

Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft.

1935, Nr. 1.

— Abteilung A (Vereinsnachrichten) —

9. Januar.

Otto Hahn: Die chemischen Elemente und natürlichen Atomarten nach dem Stande der Isotopen-Forschung (Bericht über die Arbeiten von Ende 1933 bis Ende 1934).

(Eingegangen am 14. Dezember 1934.)

In den im Auftrage der Deutschen Chemischen Gesellschaft zusammengestellten Berichten des Unterzeichneten über den Stand der Isotopen-Forschung¹⁾ wurden schon bisher die zahlreichen radioaktiven Isotope der Uran- und Thor-Zerfallsreihen fortgelassen, weil sich bei ihnen während der letzten Jahre nichts Wesentliches geändert hatte und ihre Aufnahme eine unnötige Belastung der Tabelle bedeutet hätte. Durch die Entdeckung der künstlich hervorrufbaren Radioaktivität kommen nun zu den in der Natur vorkommenden eine große Anzahl künstlich herstellbarer aktiver Atomarten gewöhnlicher chemischer Elemente hinzu. Ein Forschungsgebiet von bisher kaum übersehbarer Tragweite ist damit erschlossen, und neue Erkenntnisse folgen sich Schlag auf Schlag.

Doch ist dieses neue Gebiet zurzeit noch ein reines Arbeitsgebiet der Kern-Physik. Die nur mit empfindlichen physikalischen Methoden nachweisbaren, relativ kurzlebigen, künstlich gewonnenen, aktiven Isotope haben auf die Atomgewichts-Tabelle des Chemikers vorerst keinerlei Einfluß. Von einer Aufnahme in die Isotopen-Tabelle wurde daher Abstand genommen, und dementsprechend handelt dieser Bericht nicht von den „chemischen Elementen und Atomarten“, sondern von den chemischen Elementen und „natürlichen“ Atomarten.

Eine Ausnahme von dieser Beschränkung auf „natürliche“ Atomarten wird nur beim Helium gemacht. Hier wurde eine neue, bisher nur künstlich hergestellte Atomart, ${}^3\text{He}$ ²⁾, aufgenommen, weil sie wegen ihrer offensichtlichen Beständigkeit vielleicht auch einmal in der Natur nachgewiesen wird.

¹⁾ Hingewiesen sei hier auf einen sehr ausführlichen, kritisch zusammengestellten Sammelbericht von J. Mattauich, Methoden und Ergebnisse der Isotopen-Forschung, Physikal. Ztschr. **35**, 567—621 [1934]. Dieser für den Physiker verfaßte Bericht ist auch für den Chemiker, der sich mit der Entwicklung und dem heutigen Stande der Isotopen-Forschung vertraut machen will, sehr lesenswert.

²⁾ Nach einem Vorschlage von Stefan Meyer werden in diesem Bericht die Massen-Indices für die einzelnen Atomarten nach links oben gestellt. Diese Art der Darstellung scheint in der Tat am wenigsten Anlaß zu Mißverständnissen geben zu können.

Wasserstoff (Ordnungszahl 1). Über die Entdeckung und die prozentische Häufigkeit des Wasserstoff-Isotops mit der Masse 2 (auch Deuterium genannt) wurde schon in den letzten Jahren eingehender berichtet³⁾. Die prozentische Häufigkeit von ^2H : ^1H schwankt sicher je nach dem Ursprung und der Herstellung des zur Untersuchung verwendeten Wasserstoffs. Eine Beteiligung von 1:~5000 wird wohl ungefähr die normale sein. „Schweres“ Wasser $^2\text{H}_2\text{O}$ wird jetzt an vielen Stellen der Erde laufend hergestellt, und zahlreiche Arbeiten über seine chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften liegen bereits vor. Außer diesem Wasserstoff-Isotop ^2H wurde im Berichts-Jahr ein drittes Wasserstoff-Isotop ^3H im natürlichen Wasserstoff nachgewiesen und bei Zertrümmerungs-Versuchen künstlich hergestellt. Lozier, Smith und Bleakney⁴⁾ fanden mittels eines sehr empfindlichen Massen-Spektrographen das neue Isotop in etwa 99-proz. Deuterium (Atomformel ^2H) in einer Konzentration 1:200000. Der Gehalt in gewöhnlichem Wasserstoff ist danach von der Größenordnung 1:10⁹. Unabhängig davon und nach einer anderen Methode war auch Tuve, Hafstad und Dahl⁵⁾ der Nachweis der Existenz des neuen Isotops gelungen. Ihre vorläufige Schätzung bewegte sich um 1:10⁶ im Vergleich zu ^2H . Die Häufigkeit von ^3H im gewöhnlichen Wasserstoff stimmt also größenordnungsmäßig mit den Befunden von Lozier, Smith und Bleakney überein.

Das Vorkommen von ^3H in natürlichem Wasserstoff beweist die Stabilität des neuen Isotops. Eine bessere Quelle zu seiner Herstellung scheint aber die künstliche Gewinnung zu sein. Schon Oliphant, Harteck und Rutherford⁶⁾ schlossen aus Zertrümmerungs-Versuchen durch Beschießen von Verbindungen, die schweren Wasserstoff enthielten, mittels schnell bewegter Deutonen, also ^2H -Kernen, auf die Entstehung von Wasserstoff-Kernen von der Masse 3 neben Protonen. Die offensichtliche Richtigkeit dieser Interpretation wurde von Dee⁷⁾ bestätigt. Endgültig bewiesen wurde die Möglichkeit der künstlichen Gewinnung von ^3H beim Auftreffen von schnell bewegten Deutonen auf Deutonen durch Harnwell, Smyth, Van Voorhis und Kuper⁸⁾, die eine Anreicherung von ^3H in ^2H auf 1:5000 gegenüber dem ursprünglichen Verhältnis 1:200000 experimentell feststellten.

Helium (Ordnungszahl 2). Oliphant, Harteck und Rutherford⁶⁾ hatten bei der künstlichen Zertrümmerung von Deutonen durch Deutonen neben der Möglichkeit einer Bildung von ^3H auch die Möglichkeit der Bildung eines Helium-Isotops von der Masse 3 diskutiert und als sehr wahrscheinlich angesprochen. Bleakney, Harnwell, Lozier, Smith und Smyth⁹⁾ erbringen auf massen-spektroskopischem Wege den Beweis, daß eine solche künstliche Bildung von ^3He beim Auftreffen schneller Deutonen-Kanalstrahlen

³⁾ Isotopen-Bericht, B. **66**, (A) 1; B. **67**, (A) 1.

⁴⁾ W. Wallace Lozier, Philip T. Smith u. Walker Bleakney, *Physical Rev.* **45**, 655 [1934].

⁵⁾ M. A. Tuve, L. R. Hafstad u. O. Dahl, *Physical Rev.* **45**, 840 [1934].

⁶⁾ M. L. Oliphant, P. Harteck u. Lord Rutherford, *Nature* **133**, 413 [1934]; *Proceed. Roy. Soc.* **144**, 692 [1934].

⁷⁾ P. J. Dee, *Nature* **133**, 564 [1934].

⁸⁾ G. P. Harnwell, H. D. Smyth, S. N. Van Voorhis u. J. B. H. Kuper, *Physical Rev.* **45**, 655 [1934].

⁹⁾ Walker Bleakney, G. P. Harnwell, W. Wallace Lozier, Philipp T. Smith und H. D. Smyth, *Physical Rev.* **46**, 81 [1934].

auf Deutonen neben der Entstehung von ^3H tatsächlich vor sich geht. Nachdem der Wasserstoff durch Verbrennen zu Wasser zum weitaus größten Teil entfernt ist, gelingt der Nachweis des ^3He neben Spuren noch vorhandenen $^2\text{H}^1\text{H}$ durch Messung der zur Ionisierung des Gasinhalts nötigen Elektronenenergie. Sie entspricht für einen Teil der erzeugten Ionen der Ionisierungsspannung des Heliums. Die Verfasser schließen auf eine Bildung von 1 Tl. Helium pro 10^5 Tln. ^2H bei 5-stdg. Einwirkung. Das gebildete ^3He scheint wie der ^3H stabil zu sein; wenigstens zeigten die Proben im Geigerschen Spitzen-Zähler keinerlei Andeutung eines radioaktiven Zerfalls. Versuche, ^3He oder ^5He im gewöhnlichen Helium aufzufinden, schlugen bisher fehl.

Auch optisch wurde das künstlich gewonnene ^3He nachgewiesen. Unter Verwendung der von Paneth und Urry¹⁰⁾ entwickelten Methode zum Nachweis kleinster Helium-Mengen, wurde die bei obigen Versuchen gebildete ^3He -Menge von Urry¹¹⁾ zu 9.6×10^{-6} ccm bestimmt; eine Verunreinigung dieses Heliums mit gewöhnlichem Helium kann nur etwa 3% betragen haben.

Lithium (Ordnungszahl 3). Über das Verhältnis $^6\text{Li}:^7\text{Li}$ herrscht noch immer keine Übereinstimmung. Gegenüber den von Bainbridge¹²⁾ und von Aston¹²⁾ angegebenen, miteinander übereinstimmenden Werten von 1:11 finden Harnwell und Bleakney¹³⁾ mehr ^6Li , nämlich im Mittel etwa 1:8.4. Der Unterschied mit dem auf chemischem Wege ermittelten Atomgewicht würde dadurch größer als bisher. Von einer Umrechnung des Atomgewichts auf den neuen Wert wird daher vorerst Abstand genommen.

Von Bedeutung für die experimentelle Kern-Forschung ist die von Oliphant, Shire und Crowther¹⁴⁾ durchgeführte massen-spektroskopische Trennung der Lithium-Isotope in Mengen, die bereits Kernzertrümmerungsversuche mit den einzelnen Isotopen erlaubt haben. Die bisher gewonnenen Mengen sind gewichtsmäßig zwar nur in der Größenordnung 10^{-8} g; doch verspricht die Methode der Verfasser für die Zukunft die Herstellung von ungefähr 1 mg der getrennten Isotope pro Tag.

Kohlenstoff (Ordnungszahl 6). Zu den im letzten Berichtsjahr angegebenen Bestimmungen der relativen Häufigkeit von $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$, die eine Beteiligung des schwereren Isotops von etwa 1% ergaben, kommen zwei neue Bestimmungen hinzu. Aston¹⁵⁾ findet nach Anbringung einiger notwendiger Korrekturen die Beteiligung $^{13}\text{C}:^{12}\text{C} = 1:140$, also etwas weniger als 1%. Für das daraus berechnete chemische Atomgewicht des Kohlenstoffs ergibt sich der Wert 12.0080 ± 0.0005 .

Die genauesten chemischen Bestimmungen zeigen ebenfalls, daß das Atomgewicht des Kohlenstoffs höher ist als der in die Tabelle aufgenommene Wert 12.00. Die zuverlässigsten Resultate schwanken zwischen 12.005 und 12.011. So scheint das Astonische Verhältnis besser als das bisherige mit den chemischen Ergebnissen übereinzustimmen. Es empfiehlt sich jedoch, den bisherigen Wert beizubehalten, da eine weitere Bestimmung von

¹⁰⁾ F. Paneth u. Wm. D. Urry, Ztschr. physikal. Chem. **152**, 110 [1931].

¹¹⁾ G. P. Harnwell, H. D. Smyth u. Wm. D. Urry, Physical Rev. **46**, 437 [1934].

¹²⁾ O. Hahn, Isotopen-Bericht für 1932, B. **66**, (A) 1 [1933].

¹³⁾ G. P. Harnwell u. W. Bleakney, Physical Rev. **45**, 117 [1934].

¹⁴⁾ M. L. Oliphant, E. S. Shire u. B. M. Crowther, Proceed. Roy. Soc. **146**, 922 [1934].

¹⁵⁾ F. W. Aston, Nature **134**, 178 [1934].

Vaughan, Williams und Tate¹⁶⁾ vorliegt, die im Gegensatz zu Aston mehr ¹³C als bisher finden, nämlich $1:91.6 \pm 2.2$, woraus ein chemisches Atomgewicht von 12.0118 folgen müßte.

Sauerstoff (Ordnungszahl 8). Für das Verhältnis ¹⁸O:¹⁶O gilt bisher allgemein der Mecke-Childssche Wert 1:630. Für einen durch Zersetzen von PbO₂ gewonnenen Sauerstoff findet Smythe¹⁷⁾ die Beteiligung $1:503 \pm 10$. Der Verfasser gibt selbst an, daß der Wert je nach der Herkunft des zur Verwendung gebrachten Sauerstoffs wohl etwas schwanken könne, und kündigt neue Untersuchungen an, in denen etwa atmosphärischer Sauerstoff mit Sauerstoff erdgeschichtlich alter Gesteine verglichen werden soll. Ersterer könne vielleicht etwas weniger, letzterer etwas mehr ¹⁸O im Vergleich zu ¹⁶O enthalten. Es scheint daher ratsam, vorerst den von anderer Seite bestätigten Mecke-Childsschen Wert beizubehalten. Als Einzel-atomgewicht des ¹⁸O wurde der Wert 18.0065 in die Tabelle aufgenommen, der von Babcock und Birge¹⁸⁾ aus banden-spektroskopischen Messungen erhalten war.

Neon (Ordnungszahl 10). Über die prozentische Isotopen-Zusammensetzung des Neons gibt es eine Reihe von Untersuchungen, über die im letzten Jahre berichtet wurde. Eine Entscheidung, welches die zuverlässigsten Werte sind, wurde damals nicht gefällt. Inzwischen ist noch eine weitere Bestimmung hinzugekommen: Vaughan, Williams und Tate¹⁶⁾ finden ²⁰Ne:²¹Ne:²²Ne = 90.0:0.27:9.73. Da diese Angaben sich ungefähr im Rahmen der anderen bewegen, werden sie als die neuesten Werte in die Tabelle aufgenommen.

Silicium (Ordnungszahl 14). McKellar¹⁹⁾ berichtet in einer neuen banden-spektroskopischen Untersuchung über die Isotope des Siliciums. Er findet für die relative Beteiligung der drei Isotope ²⁸Si:²⁹Si:³⁰Si die Werte 89.6:6.2:4.2. Hiernach scheinen die selteneren Atomarten des Siliciums etwas stärker vertreten zu sein als aus den Aston'schen Bestimmungen bisher angenommen wurde. Doch scheinen die Angaben des Verfassers noch kleiner Korrekturen zu bedürfen, die McKellar noch auswerten will, wenn auch das mit Hilfe dieser provisorischen Werte berechnete Atomgewicht eine befriedigende Übereinstimmung mit dem chemischen Wert ergibt. Für das chemische Atomgewicht ergibt sich aus den McKellar'schen Angaben der Wert 28.122 gegenüber 28.06 der Internationalen Tabelle.

Argon (Ordnungszahl 18). Zeemann und de Gier²⁰⁾ haben nach der Parabel-Methode ein schon früher von J. J. Thomson vermutetes Argon-Isotop 38 einwandfrei nachgewiesen. Die Intensität dieses dritten Isotops beträgt nach den Verfassern 10—20% der schwachen Komponente ³⁶A. Für die Beteiligung ³⁶A:⁴⁰A haben Vaughan, Williams und Tate²¹⁾ $1:304 \pm 12$ gefunden, gegenüber dem bisher geschätzten Wert von etwa 1%. Das aus den neuen Angaben berechnete chemische Atomgewicht ist 39.948, stimmt nunmehr also sehr gut mit dem Wert der Tabelle 39.944 überein.

¹⁶⁾ A. L. Vaughan, J. H. Williams u. J. T. Tate, Bull. Americ. physical Soc. **9**, 11 [1934]. ¹⁷⁾ W. R. Smythe, Physical Rev. **45**, 299 [1934].

¹⁸⁾ H. D. Babcock u. R. T. Birge, Physical Rev. **37**, 233 [1931].

¹⁹⁾ Andrew Mc Kellar, Physical Rev. **49**, 761 [1934].

²⁰⁾ P. Zeemann u. J. de Gier, Koninkl. Akad. Wetensch. Amsterdam, Proc. **37**, 127 [1934] (C. 1934, II 553). ²¹⁾ Vaughan, Williams u. Tate, l. c.

Kalium (Ordnungszahl 19). Noch erfolgreicher als dies bisher beim Lithium möglich war, konnte beim Kalium die gewichtsmäßig nachweisbare Trennung der einzelnen Isotope durchgeführt werden. Mittels eines neuartigen Massen-Spektrometers hoher Intensität wurde von Smythe, Rumbaugh und West²²⁾ innerhalb 7 Stdn. 1 mg ³⁹K rein hergestellt.

Calcium (Ordnungszahl 20). Die Prüfung sehr intensiver Massenspektren von Calcium führte Aston²³⁾ zur Auffindung zweier, bisher nicht nachgewiesener Calcium-Isotope ⁴²Ca und ⁴³Ca. Ein aus der Existenz des β -strahlenden ⁴¹K vermutetes Calcium-Isotop 41 wurde dagegen nicht gefunden. Sollte es vorhanden sein, dann wäre seine Intensität sicher unter 1:1000²⁴⁾. Auch Calcium aus geologisch alten Kalium-Mineralien gab keine anderen Ergebnisse, obgleich diese das ⁴¹Ca angereichert enthalten sollten.

Für die relative Beteiligung der Calcium-Isotope gibt Aston die folgenden Werte:

Atomart (Massenzahl)	40	42	43	44
Prozentische Häufigkeit ..	27	0.8	0.2	2.3

Das ⁴⁴Ca ist also stärker vertreten als bisher angenommen war. Als praktisches Atomgewicht findet man aus obigen Angaben bei einem zu — 7 geschätzten Packungsanteil den Wert 40.077 gegenüber 40.08 der Internationalen Tabelle.

Titan (Ordnungszahl 22). Zu dem Haupt-Isotop ⁴⁸Ti gesellen sich nach neuen Untersuchungen Aston²⁵⁾ ganz symmetrisch 4 neue, schwache Begleiter mit den Atomgewichten 46, 47, 49 und 50. Über ihre relative Beteiligung sind noch keine Angaben gemacht. Mit der Auffindung dieser neuen Atomarten und dem Argon 38 sind alle Stellen vom Atomgewicht 9—56 mit nachgewiesenen Atomarten besetzt.

Nickel (Ordnungszahl 28). Durch die massen-spektroskopische Prüfung des Nickels als Nickelcarbonyl fand Aston²⁶⁾ außer den lange bekannten Isotopen ⁵⁸Ni und ⁶⁰Ni mit Sicherheit die neuen Isotope ⁶²Ni und ⁶¹Ni. Weitere schwache Linien im Spektrogramm bei 56 und 64 (unterhalb 1% Beteiligung) scheinen ebenfalls dem Nickel anzugehören; doch bedarf dies noch der Nachprüfung.

Zirkon (Ordnungszahl 40). Beim Zirkon wurde von Aston²⁶⁾ das bisher noch als zweifelhaft angesehene, sehr schwach vertretene Zirkon 96 bestätigt und außerdem ein neues Isotop ⁹¹Zr festgestellt. Die Beteiligung des letzteren ist sogar wesentlich erheblicher als die von ⁹⁶Zr. Daß es zunächst übersehen wurde, lag an dem zu geringen Auflösungsvermögen des früheren Spektrographen.

Niob (Ordnungszahl 41). In dem Isotopen-Bericht für 1932²⁷⁾ wurde über neue Astonsche Massen-Bestimmungen von Niob und Tantal referiert. Danach sind diese beiden Elemente Rein-elemente mit Atomgewichten, die

²²⁾ W. R. Smythe, L. H. Rumbaugh u. S. S. West, *Physical Rev.* **45**, 724 [1934].

²³⁾ F. W. Aston, *Nature* **133**, 684, 869 [1934].

²⁴⁾ Wegen der Möglichkeit der Existenz eines relativ kurzlebigen, stark aktiven Kalium-Isotops der Masse 40 s. L. Meitner, *Naturwiss.* **14**, 719 [1926].

²⁵⁾ F. W. Aston, *Nature* **133**, 684 [1934].

²⁶⁾ F. W. Aston, *Nature* **134**, 178 [1934]. ²⁷⁾ O. Hahn, *B.* **66**, (A) 3 [1933].

absolut unverträglich waren mit den auf chemischem Wege ermittelten Atomgewichten. Für das Niob berechnete Aston das praktische Atomgewicht zu 92.90. Der Wert der Internationalen Tabelle war 93.3. Eine chemische Atomgewichts-Bestimmung des Niobs durch Hönigschmid und Wintersberger²⁸⁾ ergab nunmehr eine vorzügliche Bestätigung des Aston'schen Wertes. Die Verfasser finden für das Niob 92.91.

Rhodium (Ordnungszahl 45). Vom Rhodium konnte zum ersten Male ein schwaches Massen-Spektrogramm aufgenommen werden. Es zeigte eine einzelne Linie entsprechend dem zu erwartenden Atomgewicht 103.

Cadmium (Ordnungszahl 48). Neue, von Aston²⁹⁾ aufgenommene, sehr starke Massen-Spektren des Cadmiums lassen neben den schon bekannten 6 Atomarten 114, 112, 110, 111, 113, 116 noch 3 schwache erkennen mit den Massenzahlen 106, 108, 115 in der Reihenfolge ihrer Intensität. Die im vorjährigen Bericht³⁰⁾ erwähnten Untersuchungen von Svensson, nach denen dieser Forscher aus banden-spektroskopischen Daten auf die Existenz von ¹¹⁸Cd und ¹⁰⁸Cd geschlossen hat, können nach Aston nicht zuverlässig sein, weil Svensson sonst auch das stärkere ¹⁰⁶Cd gefunden haben müßte. Für die Existenz eines Isotops ¹¹⁸Cd findet Aston keinen Hinweis.

Indium (Ordnungszahl 49). Aus dem chemischen Atomgewicht des Indiums von 114.8 sollte man schließen, daß das Indium, außer der bisher allein nachgewiesenen Komponente ¹¹⁵In, ein niedrigeres Isotop enthalten sollte. Wehrli³¹⁾ findet nun in der Tat im Banden-Spektrum des In I einen schwachen isotonen Begleiter, dem das Atomgewicht 113 zugeschrieben werden muß. Die Intensität der Kanten ergibt größenordnungs-mäßig das aus dem praktischen Atomgewicht zu erwartende Mengen-Verhältnis ¹¹⁵In : ¹¹³In = 14:1.

Seltene Erden. Von den seltenen Erden waren bisher nur die Anfangsglieder Lanthan, Cer, Praseodym und Neodym auf isotopische Zusammensetzung geprüft. In zwei vorläufigen Mitteilungen³²⁾ und einem ausführlichen Bericht³³⁾ bringt nun Aston die Untersuchung der ganzen Reihe der Erden und füllt damit eine große Lücke aus, die bisher noch in der Isotopen-Tabelle vorhanden war. Auf experimentelle Einzelheiten kann hier nicht eingegangen werden. Wegen der geringen Intensität der in Form beschleunigter Anoden-Strahlen verwendeten Substanzen mußten die Spaltöffnungen der Apparatur weiter gemacht werden als sonst. Die Spektrogramme wurden dadurch etwas unschärfer; immerhin ließ sich die relative Beteiligung der einzelnen Isotope in vielen Fällen befriedigend bestimmen. Die Ergebnisse sind im folgenden kurz zusammengestellt. Die Berücksichtigung des Packungs-Anteils, die Um-

²⁸⁾ O. Hönigschmid, Naturwiss. **22**, 463 [1934]; O. Hönigschmid u. K. Wintersberger, Ztschr. anorgan. allgem. Chem. **219**, 161 [1934].

²⁹⁾ F. W. Aston, Nature **134**, 178 [1934].

³⁰⁾ O. Hahn, B. **67**, (A) 7 [1934].

³¹⁾ M. Wehrli, Naturwiss. **22**, 289 [1934].

³²⁾ F. W. Aston, Nature **132**, 930 [1933], **133**, 327 [1934].

³³⁾ F. W. Aston, Proceed. Roy. Soc. **146**, 46 [1934].

rechnung auf die „chemische“ Basis und der Vergleich mit den Werten der Internationalen Tabelle folgen am Schluß der Gruppe.

Cer (Ordnungszahl 58). Die relative Beteiligung der schon früher nachgewiesenen Isotope ^{140}Ce und ^{142}Ce wird zu 89% und 11% geschätzt. Als Mittelwert für die (ganzzahligen) Massenzahlen ergibt sich daraus 140.22 ± 0.05 .

Neodym (Ordnungszahl 60). Das Element enthält die schon früher festgestellten Atomarten 142, 144, 146. Außerdem wurden zwei weitere Atomarten bei 143 und 145 sichergestellt.

Die prozentische Häufigkeit der einzelnen Atomarten wird folgendermaßen angegeben:

Atomart (Massenzahl) .	142	143	144	145	146
Prozent. Häufigkeit ...	36	11	30	5	18

Der Mittelwert hieraus ist 143.6 ± 0.2 .

Samarium (Ordnungszahl 62). Das Samarium besteht aus vielen Atomarten. Nachdem anfangs nur 5 Isotope festgestellt werden konnten, wurden später im sehr intensiven Spektrum noch 2 weitere aufgefunden. Die Beteiligung ist die folgende:

Atomart (Massenzahl) .	144	147	148	149	150	152	154
Prozent. Häufigkeit ...	3	17	14	15	5	26	20

Der Mittelwert der Massen-Zahlen ist 150.2 ± 0.2 .

Europium (Ordnungszahl 63) besteht aus 2 etwa gleich starken Atomarten, deren relative Beteiligung sehr genau bestimmt werden konnte.

Atomart	151	153
Prozent. Häufigkeit ...	50.6	49.4.

Mittelwert hieraus = 151.988 ± 0.005 .

Gadolinium (Ordnungszahl 64). Ein besonders gereinigtes Präparat zeigte 5 Komponenten folgender Intensität:

Atomart	155	156	157	158	160
Prozent. Häufigkeit ...	21	23	17	23	16

Mittelwert = 157.0 ± 0.2 .

Terbium (Ordnungszahl 65) ist ein Rein-element vom (unkorr.) Atomgewicht 159.

Dysprosium (Ordnungszahl 66). Die nicht besonders gut geglückten Aufnahmen lassen auf 4 Isotope ungefähr gleicher Intensität schließen. Die vorläufigen Intensitäts-Schätzungen ergaben:

Atomart	161	162	163	164
Prozent. Häufigkeit ...	22	25	25	28.

Mittelwert hieraus 162.6 ± 0.2 .

Holmium (Ordnungszahl 67). Gut gelungene Aufnahmen des Massenspektrums geben nur eine einzelne Linie, dem (unkorr.) Atomgewicht 165 zugehörig.

Erbium (Ordnungszahl 68). Nach vorläufigen Versuchen, die auf eine sehr große Zahl von Isotopen hatten schließen lassen, konnte bei endgültigen Versuchen mit einem von Hönigschmid zur Verfügung gestellten, besonders gereinigten Präparat gezeigt werden, daß Erbium nur aus 4 Isotopen besteht, wenigstens soweit solche prozentisch irgendwie ins Gewicht fallen. Noch etwas rohe Intensitäts-Bestimmungen ergaben:

Atomart	166	167	168	170
Prozent. Häufigkeit ...	36	24	30	10.

Hieraus berechnet sich der Mittelwert der Massenzahlen zu 167.24 ± 0.2 .

Thulium (Ordnungszahl 69) scheint ein Rein-element zu sein mit dem Atomgewicht 169.

Ytterbium (Ordnungszahl 70) ergab klare Massen-Spektrogramme mit 5 Linien. Ihre relative Intensität wurde folgendermaßen geschätzt:

Atomart	171	172	173	174	176
Prozent. Häufigkeit ...	9	24	17	38	12.

Der Mittelwert hieraus = 173.3 ± 0.2 .

Cassiopeium (Lutetium) (Ordnungszahl 71) ist wieder ein Rein-element vom Atomgewicht 175.

Die Umrechnung der hier zusammengestellten neuen Astonschen Bestimmungen auf die „chemischen“ Atomgewichte geschah in folgender Weise: Der genaue Packungs-Anteil der einzelnen Erden konnte wegen der erheblichen Linien-Breite der Spektrogramme bisher nicht experimentell bestimmt werden. Aston schätzt ihn für die leichtesten Erden zu — 5, für die schwersten Glieder der Reihe auf —3. Mit steigendem Atomgewicht fällt also der ab-zuziehende Massen-Defekt. Umgekehrt muß notwendigerweise die zur Um-rechnung auf die „chemische“ Atomgewichts-Skala ebenfalls abzuziehende Korrektur mit steigendem Atomgewicht zunehmen. Die Summe der beiden Subtrahenden kompensiert sich einigermaßen. Man begeht einen relativ zur Meßgenauigkeit zu vernachlässigenden Fehler, wenn man von den mittleren Massen-Zahlen der ganzen Reihe jedesmal 0.09 Atomgewichts-Einheiten ab-zieht, um auf das chemische Atomgewicht zu kommen. Die sich hieraus ergebenden „chemischen“ Atomgewichte hat Aston in der folgenden Tabelle zusammengestellt und den neuesten Werten der Internationalen Tabelle gegenübergestellt:

Chemische Atomgewichte der seltenen Erden für $0 = 16$.

nach Astons Bestimmungen	Werte der Internationalen Tabelle 1934	Unterschiede soweit beträchtlich
57 La 138.91 ± 0.05	138.92	—
58 Ce 140.13 ± 0.05	140.13	—
59 Pr 140.91 ± 0.05	140.92	—
60 Nd 143.5 ± 0.2	144.27	0.6
62 Sm 150.1 ± 0.2	150.43	0.3
63 Eu 151.90 ± 0.03	152.0	—
64 Gd 156.9 ± 0.2	157.3	0.4

Chemische Atomgewichte der seltenen Erden für $0 = 16$.

nach Astons Bestimmungen	Werte der Internationalen Tabelle 1934	Unterschiede, soweit beträchtlich
65 Tb 158.91 \pm 0.05	159.2	0.3
66 Dy 162.5 \pm 0.2	162.46	—
67 Ho 164.91 \pm 0.05	163.5	1.4
68 Er 167.15 \pm 0.2	167.64	0.5
69 Tm 168.91 \pm 0.05	169.4	0.5
70 Yb 173.2 \pm 0.2	173.04	—
71 Cp 174.91 \pm 0.05	175.0	—

Die Unterschiede der aus massen-spektroskopischen und der nach chemischen Methoden erhaltenen Werte sind z. T. so groß, daß eine Neubestimmung einzelner Elemente auch nach chemischen Methoden wünschenswert erscheint. Sicher sind gerade diese Bestimmungen mit großen Schwierigkeiten verbunden, besonders seitdem erkannt wurde, daß eine ganze Anzahl von Erden in verschiedenen Wertigkeits-Stufen vorkommen kann. Die Internationale Atomgewichts-Kommission hat deshalb auch vorerst Abstand davon genommen, den neuen Hönigschmidschen Wert für das Erbium, der 165.20 ergeben hat, in die Tabelle aufzunehmen. Auf der anderen Seite wurde von Aston selbst darauf hingewiesen, daß die Bestimmung der relativen Intensität komplexer Elemente, die viele eng benachbarte Atomarten aufweisen, bei der zur Untersuchung der seltenen Erden notwendigen Spaltbreite des Spektrographen mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist.

Hafnium (Ordnungszahl 72). Das Spektrum zeigt nach Aston³⁴⁾ 5 Linien, entsprechend den Atomgewichten 176—180. Starke Linien sind bei 178 und 180, etwas weniger starke bei 177 und 179; eine schwache ist bei 176.

Tantal (Ordnungszahl 73). Hier gilt das gleiche, was beim Niob gesagt wurde. Die große Unstimmigkeit zwischen dem Astonschen Wert für das Atomgewicht des Tantals (180.89 für $0 = 16$) und dem „chemischen“ Wert der Internationalen Tabelle (181.4) ist von Hönigschmid und Schlee³⁵⁾ zugunsten des Astonschen Wertes entschieden worden. Bei der Analyse des TaBr₅ finden Hönigschmid und Schlee vorläufig als Mittel von 8 Bestimmungen das Atomgewicht des Tantals zu 180.89, in absoluter Übereinstimmung mit Aston.

Thorium (Ordnungszahl 90). Beim Thorium wurde von Aston³⁴⁾ nur eine Linie im Massen-Spektrum festgestellt; sie entspricht dem Atomgewicht 232. Das „chemische“ Atomgewicht von 232.12 erscheint danach etwas hoch.

³⁴⁾ F. W. Aston, Nature **133**, 684 [1934].

³⁵⁾ O. Hönigschmid, Naturwiss. **22**, 463 [1934].

Tabelle 1.

Isotopen- und Atomgewichts-Tabelle der gewöhnlichen chemischen Elemente, soweit Ende 1934 bekannt.

Ordnungszahl	Element	Symbol	Massen-Zahl	Häufigkeit in %	Packungs-Anteil	Einzelatom-gewicht	Chemisches Atom-gewicht für O = 16		Bemerkungen			
							nach Ergebnissen der Isotopen-Forschung	Wert der Internationalen Tabelle				
1	Wasserstoff	H	1	99.98	$+77.75 \pm 0.35$	1.007775	1.00776	1.0078				
		H	2	0.02						$+68.2 \pm 0.2$	2.01363	
		H	3	10^{-7}						—	—	
2	Helium	(He)	(3)	?	—	—	—	—	s. diesen Bericht S. 2 s. S. 2			
		He	4	100	$+ 5.4 \pm 1$	4.00216	4.00128	4.002				
3	Lithium	Li	6	8.3	$+24.0 \pm 0.5$	6.0145	6.930	6.940	s. S. 3			
		Li	7	91.7						$+21.0 \pm 0.9$	7.0146	
4	Beryllium	(Be)	(8)	(ca. 0.05?)	—	—	—	9.02				
		Be	9	99.95	$+17.2 \pm 0.7$	9.0155	9.0135					
5	Bor	B	10	20.6	$+13.5 \pm 1.5$	10.0135	10.803	10.82				
		B	11	79.4						$+10.0 \pm 1.5$	11.0110	
6	Kohlenstoff	C	12	99.0	$+ 3.0 \pm 1$	12.0036	12.011	12.00	nach Aston er-giebnsich 12.008 s. S. 3			
		C	13	~ 1						—	—	
7	Stickstoff	N	14	99.7	5.7 ± 2	14.008	14.008	14.008				
		N	15	0.3						—	—	
8	Sauerstoff	O	16	99.8	0.00	16.0000	16.0000	16.0000	s. S. 4			
		O	17	0.03						—	—	
		O	18	0.16						$+ 3.6 \pm 0.1$	18.0065	
9	Fluor	F	19	100	0.0 ± 1	19.0000	18.996	19.000				
10	Neon	Ne	20	90.0	$- 1.6 \pm 0.5$	19.9967	20.189	20.183	s. S. 4			
		Ne	21	0.27						—	—	
		Ne	22	9.73						$- 2.4 \pm 0.5$	21.9947	
11	Natrium	Na	23	—	—	—	22.997					
12	Magnesium	Mg	24	(ca. 78) ³⁶⁾	—	—	—	24.32				
		Mg	25	(ca. 11)	—	—	—					
		Mg	26	(ca. 11)	—	—	—					
13	Aluminium	Al	27	—	—	—	26.97					
14	Silicium	Si	28	89.6	geschätzt zu -6.5 ± 1.0	—	28.122	28.06	s. S. 4			
		Si	29	6.2								
		Si	30	4.2								
15	Phosphor	P	31	100	-5.6 ± 1.5	30.9825	30.976	31.02				
16	Schwefel	S	32	(ca. 97)	—	—	—	—				
		S	33	(ca. 0.8)	—	—	—	32.06				
		S	34	(ca. 2.2)	—	—	—	—				
17	Chlor	Cl	35	ca. 75	-4.8 ± 1.5	34.983	—	—				
		Cl	37	ca. 25						-5.7 ± 1.5	36.980	35.457
		(Cl)	(39)	sehr wenig?						—	—	—
18	Argon	A	36	0.330	(-6.6 ± 0.5)	(35.976)	39.948	39.944	s. S. 4			
		A	38	0.05						—	—	
		A	40	99.62						-7.2 ± 0.3	39.971	

³⁶⁾ Die in eckigen Klammern angegebenen Häufigkeiten sind nur Schätzungen.

Fortsetzung von Tabelle 1.

Ordnungszahl	Element	Symbol	Massen-Zahl	Häufigkeit in %	Packungs- Anteil	Einzel- atom- gewicht	Chemisches Atom- gewicht für O = 16		Bemerkungen	
							nach Ergeb- nissen der Isotopen- Forschung	Wert der Inter- nationalen Tabelle		
19	Kalium	K	39	ca. 95	—	—	—	} 39.096		
		K	41	ca. 5	—	—	—			
20	Calcium	Ca	40	97	} geschätzt zu —7			} 40.077	40.08	s. S. 5
		Ca	42	0.8						
		Ca	43	0.2						
		Ca	44	2.3						
21	Scandium	Sc	45	100	geschätzt zu —7	(44.968)	44.96	45.10		
22	Titan	Ti	46	b	—	—	—	} 47.90	s. S. 5	
		Ti	47	b	—	—	—			
		Ti	48	a	—	—	—			
		Ti	49	b	—	—	—			
		Ti	50	b	—	—	—			
23	Vanadin	V	51	—	—	—	—	50.95		
24	Chrom	Cr	50	4.9	—	—	} 52.005	52.01		
		Cr	52	81.6	—10 ± 3	51.948				
		Cr	53	10.4	—	—				
		Cr	54	3.1	—	—				
25	Mangan	Mn	55	—	—	—	—	54.93		
26	Eisen	Fe	54	[ca. 5]	—	—	—	} 55.84		
		Fe	56	[ca. 95]	—	—	—			
27	Kobalt	Co	59	—	—	—	—	58.94		
28	Nickel	(Ni)	(56)	< 1?	—	—	—	} 58.69	s. S. 5	
		Ni	58	ca. 65	—	—	—			
		Ni	60	ca. 35	—	—	—			
		Ni	61	> 1	—	—	—			
		Ni	62	> 1	—	—	—			
		(Ni)	(64)	< 1	—	—	—			
29	Kupfer	Cu	63	[ca. 70]	—	—	—	} 63.57		
		Cu	65	[ca. 30]	—	—	—			
30	Zink	Zn	64	50.4	—9.9	63.937	} 65.327	65.38		
		Zn	66	27.2	—	—				
		Zn	67	4.0	—	—				
		Zn	68	17.8	—	—				
		Zn	70	0.4	—	—				
31	Gallium	Ga	69	[ca. 67]	—	—	—	69.72		
		Ga	71	[ca. 33]	—	—	—			
32	Germanium	Ge	70	21.2	} geschätzt zu —9.7		} 72.57	72.60		
		Ge	72	27.3						
		Ge	73	7.9						
		Ge	74	37.1						
		Ge	76	6.5						
33	Arsen	As	75	100	—8.8 ± 1.5	74.934	74.918	74.91		

Fortsetzung von Tabelle 1.

Ordnungszahl	Element	Symbol	Massen-Zahl	Häufigkeit in %	Packungs-Anteil	Einzelatomgewicht	Chemisches Atomgewicht für O = 16		Bemerkungen
							nach Ergebnissen der Isotopen-Forschung	Wert der Internationalen Tabelle	
34	Selen	Se	74	0.9	--	—	} 78.95	78.96	
	„	Se	76	9.5	--	—			
	„	Se	77	8.3	--	—			
	„	Se	78	24.0	(—8.0)	(77.938)			
	„	Se	80	48.0	—7.3 ± 2	79.941			
	„	Se	82	9.3	—	—			
35	Brom	Br	79	50.0	—9.0 ± 1.5	78.929	} 79.910	79.916	
	„	Br	81	50.0	—8.6 ± 1.5	80.926			
36	Krypton	Kr	78	0.42	—9.4 ± 2	77.926	} 83.76	83.7	
	„	Kr	80	2.42	—9.1 ± 2	79.926			
	„	Kr	82	11.79	—8.8 ± 1.5	81.927			
	„	Kr	83	11.79	—8.7 ± 1.5	82.927			
	„	Kr	84	56.85	—8.6 ± 1.5	83.928			
	„	Kr	86	16.70	—8.2 ± 1.5	85.929			
37	Rubidium	Rb	85	75.0	} geschätzt zu —8.2		} 85.41	85.44	
	„	Rb	87	25.0					
38	Strontium	Sr	86	10	} geschätzt zu —8.2		} 87.64	87.63	
	„	Sr	87	6.6					
	„	Sr	88	83.3					
39	Yttrium	Y	89	—	—	—	—	88.92	
40	Zirkonium	Zr	90	a				} 91.22	s. S. 5
	„	Zr	91	d					
	„	Zr	92	c					
	„	Zr	94	b					
	„	Zr	96	e					
41	Niob	Nb	93	100	—8	92.926	92.90	92.91	s. S. 5
42	Molybdän	Mo	92	14.2	--	—	} 95.96	96.0	
	„	Mo	94	10.0	--	—			
	„	Mo	95	15.5	--	—			
	„	Mo	96	17.8	—	—			
	„	Mo	97	9.6	--	—			
	„	Mo	98	23.0	ca. —5.5	97.946			
	„	Mo	100	9.8	—5.5	99.945			
44	Ruthenium	Ru	96	5	} geschätzt zu —6		} 101.1	101.7	
	„	(Ru)	(98)	—					
	„	Ru	99	12					
	„	Ru	100	14					
	„	Ru	101	22					
	„	Ru	102	30					
45	Rhodium	Rh	103	—	--	—	—	102.91	s. S. 6
47	Silber	Ag	107	[ca. 55]	--	—	} 107.880		
	„	Ag	109	[ca. 45]	--	—			

Fortsetzung von Tabelle 1.

Ordnungszahl	Element	Symbol	Massen-Zahl	Häufigkeit in %	Packungs- Anteil	Einzel- atom- gewicht	Chemisches Atom- gewicht für O = 16		Bemerkungen	
							nach Ergeb- nissen der Isotopen- Forschung	Wert der Inter- nationalen Tabelle		
48	Cadmium	Cd	106	g	—	—	—	112.41	s. S. 6	
		„	Cd	108	h	—	—			—
		„	Cd	110	c	—	—			—
		„	Cd	111	d	—	—			—
		„	Cd	112	b	—	—			—
		„	Cd	113	e	—	—			—
		„	Cd	114	a	—	—			—
		„	Cd	115	i.	—	—			—
„	Cd	116	f	—	—	—				
49	Indium	In	113	[ca. 7]	—	—	—	114.76	s. S. 6	
		„	In	115	[ca. 93]	—	—			—
50	Zinn	Sn	112	1.07	—	—	118.70	118.70		
		„	Sn	114	0.74	—			—	
		„	Sn	115	0.44	—			—	
		„	Sn	116	14.19	—			—	
		„	Sn	117	9.81	—			—	
		„	Sn	118	21.48	—			—	
		„	Sn	119	11.02	—			—	
		„	Sn	120	27.04	—7.3±2			119.912	
		„	Sn	121	2.96	—			—	
		„	Sn	122	5.03	—			—	
„	Sn	124	6.19	—	—					
51	Antimon	Sb	121	56	} zwischen —7.3 u. —5.3	}	121.78	121.76		
		„	Sb	123					44	
52	Tellur	Te	122	2.9	} geschätzt zu —5	}	127.58	127.61		
		„	Te	123					1.6	
		„	Te	124					4.5	
		„	Te	125					6.0	
		„	Te	126					19.0	
		„	(Te)	(127)					—	
		„	Te	128					32.8	
„	Te	130	33.1							
53	Jod	J	127	100	—5.3	126.932	126.904	126.92		
54	Xenon	X	124	0.08	—	—	131.125	131.3		
		„	X	126	0.08	—			—	
		„	X	128	2.30	—			—	
		„	X	129	27.13	—			—	
		„	X	130	4.18	—			—	
		„	X	131	20.67	—			—	
		„	X	132	26.45	—			—	
		„	X	134	10.31	—5.3±2			133.929	
„	X	136	8.79	—	—					
55	Caesium	Cs	133	100	—5±2.0	132.933	132.90	132.91		

Fortsetzung von Tabelle 1.

Ordnungszahl	Element	Symbol	Massen-Zahl	Häufig- keit in %	Packungs- Anteil	Einzel- atom- gewicht	Chemisches Atom- gewicht für O = 16		Bemerkungen
							nach Ergeb- nissen der Isotopen- Forschung	Wert der Inter- nationalen Tabelle	
56	Barium	Ba	135	5.9	—	—	137.43	137.36	
		Ba	136	8.9					
		Ba	137	11.1					
		Ba	138	74.2					
57	Lanthan	La	139	100		—	138.91	138.92	
58	Cer	Ce	140	89		—	140.13	140.13	s. S. 7
		Ce	142	11					
59	Praseodym	Pr	141	100		—	140.91	140.92	
60	Neodym	Nd	142	36	geschätzt zu — 5 bei den leichten Erden, bis — 3 bei den schwereren, s. S. 8	—	143.5	144.27	s. S. 7
		Nd	143	11					
		Nd	144	30					
		Nd	145	5					
62	Samarium	Nd	146	18		—	150.1	150.43	s. S. 7
		Sm	144	3					
		Sm	147	17					
		Sm	148	14					
63	Europium	Sm	149	15		—	151.90	152.0	s. S. 7
		Sm	150	5					
		Sm	152	26					
		Sm	154	20					
64	Gadolinium	Eu	151	50.6		—	156.9	157.3	s. S. 7
		Eu	153	49.4					
65	Terbium	Gd	155	21		—	158.91	159.2	s. S. 7
		Gd	156	23					
		Gd	157	17					
		Gd	158	23					
66	Dysprosium	Gd	160	16		—	162.5	162.46	s. S. 7
		Tb	159	100					
		Dy	161	22					
		Dy	162	25					
67	Holmium	Dy	163	25		—	164.91	163.5	s. S. 7
		Dy	164	28					
		Er	166	36					
		Er	167	24					
68	Erbium	Er	168	30		—	167.15	167.64	s. S. 8
		Er	170	10					
		Tm	169	100					
69	Thulium	Yb	171	9		—	168.91	169.4	s. S. 8
		Yb	172	24					
		Yb	173	17					
		Yb	174	38					
70	Ytterbium	Yb	176	12		—	173.2	173.04	s. S. 8
		Cp	175	100					
		Cp	175	100					
		Cp	175	100					
71	Cassiopeium	Cp	175	100		—	174.91	175.0	s. S. 8

Fortsetzung von Tabelle 1.

Ordnungszahl	Element	Symbol	Massen-Zahl	Häufigkeit in %	Packungs- Anteil	Einzel- atom- gewicht	Chemisches Atom- gewicht für O = 16		Bemerkungen	
							nach Ergeb- nissen der Isotopen- Forschung	Wert der Inter- nationalen Tabelle		
72	Hafnium	Hf	176	c	—	—	—	} 178.6	s. S. 9	
		Hf	177	b	—	—	—			
		Hf	178	a	—	—	—			
		Hf	179	b	—	—	—			
		Hf	180	a	—	—	—			
73	Tantal	Ta	181	100	—4	180.928	180.89	181.4	der neue, von Hönigschmid auf chem. Wege bestimmte Wert ist ebenfalls 180.89; s. S. 9	
74	Wolfram	W	182	22.6	} geschätzt zu 0	—	} 183.94	184.0		
		W	183	17.3		—				
		W	184	30.2		—				
		W	186	29.9		—				
75	Rhenium	Re	185	38.2	—	186.981	186.20	186.31		
		Re	187	61.8	—1 ± 2					
76	Osmium	Os	186	1.0	—	—	} 190.29	191.5		
		Os	187	0.6	—	—				
		Os	188	13.6	—	—				
		Os	189	17.3	—	—				
		Os	190	25.1	—1 ± 2	189.98				
		Os	192	42.6	—1 ± 2	191.98				
80	Quecksilber	Hg	196	0.10	—	—	} 200.60	200.61		
		Hg	197	ca. 0.01	—	—				
		Hg	198	3.89	—	—				
		Hg	199	16.45	—	—				
		Hg	200	23.77	+0.8 ± 2	200.016				
		Hg	201	13.67	—	—				
		Hg	202	29.27	—	—				
		Hg	203	ca. 0.006	—	—				
		Hg	204	6.85	—	—				
81	Thallium	Tl	203	29.4	+1.8 ± 2	203.037	204.41	204.39		
		Tl	205	70.6	+1.8 ± 2	205.037				
82	Blei	(Pb) (203)	—	—	} geschätzt zu +1	—	} 207.15	207.22		
		Pb	204	1.52		—				
		(Pb) (205)	—	—		—				
		Pb	206	28.03		—				—
		Pb	207	20.40		—				—
		Pb	208	50.05		—				—
		(Pb) (209)	—	—		—				
(Pb) (210)	—	—	—							
83	Wismut	Bi	209	100	—	—	209.00	n. Aston scheint das chem. be- stimmte Atom- gew. zu hoch zu sein; s. S. 9		
90	Thorium	Th	232	—	—	—	232.12			
92	Uran	U	238	>97	—	—	—	238.14		