

Werk

Titel: Max Planck zum sechzigsten Geburtstage

Autor: Sommerfeld , A.

Ort: Berlin

Jahr: 1918

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0006 | LOG_0147

Kontakt/Contact

Digizeitschriften e.V.
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

Max Planck zum sechzigsten Geburtstage.

Von Geheimrat Prof. Dr. A. Sommerfeld, München.

Plancks sechzigster Geburtstag bietet der deutschen Physik eine erwünschte Gelegenheit, sich bewußt zu werden, wie viel sie diesem klaren und kühnen Geiste verdankt. Unter dem Einfluß seiner großen Entdeckung, der Quantentheorie, die er uns an der Schwelle des zwanzigsten Jahrhunderts beschert hat, gestaltet sich die Physik unseres Jahrhunderts in steigendem Maße zu einer Physik der Quanten. Wir sehen heute klar, daß die feinsten Fragen der Atomistik und die allgemeinsten Eigenschaften der Materie in dem Planckschen Quantenbegriff wurzeln; kein Kundiger wird im Zweifel darüber sein, daß er das Plancksche Wirkungsquantum, neben der Lichtgeschwindigkeit, der Gravitationskonstanten und neben der Ladung und Masse des Elektrons, zu den wichtigsten Naturkonstanten der heutigen Wissenschaft zu zählen hat.

Max Planck ist geboren zu Kiel am 23. April 1858. Sein Vater, ein angesehener Professor der Rechte, wurde 1867 von Kiel an die Universität München berufen und spielte dabei selbst als Vertrauensmann seiner Kollegen im Verwaltungsausschuß der Universität bis zu seinem Lebensende eine bedeutsame Rolle. Auch ein Oheim Plancks war Jurist: der ehrwürdige, früh erblindete Schöpfer des Deutschen Bürgerlichen Gesetzbuches, Professor der Rechte in Göttingen. Der Großvater dieser Plancks wirkte ebenfalls an der Universität Göttingen; ursprünglich schwäbischer Geistlicher, wurde er dorthin als Professor der Theologie berufen.

Max Planck hat nicht nur seine Jugend in München verlebt, sondern vollendete hier auch seine Universitätsstudien und war 1880 bis 1885 Privatdozent der theoretischen Physik an der Münchener Universität. Bei seiner Berufswahl soll er geschwankt haben zwischen Physik und Musik. Wir dürfen uns heute beglückwünschen, daß er die Physik endgültig zur Lebensaufgabe gewählt hat. Die Musik ist ihm ohnehin als Quelle der Erfrischung und Verjüngung nach arbeitsreichen Stunden unverloren geblieben. Einen literarischen Niederschlag seiner tiefgehenden musikalischen Interessen haben wir in der Abhandlung (24)¹⁾ über das rein gestimmte Harmonium. Planck spielt nicht nur meisterhaft Klavier, sondern beherrscht auch jenes vieltastige, auf Veranlassung von *Helmholtz* gebaute und im physikalischen Institut der Berliner Universität aufgestellte Harmonium. Ein anderer Jungborn ist ihm die Bergwelt; Planck hat bisher jeden

Sommer große und schwierige Bergbesteigungen unternommen.

Die wissenschaftliche Persönlichkeit Plancks wurzelt in der Thermodynamik. Schon seine Dissertation (1), München 1879, ist dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie gewidmet. Er unterscheidet hier die physikalischen Prozesse in solche, für die die Natur eine Vorliebe hat (irreversible Prozesse) und solche, gegen die sie sich indifferent verhält (reversible Prozesse). In einer späteren Arbeit (25) bezeichnet er als Kern des zweiten Hauptsatzes geradezu die Tatsache, daß es überhaupt irreversible Prozesse gibt. Die Dissertation des Einundzwanzigjährigen macht einen ausgesprochen jugendlichen und enthusiastischen Eindruck und zeichnet den Weg vor, auf dem sich Plancks Gedankengänge für mehr als ein Jahrzehnt bewegen sollten.

Auch die Habilitationsschrift (2), München 1880, „Gleichgewichtszustände isotroper Körper in verschiedenen Temperaturen“, betrifft die Thermodynamik, ebenso wie die ganze Folge von Arbeiten bis zum Jahre 1893, (3) bis (23), unter denen die vier großen Abhandlungen „Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie“ (8), (9), (10), (20) hervorzuheben sind. Als Göttinger Preisschrift gekrönt wurde die Monographie: „Das Prinzip der Erhaltung der Energie“ (7). Ursprünglich im Ladenburgschen Handwörterbuch der Chemie und dann als selbständige Schrift erschien 1893 der „Grundriß der allgemeinen Thermochemie“ (26).

Plancks thermodynamische Arbeiten gehen in erster Linie auf die Klärung der Begriffe und verfolgen vielfach die methodischen Fragen (54), (56): Wieviel läßt sich aus der reinen Thermodynamik, also mit apodiktischer Gewißheit ableiten? An welchen Stellen treten neue Hypothesen physikalischen oder chemischen Ursprungs hinzu? Sind idealisierte Prozesse, die mit unwirklichen Zuständen operieren, thermodynamisch beweiskräftig? Um den Inhalt der thermodynamischen Hauptsätze auszusehöpfen, bevorzugt Planck, ebenso wie Gibbs, die Methode der thermodynamischen Potentiale gegenüber der Verwendung eigens ersonnener Kreisprozesse, die in den Darstellungen der Chemiker vorwiegen. Offenbar entspricht der axiomatische Charakter des thermodynamischen Schlusses in besonderem Maße Plancks intellektuellen Neigungen.

Von seinem allgemeinen thermodynamischen Standpunkte aus wurde Planck mit Notwendigkeit zu den wichtigsten Errungenschaften der physikalischen Chemie hingeleitet, die, auf ganz anderen Wegen gewonnen, eben damals hervor-

¹⁾ Diese Zahlen beziehen sich auf das nachfolgende Verzeichnis der Publikationen.

schossen. *Planck* leitete das Massenwirkungsgesetz von *Guldberg* und *Waage* für gasförmige Systeme ab (9), (10), er beleuchtete die Theorie der verdünnten Lösungen von *Van't Hoff*, faßte den Begriff des osmotischen Druckes thermodynamisch (10), (16) und er wurde, von den Tatsachen der Dampfspannungs- und Gefrierpunktserniedrigung und in konsequenter Verfolgung thermodynamischer Forderungen, auf die Dissoziationstheorie geführt. Sein Verhältnis zu den gleichzeitigen Arbeiten von *Arrhenius*, die in bezug auf das Tatsachenmaterial natürlich viel weiter gingen, schildert er selbst (12) wie folgt: „Inzwischen ist von *S. Arrhenius* ein Aufsatz über die Dissoziation der in Wasser gelösten Stoffe erschienen, in welchem der Verfasser ganz denselben Gedanken ausspricht und für eine Reihe wässriger Lösungen nach verschiedenen Richtungen durchführt. Wenn auch die Grundlage seiner Ausführungen: die durchgreifende Analogie, die er für das Verhalten des osmotischen Druckes in verdünnten Lösungen mit dem des Druckes vollkommener Gase festsetzt, wohl noch nicht den Rang eines vollgültigen Beweises beanspruchen dürfte, so scheint mir doch der Umstand, daß ganz unabhängig von den rein theoretischen Erörterungen die nämlichen Ideen von chemischer Seite angeregt und durch die verschiedenartigsten Gründe unterstützt werden, ein Anzeichen dafür zu sein, daß auch in diesem Falle wieder die Forderungen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie mit der Zeit eine durchgehende Anerkennung finden werden.“

Als Abschluß seiner thermodynamischen Periode hat uns *Planck* in seinen „Vorlesungen über Thermodynamik“ 1897 das zuverlässigste und durchdachte Lehrbuch dieser Wissenschaft geschenkt; der große Einfluß desselben auf Physiker und Chemiker geht schon aus der Anzahl seiner Auflagen (5. Auflage 1917) hervor. Unter Ausschaltung aller statistischer und kinetischer Vorstellungen verfolgt es den thermodynamischen Gedanken in größter Reinheit bis zu seiner jüngsten Wendung im Nernstschen Wärmetheorem. Vielleicht darf bei dieser Gelegenheit angemerkt werden, daß die einfache und am weitesten gehende Fassung dieses Theorems (Verschwinden der Entropie im absoluten Nullpunkte), die *Planck* 1910 in der dritten Auflage der Thermodynamik zuerst veröffentlicht hat, dem Schreiber dieser Zeilen schon von *Minkowski* kurz vor dessen Tode mitgeteilt wurde.

Auf die Grenze zwischen der thermodynamischen und der elektrodynamischen Periode *Plancks* fiel der Streit um die Energetik und ihr Verhältnis zur Mechanik (Lübecker Naturforscherversammlung 1895). Neben dem eigentlichen Rufer im Streit, *Boltzmann*, hat auch *Planck* eine scharfe Absage „Gegen die neuere Energetik“ (29) verfaßt. Wenn auch seinen ursprünglichen thermodynamischen Neigungen die Voranstellung des Energiebegriffes zusagen

mußte (7), so konnte doch seinem klaren Urteil die mathematische und logische Schwäche der energetischen Ansprüche nicht entgehen. Diese Stellungnahme *Plancks* im Jahre 1896 ist um so bemerkenswerter, als er damals den Übergang zur atomistisch-statistischen Denkweise innerlich noch nicht vollzogen hatte. Später hat ja gerade *Planck* wie kein anderer für die Verbreitung und Vertiefung der Boltzmannschen statistischen Ideen gewirkt, insbesondere durch die Berechnung der Konstanten k des Boltzmannschen Prinzips aus den strahlungstheoretischen Daten und durch seine klassisch-einfache Ableitung der Zustandsgleichung idealer einatomiger Gase aus dem *H*-Theorem (55), die in dem Lehrbuch der Wärmestrahlung an bevorzugter Stelle als Vorbild für die Ableitung des Strahlungsgesetzes aufgenommen worden ist.

Planck hatte 1885 bis 1889 die theoretische Physik in seiner Vaterstadt Kiel vertreten und war dann durch das besondere Vertrauen von *Helmholtz*, der die Bedeutung des jungen Gelehrten früh erkannte, als Nachfolger *Kirchhoffs* an die Berliner Universität berufen worden.

Inzwischen hatte, durch *Maxwell* und *Hertz* verjüngt, die Elektrodynamik die führende Rolle in der Naturerkenntnis übernommen. Anschließend an die Arbeiten *Willy Wiens* stellte sich *Planck* das Programm, auf dem Gebiete der Strahlungstheorie die Elektrodynamik mit den thermodynamischen Prinzipien zu durchdringen. Dies Programm hat er, vom Jahre 1896 ab, mit seltenem Zielbewußtsein und Erfolge durchgeführt. Die ganze Reihe der Abhandlungen, (31) bis (50), dienen ausschließlich dieser als notwendig und zeitgemäß erkannten Entwicklungsphase des wissenschaftlichen Gedankens. Es ist ein schönes Beispiel wissenschaftlicher Konzentration, wie *Planck* während einer Reihe von Jahren nicht rechts und links blickend, sein Ziel im Auge behielt. Die gleichzeitigen Messungen der Physikalisch-technischen Reichsanstalt gaben ihm dabei die Möglichkeit, seine theoretischen Ergebnisse an der Erfahrung zu prüfen. Das Endresultat war, das Gesetz der „schwarzen Strahlung“, der „Energieverteilung im Normalspektrum“ (43), (49), das seitdem als „Plancksches Strahlungsgesetz“ weltberühmt geworden ist und sich bei allen späteren Strahlungsmessungen glänzend bewährt hat.

Der Weg, der zur Entdeckung des Strahlungsgesetzes geführt hat, war kein ganz gerader. *Planck* glaubte zunächst, aus seiner Theorie auf das vorher von *W. Wien* aufgestellte Strahlungsgesetz schließen zu sollen, welches nur einen Grenzfall (für tiefe Temperaturen oder kleine Wellenlängen) des allgemeinen Strahlungsgesetzes darstellt. Der andere Grenzfall (für hohe Temperaturen oder große Wellenlängen) die sogen. Rayleighsche Strahlungsformel, die sich vom Standpunkte der statistischen Theorie eigentlich zuerst hätte darbieten sollen, lag da-

mals *Planck* (ebenso wie *Wien*) fern und wurde erst durch die Messungen der Reichsanstalt (*Lummer-Pringsheim* und *Rubens-Kurlbaum*) zu Ansehen gebracht. „Der wichtigste und zugleich schwierigste Punkt der Untersuchung lag in dem Nachweis, daß eine durch den jeweiligen physikalischen Zustand des Systems vollkommen bestimmte Größe existiert, welche die Eigenschaft besitzt, bei allen in dem System sich abspielenden Vorgängen sich immer nur in einem bestimmten Sinne zu ändern, also, je nach der Definition ihres Vorzeichens, immer nur zu wachsen oder immer abzunehmen. Sobald eine derartige Funktion des Zustandes sich angeben läßt, ist zugleich auch der Nachweis geliefert, daß die physikalischen Vorgänge in dem System einseitig, irreversibel verlaufen, und daß sie beständig einem gewissen Endzustand, dem stationären Zustand, zustreben, welcher erreicht ist, wenn jene Funktion ihr absolutes Maximum bzw. Minimum annimmt“ (49). Es ist verständlich, daß das Suchen nach dem elektrodynamischen Analogon der thermodynamischen Entropie zunächst ein Tasten zwischen verschiedenen Möglichkeiten sein mußte und der Unterstützung durch die Erfahrung bedurfte. Immerhin waren durch *Plancks* konsequente Durchforschung des Gebietes die Möglichkeiten so eingeschränkt, daß er gewissermaßen mit dem zweiten Griff die endgültige Lösung faßte.

Noch wichtiger aber, als das Strahlungsgesetz selbst, sollte die Deutung werden, die *Planck* kurz darauf in einem Vortrag in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft am 14. Dezember 1900 (46), (47) der Ableitung des Strahlungsgesetzes untergelegt hat. In der Tat: Dieses Datum ist der Geburtstag der Quanten, zunächst der Energiequanten. *Planck* teilt die Strahlungsenergie des Schwingungsbereiches (ν , $d\nu$) in Einheiten von der Größe $h\nu$ und wendet auf diese die abzählenden Methoden *Boltzmanns* an. Damit war der Wissenschaft eine Aufgabe gestellt, die sie noch lange in Atem halten wird, die Aufgabe, die Förderung der Statistik nach einer scheinbar diskontinuierlichen Energiestruktur zu versöhnen mit der durchaus kontinuierlichen Ausbreitung der Energie im gesamten Erfahrungsbereich der Elektrizität und ganz besonders in dem der Optik.

Die Quanten führten zunächst ein ziemlich stilles, auf das Gebiet der Wärmestrahlung zurückgezogenes Dasein. *Planck* selbst wandte sich fürs erste anderen Arbeitsgebieten zu, auf die wir noch zurückkommen werden, und kehrte erst zehn Jahre später, im Jahre 1911, zu den Quanten zurück. Offenbar fühlte er das Bedürfnis, zunächst den nötigen Abstand und eine größere Unbefangenheit gegenüber seinen bisherigen Gedankengängen zu gewinnen. Diese selbst stellte er 1906 in musterhafter Weise dar in seinen „Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung“ (68). Wir verfolgen hier zunächst in

kurzer Übersicht die Entwicklungsgeschichte der Quanten, wie sie sich, anfangs unabhängig von *Planck*, sodann unter dem Einfluß seines Eingreifens vollzogen hat.

Neues Leben bekamen die Quanten durch *Einstein* 1907. Er übertrug die Temperaturabhängigkeit der Planckschen Resonatorenenergie auf den Wärmehalt der festen Körper überhaupt und konnte dadurch die Anomalien in der spezifischen Wärme der Körper befriedigend darstellen. Seitdem haben sich die Quanten überall bewährt, wo es die Erforschung der physikalischen Erscheinungen bei tiefen Temperaturen galt. Zunächst auf dem Gebiete der festen Körper in den großen Untersuchungen von *Nernst* über die spezifischen Wärmen, sodann in der Gastheorie bei der quantenhaften Entartung des zweiatomigen Wasserstoffs zu einem einatomigen Gase. Aber auch die Entartung des elektrischen Widerstandes (die Hyperkonduktivität der Metalle) und die Änderung der magnetischen Eigenschaften der Körper bei tiefsten Temperaturen weisen, wenn auch in vorläufig noch dunkler Form, die Wirksamkeit der Quanten auf.

Die universelle Bedeutung der Quanten wurde deutlicher, als weiterhin auch die reinen Strahlungsphänomene, unabhängig von jeder Temperaturskala, ihren Zusammenhang mit den Planckschen Quanten zeigten. Das erste Beispiel lieferte der lichtelektrische Effekt (*Einstein* 1905) und im Röntgengebiete die sekundären Kathodenstrahlen. Auch die Stokessche Regel der Fluoreszenz konnte *Einstein* durch die Quantenvorstellung verständlicher machen. *Stark* wurde durch die Quantentheorie zu fruchtbaren experimentellen Fragestellungen angeregt. In der Ausbeute der photochemischen Reaktionen zeigten sich die Energiequanten ebenfalls an. Daß die Härte der Röntgenstrahlen durch Quantengesetze geregelt wird, ist lange vermutet und heutzutage dadurch sichergestellt, daß das Wirkungsquantum h mit großer Schärfe aus der kurzwelligen Grenze des Röntgenspektrums experimentell bestimmt werden kann.

Im Verlaufe dieser Untersuchungen war der Nachdruck mehr und mehr verschoben von den Energiequanten $h\nu$ auf das Wirkungsquantum h . Hier nun griff *Planck*, dessen Augenmerk von jeher mehr auf Erfassung der prinzipiellen Zusammenhänge als auf Erklärung der einzelnen Erfahrungstatsachen gerichtet war, in die Quantendiskussion erneut ein. In seinem Vortrage (90) auf dem Solvay-Kongreß 1911 faßte er das Wirkungsquantum als den Elementarbereich der Wahrscheinlichkeit in der Zustandsebene (p , q) des Resonators auf und gewann von hieraus (95) einen direkten Zugang zum Nernstschen Wärmethem und zur Nullpunksentropie der Gase (110). Zugleich ging er von seiner Hypothese der Quantenabsorption und -emission über zu der neuen Quantenhypothese: kontinuierliche Absorption verbunden mit diskontinuierlicher Quan-

tenemission (88), (89). Diese „zweite Plancksche Quantenhypothese“ ergab sich als einziger Ausweg aus den logischen und erfahrungsmäßigen Schwierigkeiten, welche mit der ungeteilten Absorption eines ganzen Energiequantums, insbesondere im Röntgengebiete und im optischen Gebiete bei starker Verdünnung der Lichtenergie, verbunden waren. Der zweiten Quantenhypothese entspricht die zweite Auflage der „Wärmestrahlung“ 1913, in der der neue Standpunkt konsequent durchgeführt wird. Die Akten über die neue Quantenhypothese sind noch nicht geschlossen und werden auch von Planck nicht als abgeschlossen angesehen. Viele Physiker neigen nach dem Grundsatz „credo quia absurdum“ mehr der ursprünglichen Quantenhypothese zu, während sie die neue Quantenhypothese als einen abgeschwächten Kompromiß ansehen. Man darf aber nicht übersehen, daß die neueste Evolution der Quantentheorie im Bohrschen Atommodell auffallende Züge gemein hat mit der zweiten Planckschen Hypothese, nämlich die Strahlungsfreiheit des Oszillators (oder Rotators) in seinem allgemeinen Verhalten und die diskrete Quantenausstrahlung in besonderen Zuständen; auch die Nullpunktsenergie, aus der in der zweiten Planckschen Hypothese die diskrete Emission gespeist werden muß, findet eine gewisse Bestätigung in dem Verhalten Bohrscher Atome und in ihrer von der Temperatur unabhängigen inneren Eigenbewegung. Übrigens hat Planck neuerdings das Hilfsmittel seines Oszillators bei der Untersuchung der schwarzen Strahlung aufgegeben und bevorzugt das der Wirklichkeit näherstehende Bild des Rotators (106), (113), (114), mit welchem er die für die Quantentheorie charakteristischen Beobachtungen gewisser Absorptionsbanden diskutieren kann.

Die ganze Bedeutung der Quantentheorie für die Grundtatsachen der Physik und Chemie wurde aber erst 1913 klar, als Niels Bohr seine Theorie der Spektren und der Atome veröffentlichte. Wir wollen gewiß nicht den Anteil der Rutherfordischen Kerntheorie an dem Erfolge des Bohrschen Modelles unterschätzen und noch weniger die eigenen Leistungen Bohrs. Aber als eigentliches Fundament der Bohrschen Theorie müssen wir doch die Plancksche Quantenschöpfung ansehen. In dieser Überzeugung habe ich als Titel meiner diesbezüglichen Annalenarbeit absichtlich gewählt: „Zur Quantentheorie der Spektrallinien“ und ich war angenehm überrascht, denselben Titel über der zurzeit letzten Arbeit aus der Feder Bohrs zu lesen: „On the quantum theory of spectral lines“. Durch die Bohrsche Theorie wird die früher rätselhafte Rydberg-Ritzsche Konstante auf das Plancksche h zurückgeführt, wird der Aufbau der Atome quantenhaft begründet und die spektrale Ausstrahlung als Quantenemission erkannt. In den ersten Zeiten der Quantentheorie stellte man wohl die Aufgabe, das Plancksche h aus den Tatsachen des

Atomismus zu verstehen. Wir sehen jetzt deutlich, daß die Aufgabe umzukehren ist: „Man soll nicht das h aus den Abmessungen der Atome ableiten, sondern man soll die Existenz der Atome als Folge der Existenz des Wirkungsquantums ansehen“ (wie ich 1911 auf dem Solvay-Kongreß aussprach).

Über Bohr hinausgehend hat Planck selbst (104), (107) im Jahre 1916 gleichzeitig und in voller Übereinstimmung mit dem Verfasser dieser Zeilen diejenige allgemeine Formulierung der Quantengesetze für Systeme mehrerer Freiheitsgrade entwickelt, die zur feineren Theorie der Spektren erforderlich ist. Der allgemeine Standpunkt von der Überlegenheit des Wirkungsquantums über die Energiequanten bewährt sich dabei vollständig; an die Stelle der Phasenebene (p, q) und ihrer Wahrscheinlichkeitsbereiche tritt der Phasenraum und seine Strukturierung; die Energiequanten gibt es nurmehr im Spezialfalle des periodischen Oszillators. Seitdem hat sich das Anwendungsgebiet der Quanten ins Unbegrenzte erweitert. Es genüge, an die elektrische Zerlegung der Spektrallinien (Stärkeffekt) und an die diskontinuierlich auftretenden Geschwindigkeiten der β -Strahlen zu erinnern. Diese Erscheinungen bleiben ohne die Quantentheorie unverständlich, werden aber durch dieselbe nach Epstein bis in alle numerischen Einzelheiten wiedergegeben. Wenn die Welt erst wieder zu wissenschaftlicher Sammlung Zeit und Ruhe finden wird, sehen wir den größten wissenschaftlichen Überraschungen entgegen, die aus der Verbindung von Quantentheorie und Atomismus erwachsen werden.

Als die Lauesche Entdeckung bekannt wurde, hat sich mancher gewundert, daß eine neue Fundamentaltatsache auf dem Boden der klassischen Optik gewonnen werden konnte, die mit Lichtquanten nichts zu tun hatte. Die Sache änderte sich aber bald. Es war nur nötig, nach der Laueschen Methode das Spektrum der Röntgenstrahlen zu entwerfen, um darin die deutlichen Spuren der Quanten zu erkennen: in der Serien- und Dublettanordnung der Röntgenlinien und in der ultravioletten Grenze des kontinuierlichen Röntgenspektrums. Seit dieser Erkenntnis wissen wir, daß auch die inneren Teile der Schweratome, in denen die Röntgenstrahlen entstehen, von Quantengesetzen beherrscht werden, daß die Quantentheorie den Atomismus bis ins Innerste durchdringt.

Wir gehen von der Gegenwart und Zukunft der Quantentheorie zurück zu demjenigen Zeitpunkt, da der Schöpfer dieser Theorie seine Arbeit daran vorübergehend unterbrach. Er wandte zunächst seine für die Strahlung ausgearbeiteten Methoden auf die gewöhnliche Optik an. So erörterte er die Natur des weißen Lichtes (52), ergänzte die Drudesche Theorie der Dispersion nach Seiten der Strahlungsdämpfung und des molekularen Aufbaus der Materie (51), (62).