

## Neuere Fortschritte der Elementen- und Isotopenforschung.

Von Prof. Dr. OTTO HAHN, Berlin-Dahlem.

Allgemeinverständlicher Vortrag im Bezirksverein Rheinland-Westfalen des Vereins deutscher Chemiker zu Essen,  
27. Januar 1928.

(Eingeg. 4. April 1928.)

Bevor man über neuere Ergebnisse der Elementen- und Isotopenforschung spricht, ist es zweckmäßig, die Grundlagen dieser beiden Forschungsrichtungen, also den Begriff des chemischen Elements und der isotopen Atomarten kurz zu recapitulieren.

Die Träger der spezifischen Eigenschaften der chemischen Elemente sind die Atome. Jedes Atom besteht aus dem positiven, auf kleinstem Raum konzentrierten Atomkern und den die Elektronenhülle bildenden negativen Elektronen. Die Größe der wirksamen positiven Kernladung, die Kernladungszahl, ist gleich der Platznummer oder Ordnungszahl des betreffenden Elements, die sich ergibt, wenn man im periodischen System der Elemente von dem leichtesten, dem Wasserstoff, fortsetzt zu schweren und immer schwereren, bis man im Uran, dem Element mit dem höchsten Atomgewicht, auch das Element mit der höchsten Ordnungszahl erreicht hat. Wir erhalten so für den Wasserstoff die Ordnungszahl und Kernladungszahl 1, für Helium 2, Lithium 3, schließlich für Uran 92. Im Kern des Uranatoms sind also 92 positive Ladungseinheiten wirksam, sie werden von 92 sich um den Kern bewegenden negativen Elektronen umgeben; nach außen ist das Atom also elektrisch neutral.

Durch die Ordnungs- oder Kernladungszahl werden die chemischen Eigenschaften eines Elements völlig festgelegt, und statt die chemischen Elemente mit Phantasienamen zu belegen, wie beispielsweise mit Stickstoff, Nickel oder Tantal, könnte man sie ebenso gut als Element 7, 28 oder 73 bezeichnen, und jeder Irrtum wäre ausgeschlossen.

Die chemischen Prozesse spielen sich immer mittels der äußeren Elektronen ab. Der Atomkern als solcher bleibt dabei völlig unverändert. Wir können mit den üblichen Methoden der Physik und Chemie eine Beeinflussung des Atomkernes nicht herbeiführen.

Die kleinste positiv geladene Einheit ist der Wasserstoffkern. Wir kennen keine positive Ladung, die mit kleinerer Masse als der Masse 1 verbunden ist. Das legt die Auffassung nahe, daß der Wasserstoffkern das Atom der positiven Elektrizität oder sozusagen das positive Elektron darstellt. Es hat die gleich große, aber entgegengesetzte Ladung wie das negative Elektron und eine 1840mal größere Masse. Nun erscheint die Masse einer bestimmten Elektrizitätsladung um so größer, auf je kleinerem Raum die Ladung konzentriert ist; d. h. die große Masse des Wasserstoffkerns gegenüber der des Elektrons würde verständlich, wenn der Wasserstoffkern eine noch viel geringere räumliche Ausdehnung besitzt als das negative Elektron. Der Durchmesser des Elektrons wird aus elektrischen Daten auf  $10^{-13}$  cm, d. h. auf den zehnbilllionsten Teil eines Zentimeters geschätzt. Der Durchmesser des Wasserstoffkerns müßte also noch viel kleiner sein. Tatsächlich sprechen die Beobachtungen bei Zusammenstößen zwischen  $\alpha$ -Teilchen und Wasserstoffatomen auch dafür, daß der Wasserstoffkern noch viel kleiner ist als das Elektron.

Um der Auffassung des Wasserstoffkernes als positiver Elektrizitätseinheit Rechnung zu tragen, bezeichnet man ihn nach Rutherford's Vorschlag als Proton.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß Protonen und Elektronen die Grundbausteine sind, aus denen sich die Atome aller Elemente aufbauen. Die Kerne der schwereren Elemente setzen sich aus Wasserstoffkernen oder Protonen zusammen. Man sieht aber sofort ein, daß diese Kerne neben den Protonen auch Elektronen, die, zum Unterschied von den Elektronen der äußeren Hülle, als Kernelektronen bezeichnet werden, enthalten müssen. Denn da der Wasserstoffkern die Ladung 1 und die Masse 1 besitzt, müßte für einen nur aus Wasserstoffkernen aufgebauten Atomkern die positive Ladung (also die Ordnungszahl) ebenso groß sein wie seine Masse, d. h. sein Atomgewicht. Das ist aber nicht der Fall. Die Ordnungszahl ist immer kleiner als das Atomgewicht. Schon das zweite Element, Helium, besitzt die positive Ladung 2 und die Masse 4. Das ist nur damit erklärlich, daß man annimmt, der Heliumkern bestehe aus vier Wasserstoffkernen und zwei Elektronen, so daß eine überschüssige positive Ladung von 2 resultiert, der dann auch zwei äußere Elektronen entsprechen. Das Element Uran mit seiner Ordnungszahl 92 und dem Atomgewicht 238 muß in seinem Kern 238 Wasserstoffkerne und  $238 - 92 = 146$  Elektronen besitzen. Das Uranatom besteht also aus 476 Teilchen. Die Ordnungszahl gibt daher nicht die Gesamtzahl der positiven Ladungen des Kerns an, sondern nur den Überschuß von positiven über negative, also den Überschuß von Protonen gegenüber den Kernelektronen.

Die äußeren Elektronen werden durch die vom Kern ausgehenden Anziehungskräfte in ihren Bahnen erhalten. Ihre Anordnung und ihre Bewegung wird nur durch die Größe der Kernladung bestimmt. Von dieser Anordnung hängen die chemischen Eigenschaften der verschiedenen Elemente ab; die Masse dagegen und alle von der Masse beeinflußten Erscheinungen werden durch den Atomkern bedingt.

Da die Kernladungszahl die Platzzahl im periodischen System ergibt, sieht man, daß es bis zum Uran mit der Ordnungszahl 92 nicht mehr als 92 verschiedene chemische Elemente geben kann; denn kleinere Ladungseinheiten als 1 gibt es ja nicht, Unterteilungen können also nicht vorkommen.

Ganz anders dagegen steht es mit den Atommassen. Betrachten wir z. B. das Element Silicium. Es hat die Ordnungszahl 14. Das heißt, um einen Atomkern von 14 positiven Ladungseinheiten bewegen sich 14 Elektronen der äußeren Elektronenhülle. Die chemischen Eigenschaften des Elements Silicium sind durch diese 14 Elektronen eindeutig festgelegt.

Die Masse des positiv geladenen Siliciumkerns können wir uns dagegen recht verschieden groß vorstellen. Sie kann z. B. bestehen aus 28 Protonen von der gesamten Masse 28, teilweise neutralisiert durch 14 Elektronen, so daß die wirksame Kernladung 14 beträgt. Sie kann aber auch bestehen aus 29 Protonen von der Masse 29, neutralisiert durch 15 Elektronen, oder etwa aus 30 Protonen von der Masse 30, neutralisiert durch 16 Elektronen. Wir hätten hier also drei verschiedene Atomkerne mit den Atomgewichten 28, 29 und 30. Die Kernladung ist immer 14; die Zahl der äußeren Elektronen ist immer 14; immer haben wir also Atome vor uns, die sich chemisch durchaus wie Silicium

verhalten, deren Atomgewichte sich aber um drei ganze Einheiten unterscheiden.

Solche Atomarten gleicher Ordnungszahl und gleicher chemischen Eigenschaften, aber verschiedenen Atomgewichts nennt man bekanntlich isotope Atomarten, weil sie im Periodischen System an gleicher Stelle stehen. Beim Silicium sind nach der später noch ausführlicher zu besprechenden Methode der Massenspektroskopie tatsächlich die drei Isotopen 28, 29 und 30 nachgewiesen; und was hier an dem Beispiel des Siliciums dargelegt wurde, trifft für eine große Anzahl unserer chemischen Elemente zu. Die Atomgewichte, so wie sie in der Praxis für solche aus mehreren isotopen Atomarten bestehenden Elemente gefunden werden, sind dann die Mittelwerte, die sich aus dem Mischungsverhältnis der einzelnen Bestandteile ergeben.

Die vor über 100 Jahren von dem englischen Arzt Prout zuerst ausgesprochene Hypothese, daß man sich die Vielheit der chemischen Elemente aus dem leichtesten Element, dem Wasserstoff, entstanden denken könne, daß also die Atomgewichte aller Elemente ganzzahlige Vielfache des Wasserstoffs vorstellen, hat so, in einem neuen Gewande, eine glänzende Bestätigung gefunden.

Wir werden allerdings später sehen, daß hier noch eine weitere Erscheinung hinzukommt, die auch bei den Einzelatomarten wieder kleine Abweichungen von der Ganzzahligkeit des Atomgewichts bedingt.

Nach diesen mehr allgemeinen Bemerkungen wende ich mich jetzt zu dem ersten Teil unseres Themas, den Fortschritten auf dem Gebiete der Elementenforschung, wobei unter Elementenforschung in unserem Falle die Aufgabe erblickt werden soll, die unter den 92 möglichen verschiedenen chemischen Elementen noch fehlenden Elemente aufzufinden, ihre Eigenschaften festzustellen und sie womöglich in größeren Mengen zu gewinnen. Die Entdeckung neuer Elemente hatte ja immer einen besonderen Reiz für den experimentellen Forscher, und dieser Anreiz wird naturgemäß um so größer, je kleiner die Zahl der noch zu entdeckenden Elemente wird. Mit der Erkenntnis, daß die Größe der Ordnungszahl oder Kernladungszahl die Eigenschaften eines chemischen Elements eindeutig festlegt, und daß einschließlich des Wasserstoffs mit der Ordnungszahl 1 und des Urans mit der Ordnungszahl 92 nur 92 verschiedene Grundstoffe möglich sind, ließ sich sogleich feststellen, welche Elemente noch fehlen und welches ihre Stellung im periodischen System sein mußte. Der früheren scheinbar schrankenlosen Entdeckungsmöglichkeit war ja schon seit Aufstellung des periodischen Systems ein Ende gesetzt worden. Nur bei den seltenen Erden hatte man keinerlei Maßstab, wie groß deren Zahl sein könnte.

Die Aufstellung des oben kurz skizzierten Ruthenford-Bohrschen Atommodells, aus der sich also die Anzahl der möglichen Elemente zu insgesamt 92 feststellen ließ, geschah in den Jahren kurz vor dem Weltkriege. Zu dieser Zeit waren noch unbekannt die Elemente 43 und 75, also die höheren Homologen des Mangans, und daher *Ekamangane* genannt, die Elemente 61 und 72, die damals beide zur Gruppe der seltenen Erden gezählt wurden, die Elemente 85, Ekajod, und 87, Ekacäsum; schließlich war das Element 91, *Ekatalant*, nur in Form eines äußerst kurzlebigen Radioelements nachgewiesen, dessen chemische Herstellbarkeit bei einer Halbwertszeit von nur einer Minute natürlich außerhalb jeder Möglichkeit lag.

Von diesen Elementen sind in den letzten Jahren die Elemente 72 als Hafnium, 75 als Rhenium und 91 als Protactinium aufgefunden und in wägbaren Mengen dargestellt worden. Die Existenz der Elemente 43, Masurium, und 61, Illinium (oder Florentium), scheint erwiesen, eine Reindarstellung ist aber bisher nicht gelungen. Keinerlei Andeutung hat man bisher für die Existenz von 85 und 87, Ekajod und Ekacäsum.

In großen Zügen sei über diese neuen Substanzen berichtet.

**Das Hafnium.** Die Entdeckung des Hafniums bietet eine glänzende Bestätigung der Bohrschen Deutung des periodischen Systems im Sinne der Quantentheorie des Atombaus; gleichzeitig ist diese Entdeckung ein Beweis für die Bedeutung der Röntgenspektroskopie für die analytische Chemie. In wenig Worten soll hier auf diese Bohrsche Theorie, soweit sie für das Hafnium von Interesse war, eingegangen werden.

Nach Bohr sind die sich um den Atomkern bewegenden Elektronen in genau definierten Gruppen angeordnet. Gehen wir von einem Element zu dem nächsthöheren über, so wird im allgemeinen das hinzukommende Elektron in einer außen liegenden Elektronengruppe untergebracht, es wird zu einem Valenzelektron. Eine Ausnahme machen neben den sogenannten Triaden die seltenen Erden. Nach dem dreiwertigen Lanthan (Ordnungszahl 57), das also drei äußere Valenzelektronen besitzt, werden die neu hinzukommenden Elektronen nicht mehr außen, sondern in einer tiefer gelegenen Bahn angelagert, weil hier noch nicht ausgebaute Gruppen vorhanden sind, die zuerst aufgefüllt werden, bevor neue Elektronen in Außenschalen untergebracht werden können. Nach dem Lanthan fängt diese innere Auffüllung an. Die hierher gehörigen Elemente zeichnen sich alle durch große Ähnlichkeit aus; ihre Hauptwertigkeit ist immer 3. 14 Plätze sind im Innern zu besetzen. Es können also nicht mehr als 14 Elemente außer dem Lanthan existieren, die die Eigenschaften der seltenen Erden zeigen. Mit dem Element  $57 + 14 = 71$  muß die Gruppe der seltenen Erden zu Ende sein. Das Element 72 baut sein 72stes Elektron wieder als äußeres Valenzelektron an, das zu den drei bisherigen hinzukommt. Das Element 72 muß also vierwertig sein, analog dem Zirkon oder Thorium.

Trotz entgegengesetzter Veröffentlichungen von seiten französischer Forscher, nach denen sie das Element als seltene Erde, — sie nannten sie *Celtium* —, aufgefunden zu haben glaubten, machten sich Coster und v. Hevesy im Bohrschen Institut daran, das Element 72 als Zirkonhomolog zu suchen, im vollen Zutrauen auf die Richtigkeit der Bohrschen Voraussage, daß das Element 72 keine seltene Erde sein könne. Sie untersuchten daher keine komplizierten Gemische von seltenen Erden, sondern Zirkonmineralien und bedienten sich dazu der röntgenspektroskopischen Methode, mittels derer sich die Anwesenheit eines Elements, gleichgültig in welcher chemischen Verbindung es vorliegen mag, völlig unabhängig von anderen Elementen, nachweisen läßt.

Bereits im ersten untersuchten Mineral, einem Zirkon aus Norwegen, ließ sich durch die röntgenspektroskopische Untersuchung die Anwesenheit des gesuchten Elements eindeutig feststellen. In kurzer Folge wurde eine große Anzahl der verschiedensten Zirkonmineralien untersucht und der Nachweis erbracht, daß sie alle das neue Element enthielten, allerdings in sehr wechselnder Menge. In den ungünstigen Fällen betrug der Gehalt

etwa  $\frac{1}{2}$ % der Zirkonmenge, in einigen, allerdings sehr seltenen Fällen, war der Gehalt dem des Zirkons gleichwertig.

Es würde zu weit führen, hier den ganzen weiteren Entwicklungsgang der Abscheidung und Reindarstellung des Hafniums zu beschreiben. In einer ausführlichen Monographie von v. Hevesy<sup>1)</sup> findet sich alles Wissenswerte über das Hafnium zusammengestellt. In der kurzen Zeit von wenig Jahren ist die Wissenschaft mit einer neuen Substanz beschenkt worden, deren chemische und physikalische Eigenschaften genauer als die mancher anderer, viel länger bekannter Elemente, festgelegt sind.

Die Häufigkeit des Hafniums in der festen Erdkruste ist von der gleichen Größenordnung wie die des Lithiums, Kupfers, Kobalts, Bors. Es steht also nichts im Wege, im Falle wichtiger industrieller Verwertungsmöglichkeiten das Hafnium tonnenweise zu gewinnen. Es mag erstaunlich scheinen, daß ein Element, das in so großen Mengen in der Natur vorkommt wie das Hafnium, sich bisher der Auffindung entzogen hatte. Die Ursache liegt in der außerordentlichen Ähnlichkeit der Eigenschaften der Hafniumverbindungen mit denen des Zirkons, eine Trennung der beiden ist nur durch sehr langwierige Fraktionierungsverfahren möglich.

Gehen wir nun von dem Hafnium zu den andern kürzlich gefundenen oder auch heute noch unbekannten

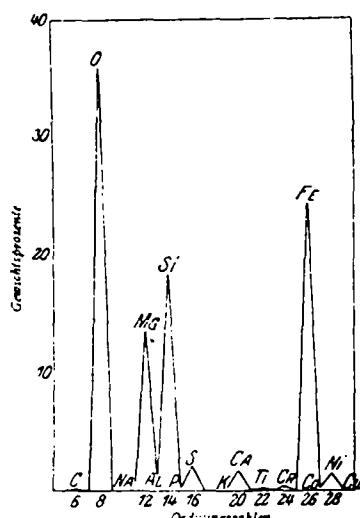


Abb. 1.

Durchschnittliches Mengenverhältnis der Elemente in den Steinmeteoriten.

Elementen über, so müssen wir sagen, daß in allen diesen Fällen die Voraussetzungen für die Entdeckung wesentlich ungünstiger lagen oder noch liegen.

Das Hafnium war das einzige noch fehlende Element mit gerader Ordnungszahl. Diese Elemente sind in der Natur im allgemeinen viel häufiger als die unmittelbar vorausgehenden oder folgenden Elemente mit ungerader Ordnungszahl; die seitdem gefundenen oder noch unbekannten Grundstoffe haben alle ungerade Ordnungszahl.

Diese zuerst von Harkins aufgefundene Gesetzmäßigkeit findet sich mit ganz geringen Ausnahmen fast durch das ganze Periodische System erfüllt. Nicht nur das Material unserer festen Erdkruste, sondern das in mancher Beziehung noch einwandfreiere Material der Steinmeteoreite zeigt dies Vorherrschen von Elementen gerader Ordnungszahl in überzeugender Weise.

<sup>1)</sup> G. v. Hevesy, Das Element Hafnium, Julius Springer, Berlin 1927.

Auf dem Bilde sieht man die durchschnittliche Zusammensetzung der Steinmeteoreite, denen eine große Zahl von Analysen zugrunde liegt. 97,6% des gesamten Materials dieser Meteorite besteht aus Elementen gerader Ordnungszahl. Es wird noch einmal Gelegenheit sein, auf diesen Unterschied im Vorkommen von Elementen gerader und ungerader Ordnungszahl hinzuweisen.

Wir wenden uns jetzt zu den Ekamanganen, den höheren Homologen des Mangans mit den Ordnungszahlen 43 und 75. Es ist klar, daß seit der Aufstellung des periodischen Systems der Elemente die Suche nach diesen beiden fehlenden Elementen viele Forscher beschäftigt hat. Aber bis vor kurzein haben weder physikalische noch chemische Methoden irgendeinen Anhalt für das Vorhandensein der Ekamangane erbracht. Man konnte schon daraus schließen, daß diese Elemente, wenn überhaupt, so doch nur in sehr geringer Menge in der äußeren Erdkruste vorhanden sein könnten. Ein Vergleich mit dem Hafnium, das sich trotz seines jetzt nachgewiesenen Vorhandenseins in großen Mengen auch so lange der Kenntnis entzogen hatte, ist hierbei nicht zulässig; denn die Eigenschaften der Ekamangane müssen im Gegensatz zu der Ähnlichkeit Zirkon-Hafnium, von denen des Mangans wesentlich verschieden sein. Dies zeigt ein Blick auf das periodische System. Die Elementenpaare Zirkon-Hafnium, Niob-Tantal, Molybdän-Wolfram, Ruthenium-Osmium sind unter sich zwar sehr ähnlich, von ihren niedrigeren Homologen Titan, Vanadium, Chrom, Eisen aber durchaus verschieden; ein Vorkommen der Ekamangane in Manganerzen war also kaum zu erwarten.

Mit der Entwicklung der Röntgenspektroskopie kamen nun zu den bisherigen Methoden neue Methoden zur Suche nach diesen Elementen hinzu. Aber auch diese Methoden, auf viele Substanzen angewendet, ergaben anfangs keinen Hinweis auf die Existenz der Ekamangane.

Da erschien im Juni 1925 eine gemeinsame Veröffentlichung von Noddack, Tacke und Berg<sup>2)</sup>, nach der es den Verfassern gelungen sei, den Nachweis der Existenz der Ekamangane zu erbringen.

Auf Grund einer eingehenden Prognose der chemischen Eigenschaften der fraglichen Elemente im Vergleich zu ihren Nachbarelementen hatten die Verfasser ein Anreicherungsverfahren ausgearbeitet, das auf eine große Anzahl von Mineralien angewendet worden war. Mit den auf Grund der vermuteten Eigenschaften angereicherten Präparaten wurden röntgenspektrographische Prüfungen vorgenommen, und in den Konzentratoren die Gegenwart der beiden Elemente 43 und 75 festgestellt. Für die neuen Elemente wurden die Namen Masurium (43) und Rhenium (75) vorgeschlagen.

Unter vorläufiger Zurückstellung der Frage nach der Herstellbarkeit des Masuriums haben sich die genannten Forscher in der Folge hauptsächlich mit dem Rhenium befaßt. Bei der Auswahl der Mineralien wurde so vorgegangen, daß nach Möglichkeit solche zur Verarbeitung kamen, in denen vor allem solche Elemente angereichert sind, die dem Element 75 ähnlich sind, im periodischen System also an benachbarten Stellen stehen. Diese Nachbarelemente sind Molybdän, Wolfram, Ruthenium und Osmium. Als solche Mineralien kommen in Frage einerseits Platinminerale, die aber nur in geringer Menge zugänglich waren, vor allem aber Mineralien der Erden und Erdsäuren, Nickel- und Molybdänerze. Zur Anreicherung des Elements 75 wurde dann so vorgegangen, daß

<sup>2)</sup> W. Noddack, J. Tacke u. O. Berg, Naturwiss. 13, 567—574 [1925].

die genannten Nachbarelemente möglichst in einem Präparat konzentriert wurden. Die Annahme liegt dann nahe, daß sich auch das Element 75 bei dieser Fraktion befindet.

Die Untersuchungen zeigten, daß das Rhenium außer in Platinerzen sowohl in norwegischen wie in afrikanischen Mineralien der Erden und Erdsäuren in allerdings außerordentlich kleiner Konzentration sehr verbreitet ist. Es findet sich besonders in Columbiten in Konzentrationen von  $0,5-2,10^{-7}$ , ferner in Gadoliniten und Alviten, gewisse Molybdänerze enthalten bis zu  $10^{-6}$  g pro Gramm Substanz. Die Art der Abscheidung richtete sich naturgemäß nach der Art der verwendeten Mineralien. Auf Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden. Die endgültige Konzentrierung geschah über das Sulfid, das dann zuerst reduzierend mit Wasserstoff zur Entfernung von Arsen, dann oxydierend im Sauerstoffstrom geäugt wurde. Der Nachweis geschah, solange es sich um kleine Mengen handelte, am einwandfreisten wieder mit Hilfe der Röntgenspektroskopie.

In neuester Zeit wurden durch Verarbeitung großer Mengen Ausgangsmaterial in technischem Ausmaße größere Mengen reiner Rheniumsalze dargestellt, die es gestatteten, die wichtigsten chemischen Reaktionen dieses neuen Elements einem großen Zuhörerkreise zu demonstrieren und eine ungefähre Atomgewichtsbestimmung durchzuführen<sup>3)</sup>. Das Atomgewicht des Rheniums ist  $188 \pm 1$ . Die bisher hergestellte Menge beträgt etwa 1 g, ein Ergebnis, zu dem die deutsche Chemie die zielbewußtesten Entdecker rückhaltlos beglückwünschen kann.

Wir kommen zum Element 61. Hierüber läßt sich zurzeit nicht viel mehr aussagen, als daß diese seltene Erde entsprechend ihrer Stellung zwischen dem Neodym und Samarium tatsächlich in winzigen Mengen bei diesen beiden Erden vorzukommen scheint. Um die Priorität der Auffindung bemühen sich drei Länder, und die Frage, wem das Recht der Namengebung zufallen wird, ist zurzeit nicht gelöst. Die erste ausführliche Veröffentlichung stammt von Harries, Yntema und Hopkins in Amerika aus dem Jahre 1926. Diese Forscher haben ihren ersten Nachweis auf optische Absorptionsspektren der neuen Erde gegründet. Bei größeren Konzentrationen konnten auch einige L-Linien des Röntgenspektrums identifiziert werden. Die Amerikaner schlagen für das Element den Namen Illinium vor; die Arbeiten wurden an der Universität von Illinois durchgeführt.

Kurz nach dieser ersten Mitteilung über das Illinium meldeten sich die beiden italienischen Forscher Ferrandez und Rolla aus Florenz. Auch ihnen scheint der Nachweis der Existenz von 61 gelungen zu sein. Sie schlagen den Namen Florentium vor und begründen ihre Priorität mit einem versiegelten Schreiben, das sie schon im Jahre 1924 bei der italienischen Akademie der Wissenschaft hinterlegt haben, in welchem die Auffindung der neuen Substanz mitgeteilt wird. Mit Recht können die Amerikaner vielleicht dagegen einwenden, daß die italienischen Forscher, wenn sie ihrer Sache sicher gewesen wären, nicht den ungewöhnlichen Weg der Hinterlegung als versiegeltes Schreiben gewählt haben würden.

Die dritte Mitteilung stammt aus Deutschland von R. J. Meyer, dem anerkannten Fachmann auf dem Gebiete der seltenen Erden. Meyer hat schon vor

Jahren nach demselben Verfahren, das die Amerikaner verwendeten, die neue Erde in Neodym-Samarium-Erdgeminischen anzureichern gesucht. Der eindeutige Nachweis der Existenz wurde von Glocker mit Hilfe der K-Serie des Röntgenspektrums erbracht, wobei die deutschen Forscher betonen, daß die K-Serie sich zum Nachweis viel besser eignet als das leicht zur Verwechslung Veranlassung gebende L-Spektrum. Hier liegt der Fall also so, daß das Präparat zwar vor den Amerikanern hergestellt war, der sichere Nachweis aber erst nach der ersten amerikanischen Veröffentlichung geschah.

Ohne einer endgültigen Regelung hier voreilen zu wollen, möchte ich glauben, daß der Name Illinium die größte Wahrscheinlichkeit hat, angenommen zu werden.

Als sicher ist wohl festzustellen, daß das Element 61 nur in äußerst geringer Menge vorhanden ist. Dies ist wieder eine Bestätigung der schon oben angegebenen Harkinsche Regel, nach der die Elemente ungerader Ordnungszahl immer spärlicher vorkommen als die benachbarten mit gerader. Die Abb. 2 (nach V. M. Goldschmidt und Thomassen) läßt diese Regel gerade bei den seltenen Erden sehr schön erkennen.

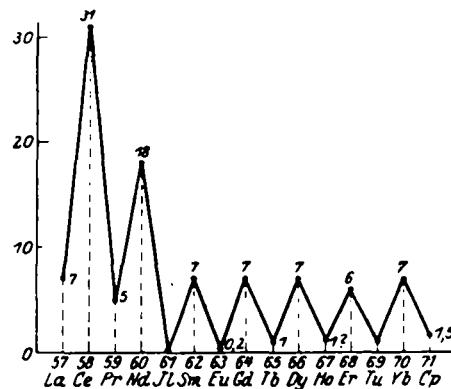


Abb. 2.  
Die relative Häufigkeit der seltenen Erden  
(nach Goldschmidt und Thomassen).

Elemente 85, 87 und 91. Bei der Besprechung der noch übrigbleibenden Elemente 85, 87 und 91 können wir uns bei 85 und 87 eigentlich auf die Angabe beschränken, daß man über ihre Existenz bis heute noch keinerlei Andeutung hat. Falls diese Substanzen existieren, sind sie wohl sicher radioaktiv, denn sie sind nur von radioaktiven Elementen umgeben. Unter der Annahme, daß diese Elemente in einer Beziehung zu den bekannten radioaktiven Umwandlungsreihen stehen, könnte man versuchen, sie sozusagen als Nebenprodukte bei den radioaktiven Substanzen aufzufinden. Diesbezügliche Versuche, die v. Hevesy und ich unabhängig voneinander ausgeführt haben, ergaben ein absolut negatives Resultat. So konnte gezeigt werden, daß z. B. ein Ekacäsum sicher nicht im Betrage 1:10 Millionen aus der Thorreihe entstehen kann; auch für die Radiumreihe ist die Wahrscheinlichkeit seiner Entstehung etwa ebenso klein.

Wesentlich günstiger liegen die Verhältnisse bei dem Element 91, der langlebigen radioaktiven Muttersubstanz der Aktiniumreihe. Dieses Element wurde 1918 von L. Meitner und dem Verfasser und gleichzeitig von Soddy und Cranston aufgefunden. Während letztere Forscher aber nur den Existenznachweis erbringen konnten, haben L. Meitner und der Verfasser die Substanz in radioaktiv reinem Zustand abgeschieden und die wichtigsten chemischen und radioaktiven Eigenschaften festgestellt. Wir nannten das

<sup>3)</sup> Vortrag Ida Noddack in der Deutschen Chemischen Gesellschaft am 13. 2. 1928.

Element Protactinium, eine Name, der seitdem allgemein angenommen worden ist. Diesem Element kommt unter den zahlreichen radioaktiven Stoffen insofern eine Sonderstellung zu, als es außer dem Radium das einzige neue Radioelement ist, das in auch dem Chemiker zugänglichen Mengen in Uranmineralien enthalten ist. Nachdem L. Meitner und ich schon früher für die untere Grenze der Halbwertszeit des Protactiniums 12 000 Jahre gefunden haben, habe ich unlängst in Gemeinschaft mit E. Walling diese wichtigste Konstante des Protactiniums erneut unter einwandfreien Bedingungen bestimmt. Die Halbwertszeit ist rund 20 000 Jahre; das Protactinium ist also mehr als zehnmal beständiger als das Radium, dessen Halbwertszeit 1600 Jahre beträgt, und ist in dieser Beziehung durch nichts von einem gewöhnlichen chemischen Element zu unterscheiden. Seinen Gehalt in Uranmineralien bestimmten wir zu 129 mg Protactiniumelement (150 mg  $\text{Pa}_2\text{O}_5$ ) pro Tonne Uran. Diese Zahl mag gering erscheinen. Vergleicht man sie aber mit der Menge von Radium, das in einer entsprechenden Uranmenge vorhanden ist, dann sieht man, daß sie gar nicht so sehr klein ist. In einer Tonne Uran finden sich 340 mg Radium. In allen Uranmineralien finden sich also auf 100 mg Gewichtsteile Radium rund 40 Gewichtsteile Protactinium.

Wenn man bedenkt, daß heute auf der Erde bereits mehrere hundert Gramm Radium hergestellt sind, und daß in Belgien zurzeit aus dem hochwertigen Uranerz des Kongostaates mehrere Gramm pro Monat gewonnen werden können, dann sieht man, daß theoretisch den nichts im Wege steht, auch das Protactinium grammweise zu gewinnen.

Wie steht es nun aber mit der chemischen Herstellbarkeit dieser neuen Substanz? Nach dem periodischen Gesetz war zu erwarten, daß das Protactinium manche charakteristischen Eigenschaften besitzen wird, die es von seinen niederen Homologen Niob und Tantal unterscheidet. Im Gegensatz zu früheren Anreicherungsversuchen, bei denen die Ähnlichkeit des Protactiniums mit dem Tantal zur Abscheidung von andern Substanzen verwendet worden war, hat Herr Dr. A. v. Grossé in unserem Institute bewußt die Verschiedenheiten der Eigenschaften dieser homologen Elemente in den Vordergrund methodischer Anreicherungsversuche gestellt, und es ist ihm gelungen, einen einwandfreien Weg zur Konzentrierung und schließlich auch zur Reindarstellung des Protactiniums auszuarbeiten. Die bisher in reinem Zustand dargestellte Menge beträgt allerdings nur 2 mg. Es sind Versuche in größerem Maßstabe im Gange, um etwas größere Mengen Protactinium zu gewinnen, mit denen sich dann wohl auch Atomgewichtsbestimmungen und andere für die allgemeine Chemie wichtige Untersuchungen ausführen lassen werden.

An dieser Stelle seien noch einmal in einer Tabelle die neuesten Ergebnisse der Elementenforschung zusammengefaßt.

Tab. 1.

Neu aufgefundene bzw. noch fehlende Elemente.  
(März 1928)

72 Hafnium	in größerem Maßstabe rein dargestellt; bei Bedarf in belieb. Menge gewinnbar.
75 Rhenium	etwa 1 g gewonnen, wichtigste chemische Reaktionen festgestellt, Atomgewicht $188 \pm 1$ .
91 Protactinium	einige Milligramm rein dargestellt; Darstellbarkeit in Grammen möglich, aber kostspielig.

61 Illinium	durch optisches und Röntgenspektrum nachgewiesen.
43 Masurium	durch Röntgenspektrum nachgewiesen.
85 Ekajod	unbekannt.
87 Ekacäsum	

Man sieht, daß von den 92 chemischen Grundstoffen, die die Gesamtheit unserer materiellen Welt darstellen, jetzt alle bis auf zwei aufgefunden worden sind. Vielleicht wird ein glücklicher Zufall eines Tages auch diese beiden Grundstoffe finden lassen, vielleicht sind sie gar nicht vorhanden; wir wissen es nicht. Dem Forschergeist sind auf jeden Fall auf dem Gebiete der Elementenlehre keine weiteren Möglichkeiten mehr offen. Daß diese hier besprochenen Elemente jetzt aufgefunden wurden, verdanken wir der Einführung neuer, früher unbekannter Methoden in die analytische Chemie. Alle genannten Elemente wurden entweder durch die moderne Röntgenspektroskopie oder durch Methoden der Radioaktivität nachgewiesen.

In der Geschichte der Elementenlehre hat schon früher einmal die Anwendung neuer Hilfsmittel der Forschung große Ergebnisse im Gefolge gehabt, nämlich die Einführung der Spektralanalyse. Durch sie gelang erst die Entdeckung der Elemente Rubidium, Cäsium, Gallium, Indium, Thallium, Helium u. a. mehr.

Man kann also nicht umhin, die Kunst der früheren Chemiker zu bewundern, die die Elemente, die mit den ihnen zu Gebote stehenden Hilfsmitteln zu entdecken waren, tatsächlich auch entdeckt haben.

Auf einem andern Gebiete stehen wir noch mitten in der Entwicklung, und täglich können Ergebnisse erzielt werden, die unsere Erkenntnisse erweitern. Dies anderes Gebiet, das mit dem der Elementenforschung aufs innigste zusammenhängt, ist die Lehre von den Isotopen Atomarten.

Die ersten Erkenntnisse kamen hier ganz von Seiten der Radioaktivitätsforschung. Hier war eine so große Anzahl von neuen Substanzen aufgefunden worden, die alle den Anspruch erheben konnten, als neue chemische Elemente zu gelten, daß ihre Unterbringung im periodischen System hoffnungslose Schwierigkeiten zu bereiten schien. Als erster hat sodann Soddy erkannt, daß es unter diesen Radioelementen eine ganze Anzahl gibt, die chemisch völlig untrennbar voneinander sind, die sich also nicht etwa wie die seltenen Erden chemisch sehr nahestehen, sondern bei ganz verschiedenen radioaktiven Eigenschaften chemisch identisch sind, im periodischen System also an ein und derselben Stelle untergebracht werden müssen. Und schon 1910 hat Soddy die Möglichkeit diskutiert, daß auch die gewöhnlichen Elemente Gemische von Isotopen sein könnten, Elementen, die trotz verschiedenen Atomgewichts im periodischen System an ein und derselben Stelle stehen und gleiche chemische Eigenschaften aufweisen.

Bei den radioaktiven Substanzen wurde die Isotopie durch Gesetzmäßigkeiten in den Zerfallsreihen bewiesen, die bedingen, daß gewisse Radioelemente, obgleich sie sich im Atomgewicht um vier Einheiten unterscheiden müssen, im System der Elemente an derselben Stelle stehen.

Auch für den nicht mit Radioaktivität beschäftigten Chemiker wurden dann die Tatsachen der Isotopie überzeugend, als der Nachweis erbracht wurde, daß das Blei, das bei dem allmählichen Zerfall des Urans entstanden ist, und das man in fast beliebigen Mengen aus Uranmineralien herstellen kann, ein anderes Atomgewicht hat als unser gewöhnliches Blei, und daß auch das Blei

aus Thormineralien wieder ein anderes Atomgewicht hat als die beiden vorher genannten Bleiarten. Das Atomgewicht hatte damit seine Rolle als wichtigstes Charakteristikum eines chemischen Elements verloren. An seine Stelle ist die Ordnungszahl getreten, die nicht durch die Masse, sondern durch die Ladung des Atomkernes bestimmt wird.

Daß wir im Falle der isotopen Bleiarten in der glücklichen Lage sind, die einzelnen Isotopen je nach Wahl des Ausgangsmaterials für sich allein rein abzuscheiden, hat seine Ursache darin, daß das sogenannte Uranblei und das Thorblei, also die Bleiarten aus Uran und aus Thormineralien, erst nach Entstehung der festen Erdkruste in den betreffenden Mineralien gebildet worden sind. Die Bildung der gewöhnlichen chemischen Elemente ist aber sicher bereits vor Erstarrung der festen Erdkruste erfolgt, so daß zwangsläufig alle Isotopen in dem früher flüssigen oder gasförmigen Substrat sich homogen vermischen konnten. Einmal miteinander gemischt, verhalten sie sich aber wie ein einheitliches homogenes Element, in dem infolge der gleichen chemischen Eigenschaften eine Entmischung nicht mehr eintreten kann.

Eine Reihe schon lange bekannter Tatsachen sprach dafür, daß ein beträchtlicher Teil unserer gewöhnlichen chemischen Elemente derartige Isotopengemische vorstellt. Seit langem kennt man die im periodischen System auftretenden Atomgewichtsunterschiede um ganze Zahlen, wobei vor allem der Unterschied um vier Einheiten, das Atomgewicht des Heliums resp. des bei radioaktiven Prozessen auftretenden  $\alpha$ -Teilchens, in die Augen fällt. Die häufig nahezu erfüllte Ganzahligkeit der Atomgewichte war ja auch die Ursache, daß Prout seine Hypothese über die Entstehung aller Elemente aus dem leichtesten Element, dem Wasserstoff, aufstellen konnte. Für eine Reihe wohlbekannter Elemente stimmte diese Prout'sche Hypothese aber gar nicht, z. B. beim Chlor, beim Magnesium, beim Kupfer u. a. In solchen Fällen lag es also nahe, Isotopengemische anzunehmen, aus deren zufälligem Mischungsverhältnis sich das praktisch gefundene Atomgewicht ergibt.

Wie war aber hierfür der Nachweis zu erbringen? Die gewöhnlichen chemischen Trennungsmethoden mußten hier versagen, denn bei diesen bedient man sich ja der durch die Ordnungszahl festgelegten chemischen Eigenschaften; da die Ordnungszahl für die Bestandteile eines Isotopengemisches aber gleich ist, sind es auch die chemischen Eigenschaften. Verschieden in den Isotopengemischen ist dagegen das Atomgewicht der Einzelbestandteile, also die Masse der Atomkerne. Man brauchte also Methoden, bei denen die verschiedenen Massen der Atome zur Geltung kommen; und eine solche Methode fand sich in der Untersuchung der positiven Strahlen, der sogenannten Kanalstrahlen der chemischen Elemente.

Unter diesen Kanalstrahlen versteht man positiv elektrisch geladene Gasteilchen, die in evakuierten Röhren, den Geißlerschen Röhren, zur negativen Elektrode fliegen und, falls diese durchbohrt ist, durch diesen Kanal in den Raum hinter der Kathode fliegen können. Auf dieser Bahn sind sie nun untersuchbar. Als bewegte elektrische Ladungen werden sie von magnetischen und elektrischen Feldern aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt. Der Betrag der Ablenkung hängt von ihrer Masse, Ladung und Geschwindigkeit ab. Es ist das große Verdienst von Aston, diese Ablenkbarkeit positiver Massestrahlen zu einer exakten Methode der Massenbestimmung dieser Teilchen ausge-

arbeitet zu haben. Die Aston'sche Methode beruht darauf, daß die Teilchen zuerst durch ein elektrisches Feld abgelenkt werden, und zwar ist die Ablenkung um so größer, je größer für das betreffende Teilchen die Ladung, je kleiner die Masse und Geschwindigkeit des Teilchens ist. Da auch für Teilchen gleicher Masse und Ladung die Geschwindigkeiten nicht gleich groß sind, wird ein vorher enges Strahlenbündel verschieden stark abgelenkt. Der Kunstgriff Aston's besteht nun darin, daß diese wegen ihrer verschiedenen großen Geschwindigkeit verschiedenen stark abgelenkten Strahlen jetzt durch ein homogenes Magnetfeld geschickt werden, dessen Kraftlinien so verlaufen, daß die magnetische Ablenkung der im elektrischen Felde erfolgten entgegengesetzt ist. Auch im magnetischen Felde werden Teilchen gleicher Masse und Ladung aber größerer Geschwindigkeit weniger abgelenkt als langsamere Teilchen. Durch passende Wahl der Stärke des Magnetfeldes ist es nun möglich, die durch das elektrische Feld infolge ihrer verschiedenen Geschwindigkeit auseinandergezogenen Teilchen gleicher Masse und Ladung wieder zu vereinigen und auf einer an der betreffenden Stelle angebrachten photographischen Platte sichtbar zu machen. Teilchen anderer Masse, oder auch anderer Ladung, gelangen nach dieser Methode der „Massenspektrographie“ an andere Stellen der Platte. Bei Anwesenheit verschiedener Elemente oder auch verschiedener isotoper Atomarten ein und desselben Elemententypus erhält man also verschiedene Lichtflecke auf der photographischen Platte, man erhält ein Massenspektrogramm, mittels dessen man die Atomgewichte der einzelnen Elementenbestandteile mit großer Genauigkeit bestimmen kann.

Es würde viel zu weit führen, wenn ich die zahlreichen, ungemein wichtigen Ergebnisse der Aston'schen Untersuchungen im einzelnen hier aufzählen wollte. Sie sind ja auch bereits in alle Lehrbücher der Physik und physikalischen Chemie übergegangen. Es hat sich in jeder Beziehung bestätigt, daß Elemente, deren chemisch ermitteltes Atomgewicht wesentliche Abweichungen von der Ganzahligkeit, bezogen auf Sauerstoff = 16,000, erkennen ließ, in der Tat Isotopengemische vorstellen. Es gibt Elemente, die aus nicht weniger als 11 solcher isotopen Atomarten zusammengesetzt sind, deren Einzelatomgewichte sich bis zu 12 Einheiten voneinander unterscheiden. Es gibt allerdings auch eine ganze Reihe von Elementen, die nur aus einer einzigen Atomart besteht. Von letzteren seien hier der Wasserstoff, das Helium, der Kohlenstoff, der Sauerstoff erwähnt. Im letzteren Falle bezeichnet also Element und Atomart die gleiche Substanz, im ersten Falle setzt sich das durch seine Ordnungszahl chemisch eindeutig definierte Element aus einigen oder einer ganzen Anzahl von Atomarten verschiedenen Atomgewichts aber gleicher Ordnungszahl zusammen.

In der von der Deutschen Atomgewichtskommission herausgegebenen Isotopentabelle der gewöhnlichen chemischen Elemente ist der neueste Stand der Isotopenlehre, soweit es sich um die Analyse der einzelnen Elemente auf isotope Atomarten handelt, wiedergegeben<sup>4)</sup>. Sieht man sich die Tabelle etwas näher an, so beobachtet man gewisse Gesetzmäßigkeiten, denen sicher durch die Stabilität der Atomkerne bedingte Ursachen zugrunde liegen.

<sup>4)</sup> Isotopentabelle der Deutschen Atomgewichtskommission, Ztschr. angew. Chem. 41, 27 [1928]; Ber. Dtsch. chem. Ges. 61, 29 [1928].

Eine Anzahl von Elementen ist durch eine große Zahl isotoper Atomarten ausgezeichnet, und zwar sind dies alle Elemente mit gerader Ordnungszahl. Bei Elementen ungerader Ordnungszahl sind bisher niemals mehr als zwei Isotope beobachtet worden. Auch hier wird man wieder an die mehrfach erwähnte Regel erinnert, daß Elemente ungleicher Ordnungszahl seltener in der Natur vorkommen als solche gerader.

Bei Elementen, die nur aus einer Atomart bestehen, ist natürlich das Atomgewicht gleich dem Verbindungsge wicht. Bei den Elementen, die aus mehreren Isotopen bestehen, ist das praktische Atomgewicht, oder das Verbindungsge wicht, der Mittelwert aus den Gewichten der verschiedenen Bestandteile. Durch diese Isotopenmischungen, bei denen manchmal die schwerere, manchmal die leichtere Atomart überwiegt, erklären sich auch die früher unverständlichen Anomalien in den Atomgewichten gewisser benachbarter Elemente, nämlich Argon-Kalium, Kobalt-Nickel, Tellur-Jod. Während durch die Ordnungszahl die Stellung der betreffenden Elemente richtig wiedergegeben wird, ist dies bei Verwendung des Atomgewichts an Stelle der Ordnungszahl nicht der Fall. Kalium hat ein niedrigeres Atomgewicht als das Argon, obgleich es im System hinter diesem steht. Die Erklärung ist die, daß beim Argon die schwerere Atomart bedeutend überwiegt, während es beim Kalium gerade umgekehrt ist. Dasselbe ist der Fall bei den anderen Elementenpaaren, bei denen die Reihenfolge der Atomgewichte nicht mit ihrer Stellung im System in Einklang steht.

Bei der großen Zahl von Elementen, die mehrere Atomarten besitzen, tritt nun zuweilen auch der Fall ein, daß Atome verschiedener chemischer Elemente das gleiche Atomgewicht besitzen. Solche Elemente nennt man isobare Atomarten. In der Tabelle sieht man die

Tab. 2.

Tabelle der bisher festgestellten isobaren Atomarten inaktiver Elemente.

Ar <sub>40</sub>	Zn <sub>70</sub>	Ge <sub>74</sub>	Se <sub>78</sub>	Se <sub>80</sub>	Se <sub>82</sub>	Kr <sub>86</sub>	Cd <sub>112</sub>	Cd <sub>114</sub>
Ca <sub>40</sub>	Ge <sub>70</sub>	Se <sub>71</sub>	Kr <sub>78</sub>	Kr <sub>80</sub>	Kr <sub>82</sub>	Sr <sub>88</sub>	Sn <sub>112</sub>	Sn <sub>114</sub>
In <sub>115</sub>	Cd <sub>116</sub>	Sn <sub>121</sub>	Sn <sub>124</sub>	Te <sub>126</sub>	Te <sub>128</sub>	Te <sub>130</sub>	X <sub>136</sub>	Ce <sub>142</sub>
Sn <sub>115</sub>	Sn <sub>116</sub>	Sb <sub>121</sub>	X <sub>124</sub>	X <sub>126</sub>	X <sub>128</sub>	X <sub>130</sub>	Ba <sub>(136)</sub>	Nd <sub>142</sub>

bisher festgestellten Isobaren verzeichnet. Es handelt sich hier also um Atomarten, die bei gleichem Atomgewicht verschiedene Ordnungszahl und daher verschiedene chemische Eigenschaften aufweisen. Bei den radioaktiven Elementen waren solche Isobaren schon länger bekannt.

Ich wende mich jetzt noch zu einem sehr wichtigen Punkt der Isotopenlehre, zur Frage nach der Ganzahligkeit der Einzelatomgewichte. In der Isotopen-tabelle ist nur der Wasserstoff als gebrochene Zahl aufgeführt. Verglichen mit Wasserstoff = 16,000 sind alle anderen Einzelatomgewichte als ganze Zahlen wiedergegeben. Mit diesem Nachweis, daß die wahren Atomgewichte praktisch ganze Zahlen sind, kann die Prout'sche Hypothese als bewiesen gelten.

Allerdings stimmt die Ganzahligkeit nicht im Vergleich zum Wasserstoff, sondern im Vergleich zum Sauerstoff. Wie ist nun dieses abweichende Verhalten beim Wasserstoff zu erklären? Es besteht keinerlei Zweifel darüber, daß der Wasserstoff eine einheitliche Atomart ist, die sich von der Ganzahligkeit, verglichen mit Sauerstoff, um fast 1% unterscheidet. Daß der Wasserstoff nicht aus einem Isotopengemisch besteht, wurde durch direkte Versuche von Stern und Völlmeyer und durch Aufnahmen des Massenspektrums durch

Aston bewiesen. Andererseits kann als sicher erwiesen gelten, daß neben dem Helium der Wasserstoff ein Bestandteil aller Atomkerne ist. Heliumkerne und Protonen (also Wasserstoffkerne) sind beim Zerfall der Atome nachgewiesen; erstere in Form von  $\alpha$ -Strahlen beim radioaktiven Zerfall, letztere in Form von Wasserstoffstrahlen bei der künstlichen Atomzertrümmerung. Vermutlich sind auch die  $\alpha$ -Teilchen, also die Heliumkerne, aus vier Protonen und zwei Elektronen zusammengesetzt, so daß sich die Vielheit aller Atome letzten Endes aus den beiden Grundelementen Proton und Elektron zusammensetzt.

Die Masse des Heliumatoms 4,00 ist nun wesentlich geringer als die von vier Wasserstoffatomen 4 · 1,00778. Dies läßt sich so erklären, daß bei dem Zusammentreten der vier Wasserstoffatome zum Helium so große Energiemengen frei werden, daß diese Energieabgabe einen Massenverlust, einen sogenannten Massendefekt bewirkt, dessen Betrag durch die obige Atomgewichtsdifferenz ausgedrückt ist. Aus der von Einstein zuerst formulierten Äquivalenz von Masse und Energie wissen wir, daß eine Masse  $m$  in Ruhezustand ausgedrückt werden kann als die Energiemenge  $m \cdot e^2$ , worin  $e$  die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Die dem obigen Massenverlust entsprechende Energieabgabe ist eine ungeheuer große; sie ist  $4 \cdot 0,00778 \cdot 9 \cdot 10^{20} = 2,8 \cdot 10^{19}$  Erg. Dies sind Energiemengen, die weit jenseits aller uns zugänglichen Hilfsmittel liegen.

Im Sinne dieser Erklärung ist also die Verpackung von je vier Wasserstoffatomen zu einem Heliumatom eine besonders dichte und viel stärker als die weitere Verpackung von etwa vier Heliumatomen zu einem Sauerstoffatom oder drei Heliumatomen zu einem Kohlenstoffatom. Denn sonst müßten ja auch hier merkliche Atomgewichtsdifferenzen auftreten. Da es aber äußerst unwahrscheinlich ist, daß bei der Bindung dieser schweren Atome nicht auch Energie abgegeben werden sollte, erhält die Frage nach der Bestimmung möglichst genauer Atomgewichte eine erhöhte Bedeutung. Eine Abweichung von der Ganzahligkeit, verglichen mit Helium, würde dann also ein Maß für die Bindungsenergie des höheren Atoms aus den Heliumatomen ergeben. Mit der früheren Genauigkeitsgrenze der Aston'schen Versuchsanordnung war hier eine Entscheidung nicht zu treffen.

In den letzten Jahren ist es nun Aston gelungen, einen Massenspektrographen zu bauen, dessen spektrales Auflösungsvermögen das Fünffache der früheren besten Leistung ergibt. Die Genauigkeit der Massenbestimmung wurde dadurch auf 1 : 10 000 erhöht. So wurde es möglich, die Abweichungen der Einzelatomgewichte von der Ganzahligkeit viel genauer zu bestimmen als bisher. Die Aston'schen Untersuchungen konnten daher jetzt nach zwei verschiedenen Richtungen fortgesetzt werden. Einerseits läßt sich die Anzahl isotoper Atomarten aus Elementengemischen innerhalb weiterer Grenzen als bisher feststellen, andererseits werden genaue Atomgewichtsbestimmungen der isotopen Atomarten ermöglicht, mit einer Genauigkeit, die die bisherigen Atomgewichtsbestimmungen erreicht, vielleicht in einzelnen Fällen sogar übertrifft. In der Tabelle der isotopen Atomarten sind die Ergebnisse der erstenen Arbeitsrichtung, also die Feststellung der einzelnen Atomarten, bereits verwertet.

Die Ergebnisse der anderen Arbeitsrichtung, die genauen Atomgewichtsbestimmungen und damit die Abweichungen der Einzelatomgewichte von der Ganzahligkeit, sind, mit Ausnahme des Wasserstoffs, in der ge-

nannten Tabelle nicht berücksichtigt. Diese Ergebnisse wurden von Aston in einer besonderen Zusammenstellung übersichtlich dargestellt. Aston führt hier, um ein Maß für die losere oder festere Beziehung der Kerne zu erhalten, den Begriff des Packungsanteils (Packing fraction) ein. Als Packungsanteil versteht Aston die Abweichung von der Ganzzahligkeit pro Wasserstoffkern in der betreffenden Atomart, bezogen auf Wasserstoff = 16,000. Die Richtigkeit der Prout'schen Hypothese, die gedachte Entstehung aller Atome

Tab. 3.

Tabelle der Einzel-Atomgewichte, berechnet aus dem experimentell ermittelten Packungsanteil.

Atom	Packungs- anteil $\times 10^4$	Masse O = 16	Atom	Packungs- anteil $\times 10^4$	Masse O = 16
H	77,8 $\pm$ 1,5	1,00778	Cl <sup>35</sup>	-4,8 $\pm$ 1,5	34,983
He	5,4 $\pm$ 1	4,00216	Ar <sup>36</sup>	-6,6 $\pm$ 1,5	35,976
Li <sup>6</sup>	20,0 $\pm$ 3	6,012 <sup>1)</sup>	Cl <sup>37</sup>	-5,0 $\pm$ 1,5	36,980
Li <sup>7</sup>	17,0 $\pm$ 3	7,012 <sup>1)</sup>	Ar <sup>40</sup>	-7,2 $\pm$ 1	39,971
B <sup>10</sup>	13,5 $\pm$ 1,5	10,0135	As	-8,8 $\pm$ 1,5	74,934
B <sup>11</sup>	10,0 $\pm$ 1,5	11,0110	Kr <sup>78</sup>	-9,4 $\pm$ 2	77,926
C	8,0 $\pm$ 1	12,0036	Br <sup>79</sup>	-9,0 $\pm$ 1,5	78,929
N	5,7 $\pm$ 2	14,008	Kr <sup>80</sup>	-9,1 $\pm$ 2	79,926
O	0,0	16,0000	Kr <sup>81</sup>	-8,6 $\pm$ 1,5	80,926
F	0,0 $\pm$ 1	19,0000	Kr <sup>82</sup>	-8,8 $\pm$ 1,5	81,927
Ne <sup>20</sup>	0,2 $\pm$ 1	20,0004	Kr <sup>83</sup>	-8,7 $\pm$ 1,5	82,927
Ne <sup>22</sup>	(2,2?)	22,0048	Kr <sup>84</sup>	-8,5 $\pm$ 1,5	83,928
P	-5,6 $\pm$ 1,5	30,9825	Kr <sup>86</sup>	-8,2 $\pm$ 1,5	85,929
			J	-5,3 $\pm$ 2	126,932
Zinn (11 Isotope) . . . . .		Sn <sup>120</sup>	-7,3 $\pm$ 2	119,912	
Xenon (9 Isotope) . . . . .		Xe <sup>134</sup>	-5,3 $\pm$ 2	138,929	
Quecksilber (6 Isotope) . . . . .		Hg <sup>200</sup>	+0,8 $\pm$ 2	200,016	

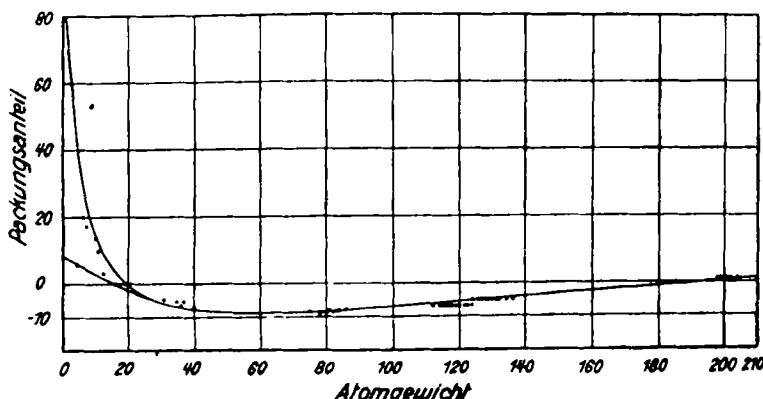
<sup>1)</sup> Die Werte beim Lithium stammen von Costa. (Siehe J. L. Costa, Ann. Phys. [10] 4, 425 [1925]; Aston, 1. c., S. 509.)

Im Sinne dieser Aston'schen Definition besitzt das Wasserstoffatom mit seinem genauen Atomgewicht von 1,00778 einen Packungsanteil von 0,00778 oder gleich  $77,8 \cdot 10^{-4}$ . Der Packungsanteil aller übrigen untersuchten Atomarten ist wesentlich kleiner, beim Sauerstoff definitionsgemäß gleich Null. Das Bor mit seinem praktischen Atomgewicht von 10,82 besteht aus den Atomarten Bor<sub>10</sub> und Bor<sub>11</sub>. Das genaue Atomgewicht von Bor<sub>10</sub> ist nun nicht gleich 10,000, sondern gleich 10,0135. Der Packungsanteil pro Wasserstoffkern in diesem Boratom ist also gleich  $\frac{0,0135}{10} = 13,5 \cdot 10^{-4}$ .

Beim Bor<sub>11</sub> scheint der Packungsanteil etwas kleiner zu sein. Das Atomgewicht von Bor<sub>11</sub> ist gleich

11,0110; der Packungsanteil also gleich  $\frac{0,0110}{11} = 10,0 \cdot 10^{-4}$ .

In der Tabelle 3 sind die von Aston gemessenen Packungsanteile für eine Anzahl von Atomarten und die sich daraus ergebenden Atomgewichte wiedergegeben; Abb. 3 zeigt die Ergebnisse in Kurvenform. Man sieht, wie der Packungsanteil vom Wasserstoff ab schnell sinkt; bei Lithium und Bor ist er noch recht merklich; er ist



Abhängigkeit des Packungsanteils vom Atomgewicht.

Abb. 3.

sehr klein beim Helium und äußerst klein beim Kohlenstoff. Vom Phosphor ab wird er sogar negativ, um allmählich wieder anzusteigen. Man muß wohl aus diesen Zahlen schließen, daß das Atomgewicht des aus einer einzigen Atomart bestehenden Heliums nicht, wie früher angenommen wurde, 4,00 ist, sondern (in Übereinstimmung mit den neuesten Atomgewichtsbestimmungen von Baxter und Starkweather) etwas größer, nämlich 4,002; das des Kohlenstoffs nicht 12,00, sondern 12,0036. Man kann aus diesen Zahlen schließen, daß bei der gedachten Entstehung von O = 16 aus 4 He auch noch geringer Massendefekt eintritt, der zwar lange nicht so groß ist wie der bei der gedachten Bildung des Heliums aus Wasserstoff, der aber doch genügt, die Stabilität des O-Atoms, wie sie sich aus Rutherford's und Chadwick's Atomzertrümmerungsversuchen ergibt, zu verstehen.

Sicher sind die Untersuchungen über die isotope Zusammensetzung unserer chemischen Elemente und die erst jetzt in den Kreis der genauen Meßbarkeit gebrachten Bestimmungen der Einzelatomgewichte der Elementenbestandteile ein aussichtsreicher Weg, die noch so sehr im Dunkel liegenden Fragen des Aufbaus der Atomkerne um ein großes Stück weiterzubringen. [A.55.]

## Neuere Forschungen auf dem Gebiet der heterogenen Katalyse.

Von Dr. WALTER FRANKENBURGER.

Forschungslaboratorium Oppau der I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft.

(Eingeg. am 26. Febr. 1928.)

### Inhalt und Einteilung des Berichtes.

Der folgende Bericht soll im wesentlichen diejenigen wissenschaftlichen Arbeiten der drei letzten Jahre behandeln, welche Einblicke in das Wesen der katalytischen Vorgänge an Grenzflächen vermitteln. Rein empirisch ausgeführte Untersuchungen mußten daher unberücksichtigt bleiben, so wichtig sie auch vielfach in allgemein chemischer und technischer Beziehung sind. — Trotz dieser Beschränkung ist die Fülle der einschlägigen Arbeiten noch so groß, daß nur das Wichtigste berücksichtigt werden konnte. Bei der Sichtung und Ordnung des literarischen Materials wurde aufs beste von

Herrn Dr. F. Dürr unterstützt, dem auch an dieser Stelle hierfür herzlichst gedankt sei.

Die Fragen, welche bei einer Entwirrung der katalytischen Prozesse zu lösen sind, sind zahlreich und bieten verschiedene Angriffsflächen; dementsprechend beziehen sich auch die den einzelnen Untersuchungen zugrunde liegenden Fragestellungen oftmals auf Teilprobleme, wobei je nach der individuellen Einstellung der Forscher der Gesichtswinkel sich ändert, unter dem die Probleme betrachtet werden.

Die Einteilung des Berichtes ist auf Grund dieser inhaltlichen und gedanklichen Verschiedenheiten der