

Zur Entwicklung des Atombegriffs

(Vortrag vor dem Verein am 20. 3. 1964)

von Horst BRENZEL, Ulm

Mit 7 Abbildungen

Meine Damen und Herren!

Wie Sie wissen, geht die Atomvorstellung, d. h. die Vorstellung vom diskontinuierlichen Aufbau der Materie, bis in das fünfte vorchristliche Jahrhundert zurück. Herausgefordert von Parmenides, der in seiner Lehre von der „Wahrheit des e i n e n Seins“ die Verschiedenheit und Wandlungsfähigkeit der erscheinenden Dinge geleugnet, ihre Vielheit und ihr Werden für bloßen Schein erklärt hatte, entwarf Leukipp und sein Schüler Demokrit das erste Bild einer diskontinuierlichen Materie. Um die von Parmenides geleugnete Realität der sinnenfälligen Welt zu retten, führten sie kleinste Seinseinheiten — die Atome — ein, die sich zu Haufen verflechten können und dadurch sinnlich wahrnehmbare Körper — die Bestandteile unserer Erscheinungswelt — bilden. Form, Farbe und Größe dieser Atome waren nach Leukipp verantwortlich für die Verschiedenheit und Vielheit, ihre von Demokrit postulierte Beweglichkeit war die Ursache für die Wandlungsfähigkeit und das Werden der körperlichen Welt.

Trotz mancher Parallelen zu unserem heutigen Atombegriff handelt es sich bei Leukipp und Demokrit nicht um die echte Entdeckung der Atome im naturwissenschaftlichen Sinne. Ihre „kleinsten Seinselemente“ waren nur Konstruktionselemente für eine andere philosophische Schau der Welt und dienten lediglich dazu, Parmenides als philosophischen Gegner zu widerlegen und dessen undurchsichtige Lehre von der Wahrheit des einen Seins durch eine gedanklich einfachere und vor allem folgerichtige Theorie zu ersetzen. Es fehlt bei Leukipp und Demokrit jeder noch so primitive Versuch zum experimentellen Nachweis, also das typische Merkmal naturwissenschaftlicher Methode, wo der schönste Gedanke solange Hypothese bleibt, bis seine Richtigkeit experimentell erwiesen ist, und wo sich auch der Schöpfer einer Hypothese selbst völlig über den vorläufigen Charakter seiner Idee im klaren ist. Leukipp und Demokrit haben physikalisch gesehen die Atome nicht entdeckt, sondern nur zum Schaden des Parmenides erfunden.

Ebenfalls philosophische Gründe, genauer gesagt ein geistiger Feldzug gegen Descartes, dürften in der ersten Hälfte des siebzehnten Jahrhunderts Gassendi veranlaßt haben, Demokrits Atome wieder auszugraben. Gassendi wendet sich mit seinem atomistischen Weltbild gegen die Kontinuumslehre des französischen Mathematikerphilosophen, der den absolut leeren Raum leugnet und an dessen Stelle eine Art „Weltflüssigkeit“ setzt, aus der sich durch Wirbelbildung die Himmelskörper usw. formen. Auch Gassendi begründet seine Theorie rein philosophisch. Immerhin macht er sich Gedanken über die Gesamtzahl der Atome in der Welt und kommt ganz im Sinne der heutigen Physik zu der Entscheidung, daß es nur endlich viele Atome gibt. Dagegen trifft er bei der Frage nach der endlichen oder unendlichen Ausdehnung des Weltalls daneben und vertritt — wie von einem Philosophen der Renaissance zu erwarten ist — die unendliche Ausdehnung des Raumes.

Das erste rein naturwissenschaftlich begründete Atommodell ist erstaunlicherweise noch nicht hundertfünfzig Jahre alt und stammt von Avogadro und Dalton, die ohne jeden philosophischen Hintergedanken das physikalische bzw. chemische Verhalten der Stoffe beobachten und aus diesem Tatsachenmaterial Rückschlüsse auf die Struktur der Materie ziehen. Der Italiener Avogadro ist Physiker; er beschäftigt sich mit den Eigenschaften der Gase, erkennt die Bedeutung der Atomhypothese für diesen Problemkreis und weist nach, daß in gleich großen Raumteilen unabhängig von der Art des Gases immer gleich viele Atome bzw. Moleküle — das sind Daltons Atomverbände — enthalten sind, ferner daß die verschiedenen Litergewichte verschiedener Gase auf die verschiedene Größe ihrer Atome zurückzuführen sind. Der Engländer Dalton ist in erster Linie Chemiker; bei der Untersuchung, unter welchen Bedingungen sich verschiedene Stoffkomponenten zu chemischen Verbindungen vereinigen, stößt er auf die Atomtheorie und führt sie endgültig in die Chemie ein.

Daltons Überlegungen sind charakteristisch für das junge naturwissenschaftliche Denken; wir wollen daher eine davon nachvollziehen: Solange man an den kontinuierlichen Aufbau der Materie glaubt, also wenn es keine Atome gäbe, müßten sich zwei verschiedene Stoffe in jedem beliebigen Verhältnis zu einer chemischen Verbindung vereinen lassen. Eine chemische Verbindung müßte dabei in Ermangelung kleinster Bausteine, die miteinander in zahlenmäßig geordnete Wechselwirkung treten könnten, eine Art Legierung sein, bei der die beteiligten Stoffe in jedem gewählten Verhältnis einfach ineinanderfließen. Es müßten also beispielsweise soviel Wasserstoff-Sauerstoff-Verbindungen existieren wie es Möglichkeiten gibt, Wasserstoff und Sauerstoff zu mischen, d. h. unendlich viele. Das Experiment widerspricht dieser Folgerung aus der Kontinuumstheorie, weil es beweist, daß es nur z w e i Mischungsverhältnisse gibt, bei denen nach der chemischen Reaktion weder Wasserstoff noch Sauerstoff übrig bleibt; also ist die Kontinuumstheorie falsch.

Selbstverständlich ist mit dieser Überlegung — streng logisch gesehen — noch nicht die Existenz der Atome nachgewiesen, sondern nur die Kontinuumstheorie ad absurdum geführt. Erst wenn man zeigen könnte, daß keine dritte Theorie denkbar ist, oder die Atome gewissermaßen sichtbar machen könnte, wäre der Beweis zugunsten der Atome vollständig. Bei Dalton fehlt noch der direkte experimentielle Nachweis.

Auch Dalton und Avogadro dürften diese Lücke gespürt haben, denn sie sind mit Angaben über ihre Atome sehr vorsichtig und beschränken sich auf Eigenschaften, die vom damaligen Stand der experimentellen Physik und Chemie unmittelbar gefordert werden. Sie vermeiden damit im Gegensatz zu Leukipp, Demokrit, Gassendi und anderen jede spekulative Einstellung und befolgen eine Art „Minimalprinzip“ der naturwissenschaftlichen Forschung, wonach man keinem indirekt erschlossenen Objekt — hier den Atomen — Eigenschaften zuschreiben darf, die sich nicht dem Stand der Experimentierkunst entsprechend wenigstens in ihren Wirkungen überprüfen lassen. Dalton und Avogadro haben die Existenz der Atome nur glaubhaft gemacht und ein vorläufiges Modell entworfen, dessen Züge und Einzelheiten vom damaligen Stand der experimentellen Erfahrung bestimmt werden —, ein Modell, das andere Köpfe angereizt hat, es zu ergänzen, zu widerlegen oder in einer

vollendeten Form irgendwann experimentell zu bestätigen.

Entsprechend dem kleinen Bereich gesicherter Erfahrung war das Atommodell Daltons und Avogadros — und ihrer unmittelbaren Nachfolger — noch sehr einfach. In der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts stellte man sich die Atome als kleine Kugeln vor, die gleichmäßig mit Masse erfüllt sind und sich bei Zusammenstößen wie elastische Bälle verhalten. Gewicht und Größe richten sich nach der Art des chemischen Elements; die Atome verschiedener Elemente können sich zu größeren Verbänden, den Molekülen vereinigen.

Mit diesem anspruchslosen Modell konnten doch schon erstaunlich viele physikalische und chemische Fragen verstanden werden:

- a) Die Existenz verschiedener chemischer Elemente;
- b) die Erhaltung der Gesamtmasse der Stoffe, die an einer chemischen Reaktion beteiligt sind;
- c) das Gesetz von den konstanten Proportionen, wonach mehrere Stoffe beim Eingehen einer chemischen Verbindung nur dann restlos aufgebracht werden, wenn für die Komponenten das richtige, ganzzahlige Gewichtsverhältnis eingehalten wird;
- d) das Gesetz der multiplen Proportionen, das die Vereinigung gleicher Komponenten zu verschiedenartigen Folgeprodukten regelt;
- e) die Gasgesetze, d. h. die Zusammenhänge zwischen Druck, Volumen und Temperatur bei Gasen;
- f) die Auffassung der Wärme als mechanische Energieform samt den zugehörigen Gesetzen;
- g) die Übergänge zwischen den einzelnen Aggregatzuständen.

Die Liste ließe sich noch verlängern. —

Genau besehen hat die Atomtheorie der klassischen Mechanik das Kontinuumsproblem der Materie nicht gelöst, sondern nur in einen anderen Bereich verlagert. Das Innere der Atome ist nämlich nach wie vor kontinuierlich mit Masse belegt. Für das Verständnis der klassischen Probleme aus Physik und Chemie war der innere Aufbau der Atome unerheblich; die damit verbundenen Fragen wurden daher gar nicht aufgeworfen. Noch schlimmer: Über den vielseitigen äußerlichen Erfolgen der Atomistik hatte man bald vergessen, daß ein Problem der inneren Struktur überhaupt vorhanden ist und die Atome niemals als endgültig letzte Bausteine der Welt angesehen werden können, bevor die Frage ihres inneren Aufbaus nicht gelöst ist. Aus den scheinbar rein mechanischen Eigenschaften der vermeintlich letzten Bausteine zog man den Schluß, daß die gesamte Welt nur von mechanischen Gesetzen regiert wird. Die klassische Atomistik wurde mit ihrer einseitigen Betrachtungsweise zur Quelle und vielzitierten Stütze des philosophischen Materialismus.

Die Physik leidet heute noch unter dieser Entgleisung. Denn obwohl sie das mechanistisch-anschauliche Gefängnis längst aufgebrochen hat, ist Physik in den Augen des Laien immer noch identisch mit Mechanik. Die

Folge davon ist, daß die Physik unseres Jahrhunderts — je unanschaulicher und hintergründiger sie wird — laufend Freunde verliert, die sich lieber den besser verständlichen technischen Anwendungen zuwenden. Sie wenden sich von einer Physik ab, die sich offensichtlich selbst verrät, indem sie ihr ursprüngliches Ziel: die Deutung der Welt als große Maschine und die Konstruktion leistungsfähiger eigener Maschinen, zugunsten unbegreiflicher und verschrobener Theorien über Raum, Zeit, Licht, Materie, Energie und andere scheinbar klare Grundbegriffe aufgibt. —

Die Frage nach der inneren Struktur der Atome tritt zuerst um die Jahrhundertwende in den Vordergrund, angeregt durch die Entdeckungen des französischen Physikers Becquerel und des schwedischen Physikochemikers Arrhenius. Becquerel hatte den radioaktiven Zerfall der Atome entdeckt und nachgewiesen, daß die Atome dabei elektrisch geladene Partikel ausschleudern; Arrhenius hatte gezeigt, daß die Moleküle von Säuren, Basen oder Salzen bei Verwendung von Wasser als Lösungsmittel in Ionen — das sind elektrisch geladene Atome oder Atomgruppen — dissoziieren, d. h. aufgespalten werden.

Nach diesen Erkenntnissen konnten Atome weiterhin nicht mehr wie homogene Materieklümpchen betrachtet werden, vielmehr mußten sie elektrisch geladene Teilchen enthalten. Der englische Physiker Thomson — zuerst bekannt geworden durch die Entdeckung der wahren Natur der Kathodenstrahlen, die er als Ströme freier Elektronen nachgewiesen hat — paßt das Daltonsche Modell den neuen Gegebenheiten an. Seiner Ansicht nach sind die Atome im wesentlichen kontinuierlich mit Masse und positiver elektrischer Ladung belegt; darin eingebettet sind negativ geladene Kleinstpartikel: die Elektronen, die vom positiven Hauptteil des Atoms durch elektrische Anziehungskräfte an gewisse Ruhelagen gefesselt werden. Unter bestimmten Voraussetzungen verliert das Atom seine Elektronen und wird zum elektrisch geladenen Ion.

Abb. 1
Atommodell nach THOMSON
mit eingebetteten Elektronen.



Thomson gibt also die Unteilbarkeit der Atome auf und betrachtet sie als Summe materieller und elektrischer Bestandteile. Zwar bleiben die Atome elastisch und homogen mit Masse ausgefüllte Kugeln, die bei Zusammenstößen nur mechanischen Gesetzen gehorchen, aber die Bestandteile selbst werden von elektrischen Kräften zusammengehalten. Thom-

sons Modell übersteigt damit den Rahmen der reinen Mechanik; die Erweiterung war nötig, um neben den alten auch die neuen experimentellen Erfahrungen zu verstehen.

Den zweiten wichtigen Schritt auf dem Wege der Entmechanisierung des Atoms macht Rutherford, der seine entscheidenden Experimente 1911 vorläufig abgeschlossen hat. Mit Rutherford dringt der leere Raum in die Atome ein; der Begriff Elastizität verliert für Atome jeden anschaulich faßbaren Sinn, denn ihre Zusammenstöße können nicht mehr mit den Zusammenstößen von Billardkugeln verglichen werden.

Rutherford wiederholt einige Versuche von Lenard und beschießt dünne Metallfolien mit sogenannten Alphateilchen, das sind positiv geladene Partikel relativ großer Masse, wie sie von manchen radioaktiven Stoffen ausgeschleudert werden. Die beschossenen Folien sind zwar dünn, bestehen aber — gemessen am Durchmesser der Daltonschen bzw. Thomsonschen Atome — immer noch aus mehreren tausend Atomschichten. Dennoch durchdringen Rutherfords Geschosse diese mächtige Sperrmauer nahezu ungehindert —, der überwiegende Teil sogar ohne jede Ablenkung. Nur ein geringer Prozentsatz ändert seine Richtung, und höchst selten wird ein Geschöß ganz zur Umkehr gezwungen.

Es ist klar, daß dieser experimentelle Befund mit der alten Vorstellung kontinuierlich ausgefüllter Atomkugeln unvereinbar ist. Um diesen Widerspruch aus der Welt zu schaffen, entwirft Rutherford sein neues, berühmt gewordenes Atommodell: Jedes Atom besteht aus einem positiv geladenen Kern, dessen Masse über die Art des chemischen Elements entscheidet, und dessen Durchmesser — entsprechend Rutherfords Beobachtungen bei den Beschießungsversuchen — nur etwa ein Zehntausendstel des gesamten Atomdurchmessers betragen kann; um den Kern kreisen die negativ geladenen Elektronen Thomsons mit ihrer wesentlich geringeren Masse.

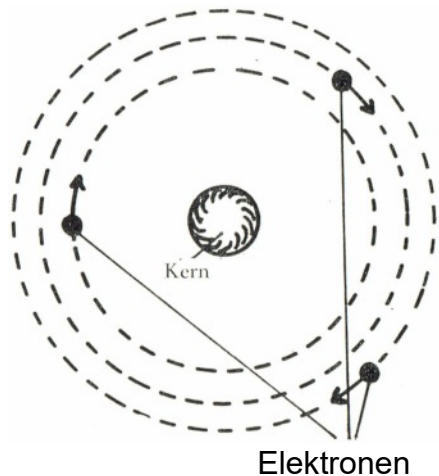


Abb. 2
Atommodell nach **RUTHERFORD**
mit Kern und Elektronenbahnen.

Für Rutherfords Modell ist neben der Leere im Atominnern die Bewegung charakteristisch, die er seinen Elektronen zuschreibt. Diese Bewe-

gung muß er voraussetzen, weil die Elektronen ohne kreisende Ausgleichsbewegung infolge der elektronischen Anziehungskräfte zwischen Partikeln verschiedener Ladung offensichtlich in den Kern stürzen müßten. Die Leere im Atom ist unvorstellbar: Könnte man Rutherfords Atombestandteile ohne Zwischenräume nebeneinander packen, so würde ein eiserner Würfel von normal zweihundertfünfzig Meter Kantenlänge auf ein Kügelchen von kaum sechs Millimeter Durchmesser zusammenschrumpfen!

Diese Leere macht verständlich, warum eine Sperrmauer aus mehreren tausend Atomschichten von Geschossen ohne weiteres durchdrungen wird. Ablenkungen und Rückpraller treten nur dann auf, wenn ein positiv geladenes Geschöß einem ebenfalls positiv geladenen Kern zu nahe kommt und von ihm elektrisch abgestoßen wird. Da die Kerne außerordentlich klein sind, tritt dieser Fall nur selten ein.

Für das Verständnis der Gasgesetze ist die Annahme unerläßlich, daß Atome bzw. Moleküle voneinander abprallen, wenn sie sich treffen. Rutherford führt diese Art Abstoßung ebenfalls auf elektrische Kräfte zurück: Sobald sich zwei Atome einander nähern, stoßen sich ihre negativ geladenen Elektronenhüllen gegenseitig ab und bewirken, daß sich die Atome wieder voneinander entfernen. Nach außen sieht das so aus, als wären elastische Kräfte wirksam: das Verhalten der Atome ist aber nicht — wie bisher angenommen — wirklich mechanisch, sondern nur pseudomechanisch. Dort wo der wahre Sachverhalt die Ergebnisse nicht beeinflussen kann, darf man ohne weiteres Daltons Modell weiter benutzen. Diese Freiheit in der Wahl eines Modells ist typisch für die Arbeitsmethode der modernen Physik: Die wirklichen Verhältnisse sind für die anfallenden Fragen oft unnötig kompliziert (welche Rolle könnte es z. B. spielen, w a r u m die Atome voneinander abprallen, solange es nur wichtig ist, daß sie es tun); man weiß darum und greift zum einfachsten Modell, das für den betreffenden Problemkreis noch ausreicht. Daher kommt es, daß auch der moderne Physiker oft noch von kreisenden Elektronen spricht, obwohl er längst nicht mehr an sie glaubt. —

Die Bedeutung des Rutherfordschen Atommodells, insbesondere auch für die Chemie, ist allgemein bekannt. Ich darf nur noch daran erinnern, daß es zum ersten Mal wenigstens teilweise die Ordnung im periodischen System der Elemente verständlich gemacht hat: Die Stellung eines Elements richtet sich ausschließlich nach der Anzahl seiner Rutherfordschen Kernladungen. Wie schon angedeutet, erfaßt das Modell unter neuem Aspekt auch alle früher bekannt gewordenen Erfahrungstatsachen (vgl. Gasgesetze). Die alte Welt der sichtbaren und greifbaren Körper behält äußerlich ihr vertrautes Gesicht; lediglich unsere Vorstellung vom inneren Bau dieser Körper wird modifiziert und vertieft. —

Nach Rutherford wird das Verhalten der Atome von elektrischen, genauer: elektrodynamischen Gesetzen beherrscht. Damit wendet er sich zwar von der Mechanik ab, aber nicht von der klassischen Physik schlechthin. Denn auch die Elektrodynamik ist ein — wenn auch jüngerer — Teilgebiet der klassischen Physik. Die endgültige Abkehr von der Klassik im Bereich der Atomvorstellungen blieb dem Dänen Niels Bohr **Vor**behalten.

Nach den Gesetzen der Elektrodynamik — so argumentiert Bohr — ver-

liert jede periodisch bewegte elektrische Ladung Energie, strahlt sie in Form einer elektromagnetischen Welle in den Raum ab. Die kreisenden Elektronen eines Atoms führen eine solche periodische Bewegung aus, müßten also Energie verlieren und innerhalb kürzester Zeit doch in den Kern stürzen. Eine Überschlagsrechnung ergibt für das Lebensalter der Rutherford'schen Elektronen nicht einmal eine einzige Sekunde —, ganz im Widerspruch zu der Erfahrung, wonach die meisten Atome äußerst langlebige Gebilde sind. Bohrs Einwand zeigt, daß der Tausch: elektromagnetisches gegen mechanisches Modell weniger glücklich gewesen war als es zunächst geschienen hatte. Andererseits sind Rutherfords Untersuchungen und Überlegungen so zuverlässig und eindeutig, daß sie an diesem Widerspruch kaum schuld sein können; es bleiben also nur noch die Grundlagen seiner Theorie als mögliche Fehlerquelle, d. h. die Elektrodynamik als solche. Ihre Gesetze aber sind ebenfalls vollkommen gesichert!

In diesem hoffnungslosen Durcheinander hat Bohr seine geniale Idee: Er stellt die Frage, an welchen Objekten die Gesetze der Elektrodynamik eigentlich gesichert wurden und stellt fest, daß die gesamte klassische Physik — also auch die Elektrodynamik — nur auf Erkenntnissen und Erfahrungen innerhalb einer dem Menschen unmittelbar vertrauten Größenordnung beruht. Die Atome hingegen gehören einer Größenordnung an, die weder durch die Sinne noch durch Meßinstrumente unmittelbar erfaßt werden kann. Alles Wissen über die Atome beruht nur auf Rückschlüssen, bei denen bedenkenlos angenommen wird, daß jedes Gesetz der vertrauten Makro-Dimension auch auf Objekte der unzugänglichen Mikro-Dimension angewendet werden darf. Bohr hält es dagegen für möglich, daß im atomaren Bereich teilweise Gesetze gelten, für die im makroskopischen Bereich keinerlei Zeichen vorhanden sind, für die es im groben Bereich der Sinne sogar nicht einmal Analogien gibt, und die vielleicht unseren ausschließlich am Verhalten grober Körper geschulten Denkgewohnheiten widersprechen.

Bohr denkt hier offensichtlich an das Gebiet der elektromagnetischen Wellen, wo es schon früher nötig geworden war, gewisse im makroskopischen Bereich gebildete und bewährte Grundbegriffe zu revidieren und mit völlig neuen Eigenschaften auszustatten, bevor sie verwendet werden können. Es handelt sich um die Quantelung der Energie: Immer wieder hatte man vergeblich versucht, das Gesetz, nach dem sich die Energie eines strahlenden Körpers auf die abgestrahlten Wellenlängen verteilt, theoretisch aus den bekannten Prinzipien der Thermodynamik und Elektrodynamik herzuleiten. Im Jahre 1900 konnte schließlich Max Planck nachweisen, daß man nur dann auf das richtige Verteilungsgesetz stößt, wenn man die landläufige Vorstellung von der Energie als einer beliebig unterteilbaren Größe aufgibt und statt dessen kleinste Mindest-

Portionen annimmt, in deren ganzzahligen Vielfachen jeder Energieaustausch stattfindet.

An diese Körnerstruktur der Energie erinnert sich jetzt Bohr beim Problem des Energieverlustes der Rutherford'schen kreisenden Elektronen. Sofern z. B. das dem Atomkern am nächsten befindliche Elektron nur ein einziges Energiequantum besitzt, kann es seine Entfernung vom Kern überhaupt nicht stetig verändern, also keine im Kern endende Spiralbahn beschreiben; denn dabei müßte es seine Energie stetig abstrahlen, was aber der Planck-

schen Erkenntnis widerspricht, daß die Energie eines einzelnen Quants nicht mehr teilbar ist.

Bei der Anwendung der Planckschen Quantentheorie auf das Rutherford'sche Atommodell findet Bohr einige jener bisher übersehenen Gesetze eines der direkten Beobachtung entzogenen Bereichs. Im einzelnen bleibt die Herleitung seiner sogenannten „Postulate“ noch lückenhaft. Die Physik begegnet Bohr daher verständlicherweise zunächst mit größter Skepsis und macht ihm zum Vorwurf, daß die neuen Gesetze einseitig nur für atomare Partikel gelten, sich aus den klassischen — sprich: liebgewordenen — Grundvorstellungen überhaupt nicht und logisch lückenlos auch nicht aus der ohnehin noch fragwürdigen Quantentheorie herleiten lassen.

Bohrs Postulate können etwa folgendermaßen formuliert werden:

1. Jedes Elektron im Atom kann Energie nur „löffelweise“ aufnehmen bzw. abgeben; es kann sich nur auf wenigen Bahnen aufhalten, dort aber ohne Energieverlust durch Strahlung.
2. Die zugelassenen Bahnen sind so bemessen, daß das Produkt aus Elektronenimpuls und Bahnlänge stets ein ganzzahliges Vielfaches des Planckschen Wirkungsquantums ist. (Das Plancksche Wirkungsquantum ist die wichtigste Naturkonstante der Quantentheorie und reguliert die Mindestgrößen der Energiequanten.)

Die Ablehnung der Bohrschen Postulate dauerte nicht lange. Ihre praktischen Erfolge konnten bald den größten Skeptiker überzeugen: Erstens ordnen sich alle Erscheinungen, die von früheren Modellen richtig beschrieben wurden, auch dem Bohrschen Modell unter. Zweitens berechnet Bohr in bester Übereinstimmung mit der Erfahrung die Durchmesser der Atome. Drittens stellt er eine bestechende Theorie für das Wasserstoffatom und seine Spektrallinien auf und berechnet die bisher nur empirisch ermittelte Rydbergkonstante. Viertens erklärt er weitgehend die Leuchterscheinungen beim Durchgang elektrischer Ladung durch verdünnte Gase —, fünftens die Fluoreszenz, bei der die Atome durch Lichtzufuhr veranlaßt werden, ihrerseits zu leuchten —, und vieles andere mehr.

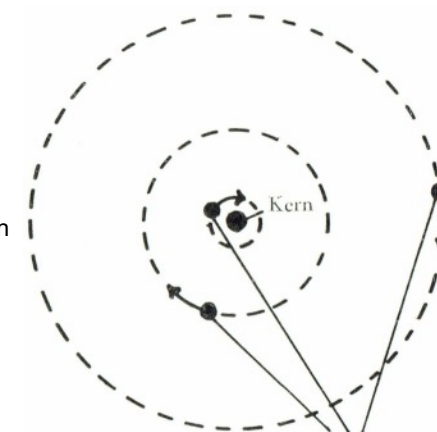


Abb. 3
Atommodell **nach BOHR.**
Die Radien der Elektronenbahnen
verhalten sich wie 1 : 4 : 9 : ...

Elektron auf verschiedenen zugelassenen Bahnen

Die Radien der Elektronenbahnen verhalten sich wie 1 : 4 : 9 : . . .

Physik und Chemie stehen bald ganz im Zeichen des Bohrschen Atommodells. Bohrs physikalischer Instinkt hatte sich nachträglich an der Erfahrung glänzend bewährt.

Vor Bohr hatte die physikalische Welt gewissermaßen nur ein einziges, der Mikro- und Makrophysik in gleicher Weise aufgeprägtes Gesicht besessen. Die Mikrophysik war ein ungeheuer verkleinertes Abbild der sichtbaren Welt gewesen, beherrscht von den gleichen Spielregeln und Gesetzen. Die Modelle hatten nur dazu gedient, die kleine Welt im richtigen Maßstab zu vergrößern und damit sichtbar zu machen. Seine Atome dagegen bilden physikalisches Neuland mit fremdartigen, höchst unanschaulichen Gesetzen. Durch bloße Vergrößerung kann es nicht anschaulicher gemacht werden. Der Begriff „Modell“ beginnt mit Bohr seine Bedeutung zu wandeln; er wird zu einem Gleichnis und beschreibt nur das Verhalten „als ob“. Wir haben es inzwischen ganz auf gegeben, uns über das sogenannte „wahre“ Aussehen der Atome überhaupt Gedanken zu machen. Ein Atommodell ist „richtig“, soweit die Folgerungen aus ihm mit der experimentellen Erfahrung übereinstimmen. Manchmal aber verhalten sich Atome auch so, als ob sie kleine Kugeln wären. Was uns also gescheiter als Dalton macht, ist nicht die größere Zahl von Einzelheiten, die wir inzwischen erfahren haben, sondern die Erkenntnis, daß Atome weder kleine Kugeln noch sonst etwas Beschreibbares sind. Diese Einsicht angeregt zu haben, ist vielleicht Bohrs größtes Verdienst. —

Bohrs Modell — wie auch das von Sommerfeld, der die Kreisbahnen der Elektronen durch Ellipsen ersetzt — ordnet den Atomen immer noch zu viele anschauliche Qualitäten zu. Sowohl die Elektronen wie auch der Kern bestehen bei Bohr noch aus Korpuskeln, d. h. kleinsten Materiekumpen. Diese Deutung ändert sich radikal, als der Franzose Luis de

Brogli die Wesensgleichheit von Materie und Strahlung postuliert. Hier die Vorgeschichte:

Materie und Strahlung können beide Energie transportieren — darin gleichen sie sich also von vornherein —, aber bei der Strahlung erfolgt dieser Transport ohne materiellen Träger (wie z. B. bei den Funk- und Fernsehwellen, die sich auch im leeren Raum ausbreiten). Verschiedene Strahlungen können gleichzeitig an der gleichen Stelle des Raumes sein, während von zwei Körpern immer nur einer diese Stelle zu einem bestimmten Zeitpunkt innehaben kann. Also Gegensätzlichkeiten, die einen Zusammenhang zwischen Strahlung und Materie kaum vermuten lassen. Mit einer Ausnahme: Der lichtelektrische Effekt beweist nach Einsteins Deutung, daß das Licht während seiner Ausbreitung durch den Raum zwar ein Wellen Vorgang ist, sich aber sofort wie ein Strom korpuskularer Teilchen, also wie etwas Materielles verhält, sobald es auf Materie trifft und mit ihr in Wechselwirkung tritt. Für Einstein besitzt das Licht eine Doppelnatur: es ist Welle und Korpuskel zugleich.

Bis 1923 hat die Physik geglaubt, daß dieser Dualismus Welle-Korpuskel ein auf das Licht beschränktes Kuriosum sei; da man vom Licht allerhand Kummer gewöhnt war, regten sich die nicht unmittelbar an der Optik Interessierten verhältnismäßig wenig darüber auf. Sie wurden aber recht unsanft

aus ihrem Dämmer Schlaf geweckt, als der Engländer Davisson seine sensationelle Entdeckung machte und experimentell nachwies, daß Elektronen Beugungserscheinungen zeigen. Noch gefährlicher für althergebrachte Vorstellungen wurde die Situation, als wenig später demonstriert werden konnte, daß auch die Bestandteile des Atomkerns Beugungserscheinungen zeigen und daher unbedingt Wellennatur besitzen müssen. Der Dualismus Welle-Korpuskel war also kein Kuriosum des Lichts, sondern ist — da alle Materie aus Atomen besteht — wesentliches Merkmal der gesamten physikalisch erfaßbaren Welt.

Als erster übernimmt Luis de Broglie den neuen Gedanken und beschäftigt sich theoretisch mit der Frage, welche Welle einem bestimmten Stück Materie zugeordnet werden muß. In seiner Zuordnungsvorschrift vertritt er den Standpunkt, daß Materie und Strahlung nur zwei verschiedene Kategorien sind, in denen wir die physikalische Welt beschreiben —, Modellbegriffe, hinter denen sich dieselbe nicht beschreibbare Wirklichkeit verbirgt. Seine Theorie bewährt sich glänzend bei den Atomen. Wendet man nämlich de Broglies Zuordnungsvorschrift auf die den Kern umkreisenden Elektronen an, so gehen sie in Wellen über, deren materielle Partner Bahnen beschreiben müssen, die dem zweiten Bohrschen Postulat gehorchen. Damit ist die Lücke in der Bohrschen Herleitung seiner Postulate geschlossen und außerdem klaggestellt, warum Bohr selbst diese Lücke nicht schließen konnte: Es fehlte ihm noch die tiefere Einsicht in die Doppelnatur der Materie, d. h. er hatte die Materie noch für das einzige Modell gehalten, das von der Bildungssubstanz der physikalischen Welt entworfen werden kann.

Die konsequente mathematische Durchdringung des Dualismus Welle-Korpuskel bleibt dem österreichischen Physiker Erwin Schrödinger vorbehalten. Er unternimmt es, die gesamte Physik dem neuen Gedanken unterzuordnen. Insbesondere kleidet er die Mechanik in ein neues Gewand durch den Entwurf seiner Wellenmechanik. Die Grundgleichung „Kraft = Masse • Beschleunigung“ der klassischen Mechanik muß dabei von einer tiefer angelegten Beziehung, der Schrödingerschen Wellengleichung, abgelöst werden. Die klassische Mechanik Newtons erscheint als Grenzfall, auf den man stößt, sobald man die Wellenmechanik auf im Vergleich zu den Atomen grobe Materienbrocken anwendet. An diesem Teil der Physik ändert sich daher sachlich gar nichts, außer daß man seither weiß, um wieviel komplizierter die Hintergründe der vertrauten Erfahrungswelt sind.

Zu bemerkenswerten Ergebnissen kommt man, wenn man Schrödingers Theorie auf Atome anwendet. Wie hervorgehoben, hatte sich noch Bohr die Elektronen als kleine, nahezu punktförmige Gebilde vorgestellt, die den Atomkern auf wenigen erlaubten Bahnen umkreisen. Elektronen mit gleichen Bahndurchmessern bilden dabei in der Bohrschen Theorie eine Art Hülle oder Schale in der gemeinsamen Entfernung dieser Elektronen vom Kern. Beim Helium trägt eine einzige Schale die beiden Elektronen dieses Gases, bei den übrigen Edelgasen — denen bekanntlich ihre besonders große chemische Stabilität gemeinsam ist — trägt die jeweils äußerste Schale oder Unterschale genau acht Elektronen. Diese zwei bzw. acht Elektronen bilden merkwürdigerweise einen in sich abgeschlossenen Bereich, in dem keine weiteren Elektronen Platz haben —, eine Tatsache, die unter der Bohrschen Annahme nahezu punktförmiger Elektronen völlig unverständlich ist. Rein

räumlich gesehen hätten Tausende von Elektronen auf einer Schale Platz.

Schrödingers Theorie macht die Zweier- bzw. Achtersättigung der Elektronenschalen verständlich. Aus seiner Wellengleichung folgt, daß Elektronen räumlich ausgedehnte Gebilde sind. Ihre Masse ist nicht punktförmig konzentriert, sondern über einen räumlichen Bereich ganz bestimmter Form verschmiert. Wie dann ein weiteres Elektron in das Atom eingebaut wird, hängt von der Form der schon vorhandenen Elektronen ab. Sobald eine bestimmte Umgebung des Kerns schon relativ gleichmäßig mit Elektronenmasse ausgefüllt ist, werden dort keine weiteren Elektronen angelagert; vielmehr kommt jetzt eine andere Umgebung des Kerns an die Reihe: die ursprüngliche „Schale“ ist gesättigt.

Schrödingers einfachste Elektronen haben folgende Formen:

- a) Das sogenannte 1s-Elektron gleicht einer Kugel, deren Substanz nach außen immer flüchtiger wird. — Der Wasserstoff besitzt eines, Helium zwei derartige Elektronen.

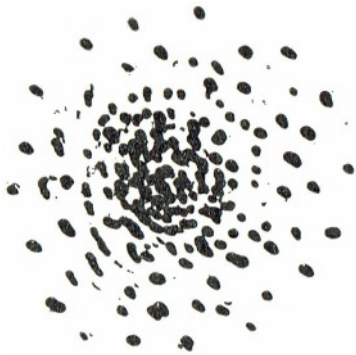


Abb. 4
Modell des 1s-Elektrons nach
SCHRÖDINGER

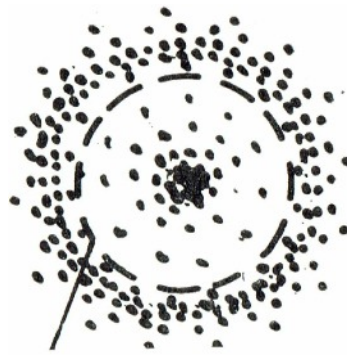


Abb. 5
Modell des 2s-Elektrons nach
SCHRÖDINGER

- b) Beim 2s-Elektron ist die Gesamtmasse auf zwei räumlich getrennte Bereiche verteilt: Der innere Bereich gleicht wieder einer Kugel, der äußere Bereich umgibt den inneren wie eine Schale, deren Substanz nach innen und außen dünner wird. Die Grenze zwischen den beiden Bereichen heißt Knotenfläche; sie hat offensichtlich die Gestalt einer Kugel.
- c) Das 3s-Elektron besitzt zwei kugelförmige Knotenflächen und besteht demgemäß aus drei getrennten Bereichen. Man erhält seine Form, indem man das 2s-Elektron um eine weitere Substanzschale nach außen erweitert. Diese neue Schale enthält dabei nahezu 90% der gesamten Elektronenmasse.

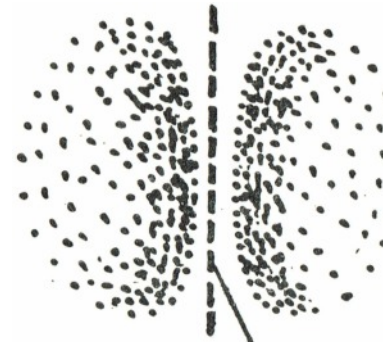
Grundsätzlich bezeichnet man alle Elektronen, die nur kugelförmige Knotenflächen besitzen, als s-Elektronen. Dagegen gibt es auch Elektronen mit ebenen oder kegelförmigen Knotenflächen. Unter den p-Elektronen

versteht man alle Elektronen, die genau eine ebene oder kegelförmige Knotenfläche besitzen (haben sie noch mehr Knotenflächen, so handelt es sich wieder um Kugeln). Wieder andere Bezeichnungen wählt man für Elektronen mit zwei oder mehr ebenen bzw. kegelförmigen Knotenflächen.

- d) Das einfachste p-Elektron ist das 2p-Elektron; es besitzt eine ebene Knotenfläche und besteht aus zwei nierenförmigen Gebilden, die zu beiden Seiten dieser Ebene angeordnet sind.

Den schrittweisen Aufbau der ersten Elemente des periodischen Systems kann man sich nun folgendermaßen vorstellen:

Da der Wasserstoff nur eine positive Kernladung besitzt, genügt ein einziges Elektron, um seine Ladung zu neutralisieren. Getreu dem Prinzip möglichst gleichmäßiger Belegung der Kernumgebung mit Elektronen-



Knotenfläche

Abb. 6
Modell des 2p-Elektrons
nach SCHRÖDINGER.

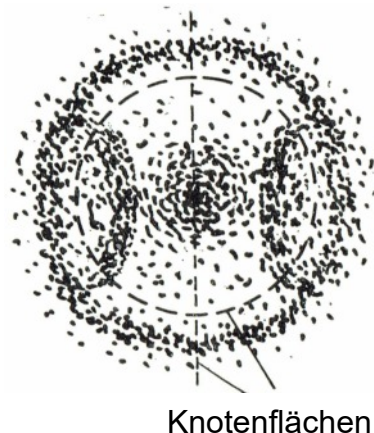
masse wird ein regelmäßig gebautes 1s-Elektron angelagert. Wie der nächste Schritt zeigt, ist damit die maximale Konzentration beim Belegen mit Elektronenmasse noch nicht erreicht. Das zweite Element, also Helium, lagert nämlich noch ein weiteres 1s-Elektron an. Jetzt ist im Zentrum des Atoms die Sättigungsgrenze nahezu erreicht. Das dritte Element — Lithium — wählt daher ein drittes Elektron aus, bei dem viel weniger Masse im Zentrum konzentriert ist und das die bisher schwache Belegung der äußeren Bezirke verstärkt. Diese Bedingung wird von den 2s-Elektronen erfüllt; Lithium besitzt daher zwei 1s-Elektronen und ein 2s-Elektron.

Beim Vergleich von Helium und Lithium fällt auf, daß beim Helium die beiden vorhandenen Elektronen stark ineinander verflochten sind, während beim Lithium das dritte Elektron relativ weit von den beiden anderen abgesetzt ist. Die Heliumelektronen können daher nur unter erheblichen Schwierigkeiten wieder voneinander getrennt werden; da diese Trennung bei chemischen Reaktionen erforderlich wäre, ist Helium chemisch träge, d. h. zeigt das typische Verhalten der Edelgase. Das dritte Lithiumelektron ist dagegen nur lose gebunden und kann leicht abgetrennt werden. Lithium neigt daher zur Ionenbildung, ist chemisch aktiv wie erfahrungsgemäß alle Alkalimetalle.

Beim vierten Element des periodischen Systems, dem Beryllium, wird noch ein weiteres 2s-Elektron eingebaut. Kugelförmige Innenzone und schalenförmige Außenzone sind jetzt beide abgesättigt; dagegen ist der Raum zwischen Kugel und Schale noch fast völlig leer. Bevor noch weiter vom Kern

entfernte Zonen an die Reihe kommen, wird zuerst dieser Hohlraum belegt. Geeignet dafür sind wegen ihrer passenden Form die 2p-Elektronen. Beim fünften Element, dem B o r , füllen die beiden Hälften eines 2p-Elektrons die ersten Teile des Hohlraums aus. Das nächste 2p-Elektron — wir sind jetzt beim K o h l e n s t o f f — stellt sich senkrecht

Abb. 7
Atommodell des Elementes Bor nach
SCHRÖDINGER: $1s^2 2s^2 2p$. Die Hochzahlen
geben an, wieviel Elektronen der betreffenden
Art am Aufbau des Atoms beteiligt sind. Hier
also zwei 1s-Elektronen, zwei 2s-Elektronen
und ein 2p-Elektron.



zum ersten, das dritte senkrecht zum ersten und zweiten usw., bis nach Einbau von sechs 2p-Elektronen der Hohlraum ziemlich homogen mit Elektronenmasse belegt ist. Das jetzt erreichte Element hat insgesamt zehn Elektronen, also die Ordnungszahl 10, ist also N e o n . Seine Elektronen sind wieder so stark ineinander verflochten, daß ein einzelnes mit chemischen Mitteln nicht abgelöst werden kann. Neon ist daher ebenfalls ein Edelgas.

Es würde zu weit führen, den weiteren Einbau von Elektronen im einzelnen zu verfolgen. Jedenfalls folgt aus Schrödingers Wellenmechanik zwanglos, daß

1. Die Edelgase keine Ionen bilden, weil bei ihnen die Gesamtmasse der Elektronen nahezu homogen über den erfaßten Raumbereich verteilt ist;
2. die Alkalimetalle besonders leicht einwertig positive Ionen bilden, weil das zuletzt eingebaute Elektron von der Hauptmasse der übrigen deutlich abgesetzt ist;
3. auf ein Edelgas immer ein Alkalimetall folgen muß.

Schrödinger erklärt also nicht nur Bohrs gesättigte Zweier- bzw. Achterschalen, sondern darüberhinaus das bekannte chemische Verhalten ganzer Gruppen von Elementen. Allerdings ist jetzt wieder der gesamte Atomraum mit Masse belegt — im Gegensatz zu Dalton und Thomson aber gegliedert in einzelne unterscheidbare Bereiche, die Elektronen — und es taucht scheinbar erneut die Frage auf, wie Rutherfords Geschosse ungehindert eine Sperrmauer aus mehreren Tausend Atomschichten durchdringen können.

Offensichtlich handelt es sich um eine Scheinfrage: Wir haben bei den Schrödingerschen Elektronen nur der Anschaulichkeit wegen nicht immer erneut betont, daß ihre Masse nicht in materieller Form, sondern als Welle

vorhanden ist. Ihre Masse ist äquivalent der Energie der stehenden Elektronenwellen, und diese Wellen verleihen Schrödingers Elektronen Form und Ausdehnung. Wellen aber sind für Geschosse ohne weiteres durchlässig. Man denke z. B. an einen Stein, der in einen See geworfen wird; er durchdringt die Wasseroberfläche auch dann ungehindert, wenn sich auf ihr gerade eine Welle ausbreitet. Ebenso wenig fällt es schwer, die übrigen Erfahrungstatsachen mit dem Schrödingerschen Atommodell zu erklären. —

Der Dualismus Welle-Teilchen kann noch auf eine zweite Weise interpretiert werden; die zugehörige Theorie stammt von dem Deutschen Werner Heisenberg. Im Vordergrund der Heisenbergschen Theorie stehen folgende Gesichtspunkte:

1. Über die Gestalt irgendwelcher Elementarteilchen — dazu gehören auch die Elektronen — können keinerlei bindende Aussagen gemacht werden. Es ist weder erlaubt noch verboten, sich die Elektronen wie Rutherford und Bohr als punktförmige Gebilde vorzustellen.
2. Kein Elementarteilchen kann im Raum eindeutig lokalisiert werden. Erzwingt man eine genaue Ortsbezeichnung, so ist es dafür unmöglich, Betrag und Richtung seiner Geschwindigkeit anzugeben, so daß es im nächsten Moment unwiederbringlich im experimentellen Dunkel des Raumes verschwindet.

Damit löst sich die Mikrowelt in ein Gewirr von Elementarteilchen auf, von denen wir in keinem Augenblick sagen können, wo sie gerade sind und wohin sie sich bewegen. Der Zufall wird anscheinend oberstes Gesetz.

Erfreulicherweise gibt es nach Heisenberg doch noch Gesetze in dieser chaotischen Welt. Zwar kann man nie sagen, wo ein Teilchen gerade i s t , aber immerhin weiß man mit absoluter Genauigkeit, wo es überhaupt s e i n k a n n . Zu jedem Teilchen gehört ein ganz bestimmter Bereich, in dem es sich aufhalten muß; Heisenberg gibt das Gesetz an, welches jeder Stelle dieses Bereiches eine Zahl zuordnet, an der man ablesen kann, wie oft sich das Teilchen dort durchschnittlich auf hält. Die Form des Bereichs und die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für seine Unterbezirke sind zeitabhängig, d. h. jedes Teilchen wird von seinem Aufenthaltsbereich wie von einer Welle begleitet. Wo die Wellenbäuche sind, hält es sich am häufigsten auf, wo die Knoten sind, am seltensten.

Damit haben wir den Anschluß Heisenbergs an die Dualismustheorie gewonnen. De Broglies Materiewellen sind für Heisenberg das Teilchen begleitende, zeitlich veränderliche Aufenthaltsbereiche. Sein Gesetz für die zeitliche Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit ist mathematisch gesehen — obwohl aus ganz anderen Grundgedanken abgeleitet — identisch mit Schrödingers Wellengleichung. Stehende Materiewellen — wie sie zu den Elektronen der Atome gehören — sind Aufenthaltesbereiche fester Form und fester Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit.

Wendet man Heisenbergs Theorie auf die Elektronen der Atome an, so erhält man dieselben Bilder wie bei Schrödinger: 1s-, 2s-, 3s-, ... 2p-, 3p-, . . . usw. -Elektronen. Die Form der Elektronenhülle eines Atoms gibt den Bereich an, wo sich die Elektronen mit von Ort zu Ort wechselnder Wahrscheinlichkeit aufhalten. Ist eine Hülle — wie bei den Edelgasen — gleichmä-

ßig belegt, so halten sich die Elektronen überall gleich häufig auf; es ist sehr schwierig, ein einzelnes wieder abzufangen. Dagegen entfernt sich bei den Alkalimetallen ein Elektron immer wieder von den übrigen und gerät in Randbezirke, wo es abgefangen werden kann. Edelgase sind also stabil, Alkalimetalle instabil. —

Wie unsere Vergleiche zeigen und wie der Engländer Dirac in seiner statistischen Transformationstheorie bewiesen hat, ist es gleichgültig, ob wir unserer Vorstellung Schrödingers oder Heisenbergs Deutung des Welle-Korpuskel-Dualismus zugrunde legen. Schrödingers Materiewellen und Heisenbergs Wahrscheinlichkeitswellen sind gleichwertige Theorien. Beide erteilen über das Verhalten der Atome nur experimentell gesicherte Auskünfte, und beide erteilen dieselben Auskünfte. Da sich — wie wir schon angedeutet haben — auf dem physikalischen Sektor Anschaulichkeit und Wirklichkeit ohnehin oft ausschließen, ist es auch gleichgültig, ob das von Schrödinger bzw. Heisenberg entworfene Bild der Atome anschaulich ist oder nicht. Atome sind — im Gegensatz zur Auffassung vieler noch im mechanischen Denken befangener Laien — eben einfach auch „ein Stück vom ABC der Physik“, wie Eddington einmal von den Elektronen gesagt hat. Dieses ABC enthält heute viele Buchstaben in einer fremden Schrift. —

Die Entwicklung der Kernphysik wurde bewußt aus dieser Übersicht ausgeklammert, hauptsächlich, weil die Kernphysik noch nicht abgeschlossen ist. Einige wichtige Stationen seien wenigstens noch genannt:

1911 unterscheidet Rutherford zum ersten Mal klar zwischen Kern und Hülle. 1919 gelingt es ihm, einzelne Stickstoffkerne in Sauerstoff- und Wasserstoffkerne zu spalten; daraus folgt, daß auch die Kerne aus kleineren Einheiten zusammengesetzt sind. 1932 entdeckt der Engländer James Chadwick den elektrisch neutralen Kernbaustein: das Neutron. Daraufhin entwickelt Heisenberg seine Theorie vom Aufbau der Atomkerne; nach ihr ist jeder Kern nur aus positiv geladenen Protonen und Chadwicks elektrisch neutralen Neutronen aufgebaut. Zwei Jahre später findet man beim radioaktiven Zerfall gewisser Atomsorten das Positron. Es ist das positiv geladene Gegenstück des negativen Elektrons und wurde von Dirac schon 1928 theoretisch vorausgesagt. Gamow entwirft das erste brauchbare Kernmodell, indem er die Kerne wie winzige Tropfen behandelt, die aus einer aus Protonen und Neutronen bestehenden Kernflüssigkeit aufgebaut sind. Es gelangen ihm recht genaue Berechnungen der Energie, mit der die Bestandteile im Kern festgehalten werden. Sein Modell wird vom Schalenmodell

abgelöst, bei dem Protonen und Neutronen analog den Elektronen der Bohrschen Hülle auf Schalen angeordnet sind. Heute ist man dabei, Schrödingers und Heisenbergs Materie- bzw. Wahrscheinlichkeitswellentheorie auf Atomkerne zu übertragen. Die Schwierigkeiten — insbesondere auch die mathematischen — sind enorm; ein Ende der Entwicklung ist noch nicht abzusehen. Immer wieder werden weitere Partikel gefunden — meist auf Grund theoretischer Vorhersagen —, die beim Aufbau der Materie eine Rolle spielen. Jedenfalls ist sicher, daß auch die Kernteilchen äußerst komplexe und wandlungsfähige Gebilde sind. Immer mehr erweist sich die Materie als das Zentralproblem der Physik, und es verstärkt sich die Hoffnung, daß eine

einheitliche und vollständige Theorie der Materie auch andere tief angelegte Fragen — Gravitation, elektrische Ladung — einst wird lösen helfen.