-mathematischen 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, 2) $AB = 1m$.~~

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 ~~gezeichnet~~ in einem gegenseitigen Abstand von 6 cm voneinander 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 Gültigkeit, solange die ausgezogene Gerade der Abbildung tatsächlich eine Horizontale ~~ist~~ 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 Parallele 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} ~~der~~ um rund 22° 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~~ ^{man} sie im Gymnasium lernt, auch ~~so zum Ausdruck bringen~~, ^{in folgender Weise zum Ausdruck bringen}, wie ich es hier aufgeschrieben habe: Wir fixieren die Lage der beiden Punkte durch Angabe ihrer rechtwinkligen Koordinaten und zwar einmal durch die Koordinate x und y bezogen auf jenes System, dessen x -Achse in der Horizontalebene ~~Wiens~~ ^{unseres eigenen Standortes} liegt und hierauf in Bezug auf ein Koordinatensystem $x' y'$, dessen x' -Achse parallel zur Horizontalebene ~~von Moskau~~ ^{des ungewählten fremden Ortes} liegt. Dann gilt die ^{en/} ~~hier aufgeschriebenen~~ Beziehungen:

$$\left. \begin{aligned} x_2 - x_1 &\neq x'_2 - x'_1 \\ y_2 - y_1 &\neq y'_2 - y'_1 \end{aligned} \right\} \quad r^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2, \quad (1)$$

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 2-dimensionalen Fall; im dreidimensionalen Raum werden die Invarianten durch einen entsprechenden dreigliedrigen Ausdruck gebildet.

^{Oder, nochmals} Wir versuchen das jetzt wieder in Worten ausgedrückt: Die Begriffe Horizontalentfernung und Vertikalentfernung haben keine absolute, selbständige Bedeutung, Aussagen über sie haben nur relative Giltigkeit, nämlich ~~ihre~~ 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 $x_4 = ict$ erkennen, immer die Lichtgeschwindigkeit c eingeht, die den ^{enormen} ~~normalen~~ Wert $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec hat, brauchen wir für unser Beispiel ^{etwas} ~~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, ^{z.B.:} ~~sagen wir~~ : heute Abend um $21^h 351/2^m$ findet plötzlich eine Eruption des Vesuvs statt, wir wollen ^{sie} ~~das~~ Ereignis A nennen. Denken Sie sich weiter : 24 Stunden später explodiert ⁱⁿ ~~dem~~ Planeten des Sirius ein Pulvermagazin, das sei das Ereignis B. Bezüglich 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 ^(etwa) ~~dagegen~~ das Ereignis B höher oben im Weltraum stattfand als A, oder "tiefer unten", das ^{würde} ~~hängt~~ natürlich davon ab, wie man im Weltraum eine Horizontalebene legt und welche Seite davon man als oben und unten bezeichnet. Daß ^{aber} ~~dagegen~~ A früher stattfand als B und daß das genaue Zeitintervall zwischen beiden Ereignissen ^{44 Stunden betrug} ~~$t = 24^h$~~ war, galt in der vorrelativistischen Auffassung als eine ~~absolute~~ Aussage von absoluter Bedeutung, ebenso wie ^{als Sachverhalt} ~~daß~~ der räumliche Abstand $r = 8,21 \cdot 10^{17}$ cm beträgt. Beide Aussagen sind von ^{dem} ~~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.

Denken Sie sich ^{weiter} 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 ^{Son-} ~~Son-~~ nensystem 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 ^{korrekt} ~~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 ^{wenn etwa der Prokyon sehr rasch bewegt wäre,} so gar 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 Beteigeuze würde für den räumlichen und zeitlichen Abstand der beiden Ereignisse wieder ganz andere Werte erhalten, sagen wir r'' und t'' . Es scheint also ein ^{arg} ~~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 $s^2 = x^2 - c^2 t^2$ (2) so würde gelten:

$x^2 - c^2 t^2 = x'^2 - c^2 t'^2 = x''^2 - c^2 t''^2$ (3)

Hier bedeutet c wieder die Lichtgeschwindigkeit: $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sec.

Erinnern Sie sich nur daran, daß auch schon im Rahmen der nicht-relativistischen Geometrie gewisse Ausdrücke, wie z. B. die Koordinatendifferenzen selbst, ~~als Invarianten gegenüber Drehungen des Bezugssystems~~ also ~~Koordinaten~~ 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 Mikowski'schen Aussage: Raum und Zeit für sich haben ihre Selbständigkeit verloren; nur die Union zwischen beiden, die wir als "Welt" bezeichnen wollen,

behält ~~man~~ selbständige, absolute Bedeutung."

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 keine vor der andern ausgezeichnet ist.

Die spezielle Relativitätstheorie hat uns also das 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 Herrn 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 Meinungs-differenzen aus. Über die Zulässigkeit und die logische Berechtigung der Vorstellungen der Relativitätstheorie besteht unter 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 Relativi-

hatte, unseren Antipoden müßte ja das Blut in den Kopf steigen, wenn die
 tätstheorie auf ein recht schlüpfriges und philosophisch sehr stark anfecht-
 bares 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
^{wie hier schon erwähnt.}
 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 Begrif-
 fen, 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}
~~Ich möchte~~ in diesem Zusammenhange ^{zu} 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~~ ^{sohen} schon direkt vom Stamm ^{einmal} jenes ^{baum} 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 Phy-
 sik niedergerissen, 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 ~~legt~~ ^{und allgemeine} aber nur an dem Mangel an Anschaulichkeit. Die spe-
 zielle 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 Gravita-
 tionslehre mindestens ebenbürtiges, in sich geschlossenes ^{Lehr/} Gebäude. Die Er-
 kenntnis, daß der Weltraum gekrümmt 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.

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

Wir kommen nun zur dritten Kategorie von Umwälzungen in der Physik und begeben 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 popularisieren sollte. Eddington sagt in einem seiner ausgezeichneten Werke : "Vor dem Gebäude der Quantentheorie sollte man folgende Warnungstafel aufhängen: Wegen Umbau und vollständiger Renovierung geschlossen, Nichtbeschäftigten ist der Eintritt strengstens untersagt."

~~Man~~ 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 ~~ausgewiesen~~, grundsätzlich wenigstens, ohne weiteres verstanden werden. Die Quantentheorie ist dagegen ihren Schöpfern selbst zugestandenmaßen 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 Strahlungsemission, also Entstehung der Spektren, ferner der Strahlungsabsorption, *Herz* der Zerstreuung, Dispersion, des Compton-Effektes, von dem Ihnen ~~Kollege~~ *Kollege* Mark im letzten Vortrag berichtet hatte - alle diese Elementarakte der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie gehören in das Gebiet der Quan-

Ein weiterer Fall, bei dem ~~es sich~~ auch nicht von vornherein ^{zu} ~~einsehen~~ ^{war} ~~läßt~~, ^{weßhalb} ~~warum~~ die Anwendung der diesbezüglichen Begriffe auf atomaren Dimensionen unzulässig sein sollte, ist die Erzeugung eines elektromagnetischen 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} ~~es~~ sehr genau berechnen läßt. Dieser Vorgang entspricht im wesentlichen gerade jenem, der sich in der Vertikalen ~~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 man ~~anfangs~~ ^{eine Zeit lang} zu schließen glaubte, daß die Maxwellschen Gesetze hinsichtlich der Wirkung eines Wellenfeldes auf eine Ladung und hinsichtlich der Erzeugung eines Wellenfeldes durch eine schwingende Ladung ohne weiteres auch auf das Einzelatom anwendbar seien und das richtige Resultat liefern müßen. 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 Zeemaneffektes. Bezüglich 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 Vortrage ausführlich dargetan, die Messungen über die Verteilung der Energie im ~~spektralen~~ Wärmestrahlenpektrum 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 vorhergeahnte Tragweite besaß und dazu auserkoren war, eine neue Epoche 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 ν , 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 $h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$

beträgt. Die Idee, daß die Strahlung nicht beliebig schwach sein könne, also eine diskontinuierliche, atomare Struktur habe, war der klassischen Theorie durchaus wesensfremd.

Später hat man weiter noch erkannt, daß es auch Fälle gibt, wo nicht nur eben merkliche Abweichungen zwischen der klassischen 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.

Später hat man aber erkannt, daß es auch Fälle gibt, wo nicht nur eben 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 den sogenannten stationären Bahnen vollkommen strahlungslos umläuft, also gar kein Wellenfeld erzeugt, was in unlösbarem Widerspruch mit den Grundgesetzen der Elektrodynamik steht. Dazu kommen noch weitere die vor Prof. Mark in seinem Vortrag erwähnten Versuche, aus denen sich die rätselhafte Doppelnatur 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 Vorstellungen der Elektrodynamik die 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

und die Schwingungsdauer immer kleiner mache, so wird selbstverständlich in entsprechendem Maße auch die Wellenfelder ⁹² 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} behauptete, daß die Maxwell schen Gesetze hinsichtlich der Wirkung eines Wellenfeldes auf eine Ladung und hinsichtlich der Erzeugung eines ^{elektrischen} Wechselfeldes durch eine schwingende Ladung ohne weiters auch auf das Einzelatom anwendbar seien, und das richtige Resultat liefern.

In diesen Annahmen ~~Es ist 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 Zeemaneffektes. Bezüglich gewisser Erscheinungen scheint also alles zu stimmen und ^{genau so} ~~genau so~~ ^{zu verhalten} ~~herauszu-~~ kommen, wie es die klassische Elektrodynamik verlangt, es findet sie im ersten Vor-
trag erwähnte ^{klassische Wechselwirkung} statt.~~

^{Später} hat man aber erkannt, daß es auch Fälle gibt, wo nicht nur ~~viele~~ merkliche Abweichungen auftreten, sondern wo die Sache überhaupt ganz und gar nicht stimmt. Ich erwähne nur als Beispiel, daß nach der Bohrschen Theorie der ^{spektren} Wasserstoffatome, die sich bis in die feinsten Details an der Erfahrung bestätigt hat, das Elektron des Wasserstoffatoms auf ^{den} einer sogenannten stationären Bahn ^{en} vollkommen strahlungslos umläuft, also gar kein Wellenfeld erzeugt, was in unlösbarem Widerspruch mit den Grundgesetzen der Elektrodynamik steht. Dazu kommen noch ^{Hahn} ~~weiter~~ die von Prof. Mark in seinem Vortrag erwähnten Versuche, aus denen sich die rätselhafte Doppelnatur des Lichts offenbart, derart, daß die Strahlen einmal Wellencharakter, einmal korpuskulare Natur haben. Aus allen Interferenz- und Polarisationserscheinungen des Lichtes glaubte man schon längst endgiltig sichergestellt zu haben, daß die Lichtstrahlen ~~Wellen~~ ^{und} ~~und~~ ^{zwar} elektromagnetische Wellen sind. Wenn also ein Atom Licht ausstrahlt, müßte ^{nach} sich nach den Vorstellungen der ^{Wellentheorie} ~~Wellentheorie~~ ^{Strahlungstheorie} 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 ~~Enegie~~ Energie, ^{die} ~~mansich~~ ^{ausbreitet} über die Oberfläche der ~~um~~ ^{vorstellt} das Atom geschlagenen Kugel ~~vorgestellt hatte~~, ^{in einem einzigen Punkt des Feldes lokalisiert auftaucht.} Und das selbst dann, wenn beispielsweise ^{das} emittierende Atom sich auf einem viel ~~et~~ ^Tausend 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 ^{er}klären. 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 endgiltig durchschaut zu haben glaubten, heute so rätselhaft sind wie mystische Fabeltiere, ^{etwa so} ~~ebenso~~ wie die Kentauren: ~~Unten~~ ^{er} Pferd, ~~oben~~ ^{er} Mensch.

Die Sachlage wurde noch verwickelter, aber auch noch interessanter, als sich aus den durch eine geniale Idee De Broglies angeregten Versuchen von Germer und Davisson ^{Korpuskular} ~~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 Art} ~~dieser~~ ^{die in Abb. wiedergegebenen} ~~Bespiele~~ ^{hier} gehören die von Mark und Wierl, und Sie hatten ja das letzte Mal Gelegenheit, ein solches Interferenzbild ^{dieser Versuche} ~~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 ausprasselnden Regentropfen erzeugt wird. Die Entdeckung der Elektronenbeugung, die zweifellos die wichtigste physikalische Entdeckung der letzten Jahrzehnte darstellt, zeigt nun, daß ~~eine~~ ^{ein} solcher prinzipieller Unterschied bei den Elementarwellen nicht durchwegs besteht, sondern unter Umständen nach beiden Seiten hin ~~ganzlich~~ ^{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 hatten 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 ^{einmal} ~~den~~ dem Allgemeinverständnis ^{relativ} ~~am~~ leichtesten 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 ~~IX~~ räumlichen Koordinaten zu messen. Die Heisenbergsche ~~MECHANIK~~ 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 ~~XXXXXX~~ 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 Δx bzw. Δmv wollen wir ferner den bei der Messung von Koordinate bzw. Impuls begangenen Fehler, also die Abweichung zwischen wirklichem und gemessenem 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

Gleichung (5) nach Δx bzw. Δmv auf, so erhält man

$$\Delta x = \frac{h}{\Delta mv}$$

$$\Delta mv = \frac{h}{\Delta x} \quad (6)$$

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 ~~XXXX~~ 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 Ultraviolett, Röntgenstrahlen oder Gamma-Strahlen. Da nun elektromagnetische Wellen gemäß Planck immer nur in ganzzahligen Vielfachen eines Minimalquantum $h\nu$ auftreten können, hat die Strahlung selbst gewissermaßen eine atomare, körnige Struktur, derart, daß ~~man~~ 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 ~~X~~ Vergrößerungsmaßstab einer photographischen Platte bildet. Daß es dabei gerade zu der durch die ~~HEISENBERG~~ Formel () gegebenen Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation kommen muß, läßt sich in folgender Weise plausibel machen: Nach Planck beträgt die Energie eines einzelnen Strahlungsquants $h\nu$. Einstein hat später die wichtige Erkenntnis hinzugefügt, daß der Impuls (die "Stoßkraft") jedes solchen Strahlungsquants durch $\frac{h\nu}{c}$ gegeben sei, wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Wie nun aus der Erscheinung des Comptoneffektes hervorgeht, findet beim Auftreffen eines Strahlungsquants auf eine Elektron tatsächlich eine Impulsübertragung statt, d.h. das Elektron erleidet einen Rückstoß, sein Impuls ändert sich um einen Betrag Δmv , der proportional $\frac{h\nu}{c}$ ist, also umso größer ausfällt, je größer die Frequenz ν 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 Δx 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 Einsteinschen 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.

Man erkennt aus der Heisenbergschen Formel (5), daß die atomare Struktur der Strahlung sich auf die mit Hilfe irgendwelcher Strahlen vorgenommenen Messungen in komplizierterer Weise auswirkt als etwa die atomare Struktur der Materie überhaupt auf die Längenmessungen der Körper. Die Tatsache, daß die materiellen Körper aus Atomen aufgebaut sind, deren Durchmesser in der Größenordnung von rund 10^{-8} cm liegen, hat einfach zur 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 Zehnmilliontel 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 beliebig 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 ~~XXXXXX~~
 der Spektrallinien aus den supponierten Eigenschaften des
 die Strahlung emittierenden Atomes zu berechnen. Heisenbergs
 Quantenmechanik geht von dem durchaus gesunden und einleuch-
 tenden 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 beschrän-
 ken, einige Andeutungen über die von ~~XXXXX~~ Schrödinger stammende
Wellenmechanik zu machen, was wir umso eher tun können, als
 trotz ihres gänzlich verschiedenen Ausgangspunktes die beiden
 Theorien von ~~XXXX~~ 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 beschränken kann, einige Andeutungen über diese Theorie zu machen. Schrödinger, ein Wiener Kind, auf ^{das} ~~den~~ wir alle sehr stolz sein können, hatte im Jahre 1925 durch eine unfassbar geniale Intuition seine berühmte Wellengleichung gefunden, die seit sechs Jahren das Gebiet der Quantentheorie fast souverän beherrscht. Die Schrödingersche Gleichung stellt die Differentialgleichung für die ^{nicht erweiterten} ~~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 ^a ~~lange~~ ^{erreicht} nicht gelungen. 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 hin- und hergehende Bewegungen ausführen. Bei den elektromagnetischen Wellen hatte man ursprünglich einen hypothetischen 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 magnetischen Feldstärke Schwingungen, d.h. periodische Intensitätsänderungen ausführt. Zu den De Broglieschen Wellen findet man aber eigenartiger Weise nicht einmal ein passendes abstraktes Subjekt. Schrödinger hatte zwar eine

Deutung der Wellen versucht, die in gewisser Hinsicht recht ~~passabel~~ ^{plausibel} aussah, 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 ^{im} physikalischen Sinne, also in Raum und Zeit periodisch veränderliche Vorgänge sind. Sie spielen sich nämlich ~~gar~~ gar nicht im dreidimensionalen Raum der realen Welt, sondern im sogenannten Phasenraum des Systems, ^{ab) d. h. in einem} ~~das ist ein~~ fiktiven, gedachten Raum, der so viel mal drei Dimensionen hat als die Zahl der miteinander in Wechselwirkung stehenden Partikeln des betrachteten Systemes beträgt. Das wäre beispielsweise bei einem einzelnen Uran-Atom schon ein Raum von rund 280 Dimensionen und bei Systemen von mehreren Atomen ein ~~nach mehrdimensionalerer Raum~~ ^{Raum von noch höherer Dimensionalität}.

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} ~~das~~ im Jahre 1924 von Uhlenbeck und Goudsmit als kühne Hypothese eingeführte „Elektronenspin“, ^{d. i.} ~~also die~~ ~~XXX~~ 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 ^{ginge} ~~geht~~ 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 ^{aber} ~~auch~~ einen Haften, 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 ^{etwa} 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 Planke 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 ⁽¹⁰⁾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. ^{Es sei} ~~Ich erwähne~~ nur beispielsweise, daß mit Hilfe der Schrödingerschen ~~gleichung~~ ^{gleichung} das Problem des Wasser-

erwähnt

stoffmole~~k~~^{als} H_2 behandelt wurde und daß man durch Betrachtungen über die Symmetrie der Lösungen daraufgekommen ist, daß es zwei verschiedene Arten von Wasserstoffmole^ekü^{mine}keln geben ~~muß~~, 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^{en} 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.

Sicher ist aber, daß auf dem Gebiet der Quantenphysik das ~~adä-~~^(richtig angepaßte)~~quate~~ Begriffssystem noch nicht gefunden worden ist. Die bisherigen Wandlungen haben nicht ausgereicht; ~~es~~ 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.