

Über die Entstehung der chemischen Elemente.

Von A. v. WEINBERG, Frankfurt a. M.

(Eingegeg. am 25/6. 1923.)

Vor zehn Jahren erschien im Juliheft des Philosophical Magazine eine Arbeit von Niels Bohr mit dem Titel „On the constitution of Atoms and Molecules“, mit der eine neue Epoche der Erkenntnis des Wesens der chemischen Elemente beginnt. Bohrs genialer Gedanke war, die Kerntheorie des Atoms, die auf Grund von Lenards Ideen von Rutherford 1911 entwickelt worden war¹⁾, mit der Planckschen Quantentheorie zu verbinden, die zur gleichen Zeit die wissenschaftliche Welt in Erregung versetzt hatte²⁾). Heute, nach einer nur 10 jährigen, dazu durch den Krieg beeinträchtigten Weiterentwicklung besitzen wir bereits ein umfangreiches Material von Berechnungen und Beobachtungen, die von Bohrs Theorie ihren Ausgang nehmen. Jedes neue Forschungsergebnis hat die Richtigkeit der Theorie bestätigt. Ihren ersten Triumph, der theoretischen Berechnung der empirischen Rydbergkonstanten in der Formel der Serienspektren, haben sich immer weitere angereiht. Das hervorragende Buch von Sommerfeld über „Atombau und Spektrallinien“³⁾ beschreibt in allgemein verständlicher Form die wichtigsten Tatsachen auf diesem Gebiete.

Kein Zweifel besteht heute mehr darüber, daß alle Atomarten aus Kernen gebildet sind, die in einer ununterbrochenen Reihenfolge die elektropositiven Ladungen e bis $92e$ tragen, und daß sie im einatomigen normalen Zustande von einer gleichen Anzahl 1 bis 92 bewegter Elektronen umgeben sind. Als in allen Einzelheiten gesichert kann heute nur das Bild des Wasserstoffatoms und bis zu einem gewissen Grade das des Heliumatoms gelten. Bei den andern Elementen stehen nur die wesentlichen Grundzüge der Konfiguration fest, daher muß man sich einstweilen mit einer Annäherung an die verwickelten Konfigurationen begnügen.

Als Führer durch die Modelle der Elektronenbahnen leistet das periodische System der Elemente gute Dienste, das darauf hinweist, daß in zwei Perioden von 8 Elementen, zwei Perioden von 16 und folgenden längeren Perioden sich Elemente ähnlichen Charakters, Homologe, ausbilden. Bahnbrechend war der Gedanke von Kossel¹⁾, diese Perioden um die Reihe der Edelgase zu gruppieren. Die Hauptschwierigkeit aber, die sich bisher einem klaren Verständnis des Periodensystems entgegenstellte, war folgende. Während die optischen Spektren der Elemente die Analogien homologer Elemente und ihrer Ionen vollkommen wiedergeben und sich von Periode zu Periode ändern, so daß ihr Bild mit dem der so verschiedenen chemischen Eigenschaften parallel läuft, ist dies bei den Röntgenspektren der Elemente keineswegs der Fall. Vielmehr fehlt hier jede Periodizität und in kontinuierlicher Reihenfolge folgen sich die Spektralerscheinungen.

Wiederum ist es Bohr gewesen, der hier Licht in die Verhaltinisse gebracht hat. Im Januar 1922 erschien in der Zeitschrift für Physik¹⁰) die Ubersetzung eines Vortrags, den Bohr in Kopenhagen gehalten hatte, mit dem Titel: „Der Bau der Atome und die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Elemente“, der großes Aufsehen erregte. Die Göttinger Physiker baten Bohr, ihnen seine Ideen eingehender darzulegen, und Bohr hielt eine Reihe von Vorträgen im September 1922 in Göttingen. Dies Ereignis wird den Zuhörern unvergesslich bleiben. Das periodische System, die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Elemente entwickelten sich klar aus einfachen Prinzipien. Ausgehend vom Modell des Wasserstoffatoms bauten sich die Bilder der Elektronenschwarme auf bis zum Uran. Ja man hätte auch die Eigenschaften noch schwererer Elemente ableiten können, wenn solche existenzfig wären.

Ein wichtiger Teil der Ausführungen wurde, soweit sie sich auf Röntgenspektren bezogen, kürzlich von Bohr und Coster veröffentlicht⁶⁾), während neuerdings Bohr über „Linienspektra und Atombau“ im Heinrich-Kayser-Heft der Annalen der Physik eingehender berichtet hat⁷⁾.

Der Verlauf der Elektronenbahnen im Innern der Atome, den uns die Röntgenspektren wiedergeben, ändert sich kontinuierlich, der Verlauf der neu hinzukommenden Elektronenbahnen, den wir aus Bogen- und Funkenspektren schließen können, periodisch.

Bohrs synthetische Methode führt zu dem neuen Bilde des periodischen Systems, das in Fig. 1 wiedergegeben ist. Beginnen wir mit dem Wasserstoffatom. Es besteht aus einem mit $+e$ geladenen Kern und einem durch Quantenregeln in bestimmten Bahnen gehaltenen unlaufenden Elektron. Denken wir uns nun, die Kernladung werde um $+e$ vergrößert, so muß das System imstande sein, ein weiteres Elektron einzufangen. Es läßt sich angeben, welche Bahn diesem Elektron im Normalzustande des Atoms zukommt, und zwar ist es eine einquantige Bahn, wie die des ersten Elektrons, deren Ebene gegen diese geneigt ist.

Nun stellen wir uns weiter vor, daß in dem so gewonnenen Modell des Heliumatoms die Kernladung wieder um $+e$ vermehrt wird. Wir stehen dann vor der Frage, was mit dem einzufangenden

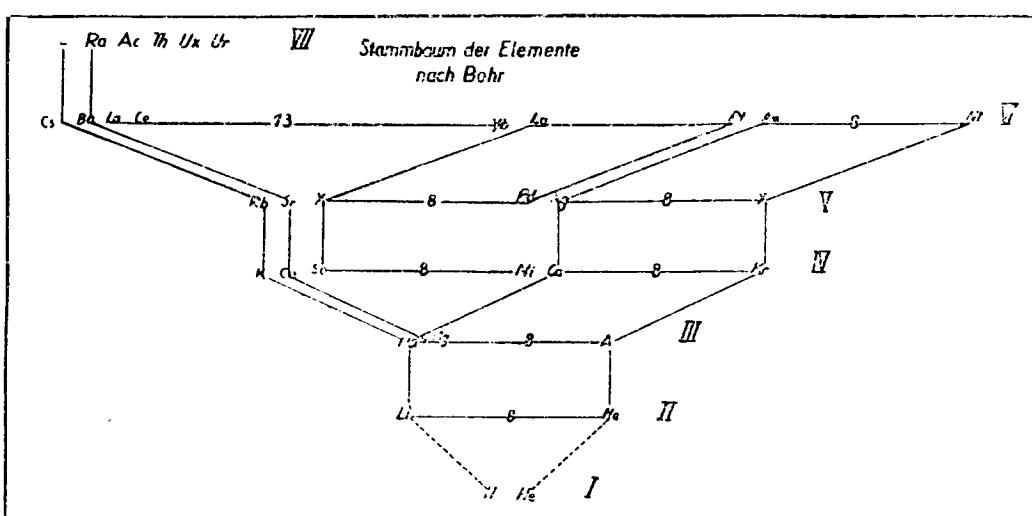


Fig. 1.

3. Elektron geschieht. Hierüber gibt das Lithiumspektrum Aufschluß. Es zeigt sich, daß das 3. Elektron nicht, wie man bisher annahm, eine äußere kreisartige Bahn beschreibt, sondern daß es sich in einer gestreckten zweiquantigen Ellipsenbahn bewegt, wobei es zeitweilig außerhalb der bisherigen Sphäre bleibt, und zeitweilig dem Kern wieder etwa so nahe kommt, wie die 2 ersten Elektronen auf ihren einquantigen Bahnen. Es ist dabei zu bemerken, daß die Ebenen der Elektronenbahnen um den Kern rotieren, so daß man richtiger von Bahnschlingen als von Bahnellipsen spricht. Doch wollen wir der Einfachheit halber letzteren Ausdruck hier beibehalten. Die Berechnung ergibt, daß das 3. Elektron im Lithiumatom nahezu 5 mal loser gebunden ist als die Elektronen im Heliumatom.

Indem wir uns nun die Ladung des Kerns weiter um + e steigert denken und die Bahnen der einzufangenden Elektronen verfolgen, gelangen wir zu Modellen von Beryllium und Bor mit 2 oder 3 zweiquantigen gestreckten Ellipsenbahnen, die vielleicht eine ebene Symmetrie, aber keine räumliche besitzen können, bis wir bei sechs Kernladungen und dem Hinzutritt des 6. Elektrons die räumlich vollendete Symmetrie des C-Atoms erreichen. In der schematischen Zeichnung Fig. 2 sehen wir die beiden innersten Elektronen Nr. 1 und 2 auf kreisähnlichen gegeneinander geneigten Bahnen, die Elektronen Nr. 2—6 auf gestreckten Ellipsenbahnen, die nach den Achsen a—d eines regulären Tetraeders gerichtet sind. Die Erörterung der interessanten Schlüsse, die sich aus diesem Kohlenstoffmodell ergeben, würde hier zu weit führen. Es sei nur be-

¹⁾ Phil. mag. 1911, 669.

²⁾ Annal. d. Phys. 1910, 758. Verh. d. D. phys. Ges. 1911, 138.

3. Aufl. Vieweg. 1922.

⁴⁾ Ztschr. f. Elektrochemie 1920, 314.

5) IX. 1.

⁶⁾ Ztschr. f. Phys. 1923, 342

²⁾ Annal. d. Phys. Mai 1923.

merkt, daß danach die Ionisierung nicht unüberwindliche Energiebeträge erfordern würde. Damit steht in Einklang, daß Aston mit Hilfe des Massenspektrographen in den Kanalstrahlen des Methans nicht nur Linien nahezu gleicher Stärke entsprechend Teilchen vom Molekulargewicht 13 (CH), 14 (CH₂), .15 (CH₃) und 16 (CH₄) erhielt, sondern stets auch eine dem Molekulargewicht 6 entsprechende Linie,

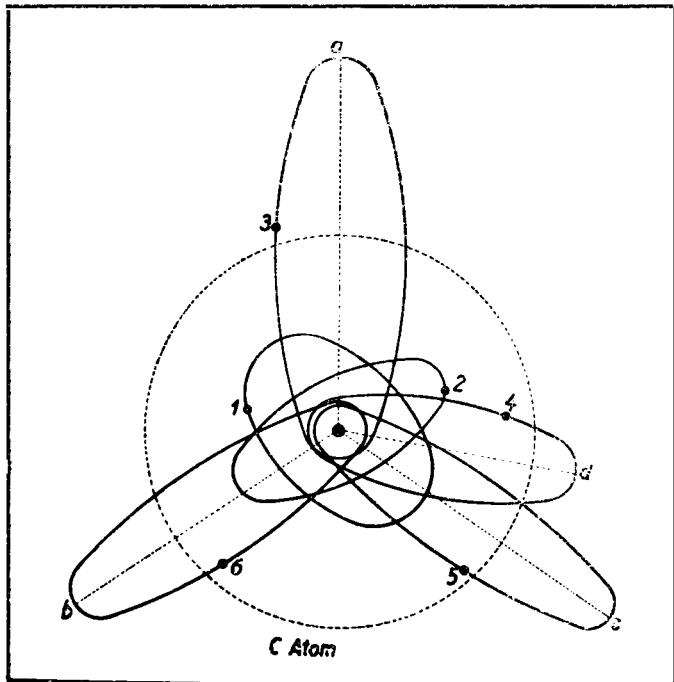


Fig. 2.

die nur von zweifach ionisierten Kohlenstoffatomen herführen kann.

Geht man nun mit der synthetischen Konstruktion weiter, so ergibt sich, daß bei zunehmender Kernladung die nächsten 4 hinzutretenden Elektronen infolge des Zusammenwirks der verschiedenen bahnbestimmenden Faktoren im Innern des Systems verlaufen. Die nächste Bahn würde schematisch etwa so verlaufen, wie die gestrichelte Linie in Fig. 2. Mit 4 solcher inneren Bahnen erhalten wir ein völlig symmetrisches Modell, das des Neons. Damit ist dann die erste Achterreihe, die Periode 2, vollendet.

Vergrößert sich jetzt wieder die Kernladung um + e, so beschreibt das 11. Elektron eine dreiquantige gestreckte Ellipsenbahn, die zu dem ganzen Komplex in analogem Verhältnis steht, wie die Bahn des 3. Elektrons im Lithium-Modell. Wir haben das Natrium vor uns. Nun schließen sich wieder 3 gestreckte Ellipsenbahnen an bis zum symmetrischen Silicium, dann 4 innere Bahnen bis zum symmetrischen Argon. Die so abgeschlossene 2. Achtergruppe, die Periode 3, ist homolog der Periode 2.

In der nächsten Periode 3 ergeben sich neue Verhältnisse. Zwar treten beim 19. und 20. Elektron, bei Kalium und Calcium wieder die gestreckten, diesmal vierquantigen Bahnen auf, dann aber tritt ein Moment ein, in dem die Stabilität innerer Bahnen größer ist, als die gestreckten Bahnen. Vom Scandium bis Nickel bildet sich das Innere des Elektronenbaus mit 8 Bahnen aus. Dann erst beginnt wieder eine dem Bilde der Perioden 2 und 3 entsprechende Bahnfolge, die Achtergruppe Kupfer bis Krypton. Im ganzen erhalten wir so die 4. Periode mit 18 Elementen.

Der gleichen Entwicklung wie bei der Periode 4 begegnen wir auch in der 5. Periode. Nach den zwei Elementen Rubidium und Strontium mit fünfqquantigen gestreckten Bahnen erfolgt ein innerer Ausbau von 8 Atomen vom Yttrium bis zum Palladium, worauf dann die normale Ausbildung einer Achtergruppe vom Silber bis Xenon einsetzt. Neue Verhältnisse treten uns dann bei der 6. Periode entgegen. Sie beginnt zwar wieder mit zwei normalen, diesmal sechsquantigen gestreckten Bahnen von Caesium und Barium, dann aber beginnt ein ziemlich verwickelter innerer Ausbau der Elektronenkonfiguration vom Lanthan bis Platin, worauf sich dann vom Gold bis Niton der normale Ausbau einer Achtergruppe anschließt. Die letzte 7. Periode beginnt mit einem Aufbau, der auf Analogien mit der 6. Periode schließen läßt.

Ich muß mich auf diese Andeutungen beschränken. So unvollständig sie auch sind, besonders wegen der Fortlassung der zweiten radialen Quantenbedingung, werden sie doch für das Verständnis der

weiteren Ausführungen genügen. Soviel kann heute schon gesagt werden, daß Bohrs synthetischer Stammbaum der Elemente an die Stelle der bisher aufgestellten tabellarischen Darstellungen des periodischen Systems der Elemente treten wird, und daß die Theorien planarer konzentrischer Elektronenringe oder kugelförmiger Elektronenschalen, wie auch die ebenso phantastievolle wie unwahrscheinliche Zellentheorie von Langmuir als überwunden gelten können. Für den Chemiker ist die Tatsache von besonderer Bedeutung, daß die Atome auch im normalen, nicht angeregten Zustand nicht etwa starre neutrale Gebilde sind, daß sich ihre innere Konstellation vielmehr in gleichmäßigen Wechsel ändert. Hierdurch erklärt es sich, daß bei vielen Elementen relativ kleine Energiebeträge äußerer Felder ausreichen, um einzelne Elektronen aus dem Verbande abzustoßen und daß wiederum zahlreiche andere Elemente, obwohl die Summe der elektrostatischen Ladungen = 0 ist, noch Elektronen addieren können, daß sie, wie man sagt, Elektronenaffinität besitzen. Auch die eigentliche chemische Affinität beruht, wie sich hieraus schließen läßt, auf der Dynamik der Bewegungen von Elektronen und Kernen. Die meist in den Vordergrund gestellte Ionenaffinität ist nur ein, wenn auch häufiger Spezialfall. Auch die Vorstellung von Restvalenzen neutraler Körper wird durch die Parallele mit der kinetischen Ursache der Elektronenaffinität neutraler Atome geklärt.

Es ist klar, daß das Bohrsche System den sukzessiven Atomaufbau, und nicht etwa die Entstehungsgeschichte der Atome wiedergeben soll. Es wäre auch ganz undenkbar, daß in einem fertigen Atom sich plötzlich die Kernladung um + e vermehrt und dann ein Elektron irgendwoher eingefangen wird. Bohrs Absicht war lediglich, die schrittweisen und periodenweisen Verschiedenheiten der Elemente theoretisch zu entwickeln. Will man versuchen, sich ein Bild über die mögliche Entstehung von Atomen zu machen, so muß man auf die bisher erkannten Fundamente zurückgehen. Als Grundbestandteile der Atome seien wir zunächst den Wasserstoffkern und das Elektron an. Nach dem Stand unserer Erkenntnis sind sie mit folgenden Eigenschaften ausgestattet. Gemeinsam ist beiden die Fähigkeit, Gravitationsfelder zu erzeugen und zugleich der Wirkung äußerer Gravitationsfelder zu folgen. Nur quantitativ ist diese aktive und passive Befähigung der beiden Urbestandteile verschieden, jedoch keineswegs so fundamental, wie es die Physiker hinstellen. Die Ruhmasse eines Wasserstoffkerns entspricht $1,649 \cdot 10^{-21}$ g, die des Elektrons $0,8996 \cdot 10^{-27}$ g. Das Verhältnis ist 1830:1 und nur etwa siebenmal größer als das zwischen dem Gewicht des Uran- und Wasserstoffatoms. Leider besteht aber noch der Mißbrauch, die Kerne als „Materie“ und die Elektronen als unwägbare „Elektrizitätsatome“ zu bezeichnen. Im Gegensatz zu der Gleichartigkeit der Gravitationswirkung steht die gegensätzliche Eigenschaft bei der Fähigkeit der Erzeugung elektrischer Felder. Die Kerne erzeugen das positive, die Elektronen das negative elektrische Minimalfeld.

Für die Vorstellung von ihrer Entstehung ist die Tatsache von Bedeutung, daß es gleichviele Wasserstoffkerne und Elektronen auf der Welt gibt. Man könnte annehmen, daß die Wahrscheinlichkeit der Entstehung beider Gebilde etwa aus einer den Raum erfüllenden Nernstschen Nullpunktsenergie gleich groß war, oder daß sich einst ein primäres Gebilde in zwei entgegengesetzten geladenen Teile gespalten habe. Wir wollen von solchen Hypothesen absehen und uns primär den Weltraum erfüllt denken von Kernen und Elektronen, die in großen Abständen unregelmäßig verteilt sind. Damit ist dann zunächst das universelle Schwerkraftfeld gegeben und wie wir sofort sehen werden, setzt die Bildung eines neutralen Atoms das Weltschwerefeld voraus. Es kann also nicht etwa ein Wasserstoffatom oder auch ein anderes Atom primär entstanden sein.

In Aufsätzen und Werken über das Rutherford-Bohrsche Atommodell kann man lesen, daß die Gravitation bei der Atomodynamik keine Rolle spielt. Allerdings ist auch die Schwerkraft zwischen Kernen und Elektronen verschwindend. Ihre Wirkung verhält sich zu der der elektrischen Anziehung zwischen Wasserstoffkern und Elektron wie $1:2,3 \cdot 10^{39}$. Wir dürfen aber nicht außer acht lassen, daß bei der Berechnung der Elektronenbahnen die gewöhnliche Mechanik zu Hilfe genommen wird, die Trägheit und Zentrifugalkraft voraussetzt. Diese aber kommt nur durch das Weltschwerefeld zustande und ist ohne dieses undenkbar. Daher die fundamentale Wichtigkeit der Gravitation für den Atombau.

Die Kerntheorie benutzt ferner die Coulombschen Gesetze der Anziehung und Abstoßung elektrischer Ladungen. Was diesen Gesetzen zugrunde liegt, ist völlig rätselhaft. Wir stellen sie als empirisch feststehende Tatsache in Rechnung.

Als dritte Voraussetzung der energetischen Beziehungen kommt die Quantentheorie hinzu. Sie besagt bekanntlich, daß bei Be-

wegungen materieller Punkte gegen das Weltschwerefeld, also insbesondere bei Oszillationen und Rotationen, die kinetische Energie der bewegten Punkte stets ein Ganzes, Vielfaches des Planckschen Minimal-Wirkungsquantums ist. Die Quantenbedingung kommt als etwas scheinbar von außen Diktiertes in das Atombild. Wir dürfen aber hoffen, daß es gelingen wird, diese Erscheinung als eine Folgerung aus den tieferen Ursachen der Gravitation und des elektrischen Feldes zu verstehen. Das Nebeneinander unserer sechs Grundbedingungen, der Existenz von Elektronen und Wasserstoffkernen, von Gravitation, positiven und negativen elektrischen Feldern und der Quantenregel hat für unser Kausalbedürfnis etwas sehr Unbefriedigendes. Die Aufgabe der Atomphysik wird es sein, die inneren Zusammenhänge aufzuklären.

Versuchen wir, mit diesem empirischen Rüstzeug verschen, dazu überzugehen, den Bau der Atomkerne zu analysieren, so stoßen wir schon beim Helium auf Schwierigkeiten. Man nimmt heute meist an, der Heliumkern habe sich aus 4 Wasserstoffkernen und 2 Elektronen gebildet, da er annähernd viermal soviel wiegt wie der Wasserstoffkern und nur 2 positive Ladungen trägt. Ein Beweis für eine solche Zusammensetzung liegt nicht vor.

Fragen wir zunächst, wie sich diese 6 Bestandteile vereinigt haben könnten, so geraten wir, wie wir immer die Reihenfolge wählen mögen, auf einen direkten Widerspruch mit dem Gesetz der gegenseitigen Abstoßung positiver Ladungen. Es bleibt nichts anderes übrig, als der Gültigkeit dieses Gesetzes eine Grenze zu setzen und tatsächlich existiert eine solche. Wir wissen, daß bei atomaren Entfernungen von der Größenordnung $1,10^{-10}$ cm das Coulombsche Gesetz noch exakt gilt. Aber höchstwahrscheinlich verwandelt es sich bei Abständen von einer Größenordnung, die der Kernausdehnung $1,10^{-13}$ cm nahe liegt, in sein Gegenteil. Wir werden noch sehen, wie Rutherford auf experimentellem Wege zu diesem Resultate kam. Diese Umkehrung des Coulombschen Gesetzes, wenigstens für positive Ladungen, bildet die Grundlage unserer Annahmen über die Entstehung aller zusammengesetzten Kerne.

Eine andere Schwierigkeit bei der Synthese des Heliumkerns liegt im Atomgewicht. Es ist bezogen auf Sauerstoff 4,00, während das des Wasserstoffkerns 1,008 ist. Daß der Wasserstoff nicht etwa aus verschiedenen Isotopen besteht, haben Stern und Vollmer⁹⁾ sowie Aston¹⁰⁾ nachgewiesen. Man hilft sich heute meist mit der Hypothese, daß bei der Bildung des Heliumkerns eine sehr bedeutende Energie-Ausstrahlung stattgefunden habe, und da nun nach Einstein jede Energiemenge E mit der Ruhmasse m nach der Gleichung $E = mc^2$ (c = Lichtgeschwindigkeit) zusammenhängen soll, sei die Abnahme des Atomgewichts erklärlich. Ich möchte nicht unterlassen zu bemerken, daß die Anwendbarkeit jener Gleichung, welche die Änderung gegen das Weltschwerefeld beschleunigter Massen richtig wiedergibt, auf die Ruhmasse keineswegs als bewiesen gelten kann. Bei dem Erklärungsversuch für das Helium-Atomgewicht handelt es sich sonach um eine Häufung von Hypothesen. Gewiß entspricht es dem menschlichen Hang zum Schematischen, auch das Helium in die Entwicklungsreihe der Elemente einzubeziehen, aber die Natur pflegt diese menschliche Neigung nicht immer zu teilen. Es ist sehr wohl möglich, und die überragende Bedeutung des Heliumkerns deutet entschieden darauf hin, daß in ihm ein eigenartiges von den anderen komplexen Kernen abweichendes Gebilde vorliegt.

Im wesentlichen aus Heliumkernen unter Hinzunahme einzelner Wasserstoffkerne bauen sich die weiteren Kerne auf. (Rutherford glaubte früher aus gewissen Erscheinungen schließen zu dürfen, daß ein Kernbestandteil vom Atomgewicht 3 existiere, doch hat er jetzt diese Annahme als irrig widerrufen.) Will man sich ein Bild der Kernbildungen machen, so kann man sich vorstellen, daß, sobald Wasserstoff- und Heliumatome mit einer großen, etwa der Lichtgeschwindigkeit nahen Geschwindigkeit aufeinander prallen, die Sphäre der Abstoßung von den Kernen überwunden, und das Bereich der Anziehung erreicht wird. Eine solche Annahme hat durchaus nichts Unwahrscheinliches, wenn man bedenkt, welche Energiemengen in den Kernen aufgespeichert sind, und daß aus den Kernen radioaktiver Elemente Elektronen mit 99 % der Lichtgeschwindigkeit und schwere Heliumkerne mit mehr als 7 % der Lichtgeschwindigkeit (über 20000 km/sec.) fortgeschleudert werden. Diese Theorie steht ferner mit der Tatsache im Einklang, daß die Atomgewichte — soweit es sich um einheitliche Isotope handelt — mit der Summe der Atomgewichte der sie zusammensetzenden Helium- und Wasserstoffkerne übereinstimmt, also ganzzahlig sind.

Die Atomgewichte stehen in keinem bestimmten Verhältnis zu den Kernladungen. Aus noch unerklärten Gründen nehmen die Kerne neutrale Wasserstoff- und Heliumatome auf. Wir wollen dies an Hand einer Tabelle näher erläutern. Zuvor aber müssen wir den Begriff des Hauptkerns und des Neutralteils des Kerns klarstellen. Zu diesem Zwecke werfen wir zuerst einen Blick auf die radioaktiven Elemente, von denen man 37 kennt. Sie entstehen bekanntlich aus dem Uran und dem Thorium, indem diese sukzessive Heliumkerne und Elektronen verlieren. Aus den Gesetzmäßigkeiten des Zerfalls zog L. Meitner den Schluß¹⁰⁾, daß die Kerne gebildet sind erstens aus Hauptteilen, die nur aus Helium- und wenigen Wasserstoffkernen zusammengesetzt, die Atomladung des Elements tragen und zweitens aus Neutralteilen, die aus neutralen Wasserstoff- und Heliumatomen bestehen. Dabei muß allerdings die durchaus verständliche Annahme gemacht werden, daß diese Atome in einem völlig veränderten, komprimierten Zustand angegliedert sind. Auf Grund der Theorie, daß die Heliumkerne oder α -Teilchen, teils aus dem Hauptkern, teils aus dem Neutralteil stammen, gelangt man zu einer einfachen Erklärung der Reihenfolge des Zerfalls und der radioaktiven Entstehung leichterer Elemente oder von Isotopen. Wir kommen hierauf noch zurück. Es liegt meines Erachtens kein Grund vor, diese Vorstellung auf die radioaktiven Elemente zu beschränken. Vielmehr erweist sie sich als ein leitender Gesichtspunkt für das Verständnis der Kerntheorie. Vor allem steht sie in vollem Einklang mit Rutherford's Versuchen der Zertrümmerung von Atomkernen. Rutherford ließ sehr rasch bewegte Heliumkerne, wie sie von RaC ausgeschleudert werden, auf die verschiedenen Atome einwirken, und es gelang ihm bei einer beschränkten Zahl von Atomen, bei B, N, F, Na, Al und P Wasserstoffkerne abzuspalten. Das nähere Studium der Weglängen und der Richtungen der Bewegung der Wasserstoffkerne ergab ein überraschendes Resultat. In der Schußrichtung waren die Weglängen teils kleiner, teils größer, als nach der Theorie des Stoßes zu erwarten war. Das merkwürdigste aber war, daß sich zahlreiche Kerne einer der Schußrichtung entgegengesetzten Richtung bewegten. Rutherford zog daraus den einzigen möglichen Schluß, daß die abgespaltenen Wasserstoffkerne vorher eine Rotation um einen zentralen Kern ausgeführt hatten. Er erläuterte dies durch die zwei Zeichnungen, die in Fig. 3 wiedergegeben sind.

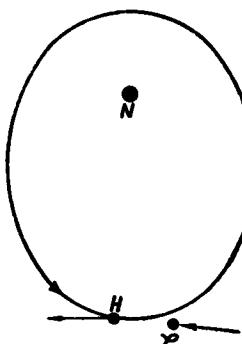


Fig. 3 a.

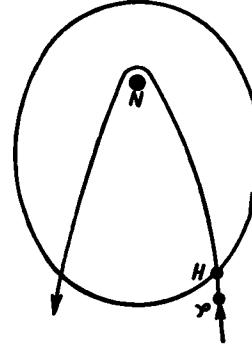


Fig. 3 b.

Die Zeichnung links betrifft den Fall, in dem das α -Teilchen den Wasserstoffkern nahezu tangential auf seiner Bahn trifft. Er fliegt dann etwa in der Richtung des α -Teilchens je nach seiner Rotationsrichtung mit langsamerer oder rascherer Geschwindigkeit weiter. Das Bild rechts zeigt den Fall, in dem der Wasserstoffkern in der Richtung auf den Hauptkern N (Nucleus) getrieben wird, er bewegt sich in einer Parabel um den Hauptkern und verläßt das Atom in einer dem Anprall des α -Teilchens nahezu entgegengesetzten Richtung. Bei der grundsätzlichen Bedeutung, welche die Theorie von Rutherford für unsere heutige Betrachtung hat, möchte ich seine eigenen Worte anführen. Er sagt¹¹⁾:

„Diese Erklärung setzt voraus, daß der positiv geladene Satellit von dem positiven Kern angezogen wird, wenn er diesem sehr nahe kommt. Eine solche Umkehrung des Vorzeichens tritt sehr wahrscheinlich bei kleinen Abständen vom Kern ein. Man könnte sonst nicht verstehen, wie ein Komplex positiv geladener Kerne zusammenhält.“

Die Interpretation der radioaktiven Übergänge durch Meitner, sowie diese Versuche von Rutherford und seine daraus gezogenen Schlüsse, bilden die Grundlage unserer Tabelle. Die erste Rubrik links enthält die Kernladungszahl, übereinstimmend mit der Zahl der unaufenden Elektronen. Es folgt die Rubrik mit der Bezeichnung

⁹⁾ Annalen d. Phys. 59, 225 [1919].

¹⁰⁾ Phil. Mag. 39, 621 [1920].

¹⁰⁾ Ztschr. f. Phys. 4, 146 [1921].

¹¹⁾ Artificial disintegration of the Elements. Journ. Chem. Soc. 1922, 400

der Elemente, dann die Anzahl der den Hauptkern bildenden Helium- und Wasserstoffkerne. Wie man sieht, unterscheiden sich die Elemente mit gerader und ungerader Ladung dadurch, daß bei letzteren ein Wasserstoffkern im Hauptkern vorhanden ist. Dies wird eine gewisse

Traum der Alchimisten verwirklicht sei, wird durch diese Interpretation allerdings zerstört.

Betrachten wir die Verwandlung von Uran (Atomgewicht 238) in Uranblei (Atomgewicht 206) nach achtmaliger Abgabe an Heliumkernen, so zeigt sich, daß von diesen acht Heliumkernen fünf aus dem Hauptkern und drei aus dem Neutralteil stammen. Dadurch erklärt es sich, daß einer Heliumabspaltung oder α -Strahlung in einzelnen Fällen zwei Elektronenverluste oder β -Strahlungen folgen, in anderen Fällen aber wieder α -Strahlung. Nur dann, wenn ein Heliumkern des Neutralteils das Atom verläßt, werden ihm die zugehörigen Elektronen folgen. L. Meitner hat in überzeugender Weise ausgeführt, wie sich so die ganze Reihe von Zerfallserscheinungen samt ihren wechselnden Zerfallzeiten erklärt.

Daß bei dem radioaktiven Zerfall des Urans keine Wasserstoffkerne frei werden, stimmt mit der Tatsache überein, daß die zwei Wasserstoffatome im Nebenkern des Urans noch ebenso im Nebenkern des Uranbleis vorhanden sind. Interessant ist auch die sich ergebende Möglichkeit, daß bei Umwandlungen sowohl Wasserstoff als auch Heliumkerne aus einem Neutralteil in den Hauptkern abgegeben werden könnten. Auf diese Weise würde sich erklären, daß es Umwandlungen ohne α - oder β -Strahlung gibt, wie der Übergang von Actinium in Radioactinium und von Mesothor I in Mesothor II.

Aus der Existenz des Neutralteils lassen sich auch für die Entstehungsgeschichte der Atome gewisse Schlüsse ziehen. Es ist danach unwahrscheinlich, daß sich etwa zuerst die verschiedenen Atomkerne gebildet, und diese dann ihre äußere Elektronenhülle eingefangen haben — ein Gedanke, auf den man leicht kommen könnte, wenn man Bohrs heuristischen

Aufbaukonstruktion als der Wirklichkeit entsprechend ansicht —, vielmehr hat es den Anschein, als habe ein Zusammenstoß, und darauf folgende Vereinigung von Helium- und Wasserstoffatomen stattgefunden, wobei einige Atome intakt, wenn auch deformiert, im Neutralteil blieben, andere völlig ionisiert den Hauptkern bildeten, während ihre Elektronen sich dann zum äußeren Elektronenschwarm vereinigten.

Einen weiteren Anhaltspunkt für die Entstehungsgeschichte der Elemente liefert die Tatsache, daß die in der Natur vorkommenden Gemische von Isotopen — soweit sie nicht durch radioaktiven Zerfall entstanden sind — stets die gleiche Zusammensetzung haben. Auch die sorgfältige Atomgewichtsbestimmung von Elementen in Meteoriten hat diese Regel bestätigt. Nun könnte man — und besonders dem Chemiker läge der Gedanke nahe — daran denken, daß es sich um ein Gleichgewicht handelt, das sich stets, falls etwa gestört, wieder herstelle. Das ist aber bei unserer Theorie des Kernbaues ausgeschlossen. Betrachten wir z. B. die Isotopen des Chlors, so besteht hier bei dem einen der Neutralteil aus zwei Wasserstoffatomen, bei dem anderen aus einem Heliumatom. Es kann also aus dem einen nie das andere entstehen. Man wird vielmehr zu der Annahme geführt, daß die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens der Bestandteile in bestimmten Phasen für die Zusammensetzung maßgebend gewesen sein muß, ähnlich wie etwa in der organischen Chemie bei dem Zusammentreffen zweier reagierender Stoffe verschiedene Isomere stets in einem bestimmten Verhältnis entstehen.

Diese Andeutungen mögen genügen, um zu zeigen, welch interessante Ausblicke die Verallgemeinerung der Meitnerschen Theorie gewährt.

Wenden wir uns zum Schluß zu der Frage, wieso es kommt, daß die Reihe der Elemente mit dem Uran abbricht, so gibt uns auch hierauf unsere Theorie eine befriedigende Antwort. Nach der auf Grund der Spektren von Bohr angestellten Berechnungen beruht die Stabilität des Elektronenaufbaus auf einer stufenweisen Entwicklung der Quantenbahnen. Ihr Fundament bilden die beiden innersten einquantigen Bahnen. Je höher die Ladung des Kerns wird, um so kleiner wird der Radius dieser innersten Bahnen, nicht nur wegen der vermehrten Anziehung des Kerns, sondern auch wegen der Zunahme der abstoßenden Wirkung der äußeren Elektronenhüllen mit der Zahl der Elektronen, die eine Verkleinerung der innersten Bahnen zur Folge hat. Nun hat Rosseeland¹³⁾ kürzlich berechnet, daß durch diese Einflüsse der Radius der einquantigen Bahnen auf die Größenordnung 1,10¹³ heruntergeht, wenn die Kernladung und

Fig. 4

Asymmetrie bedingen, und so finden wir denn, daß die Elemente von symmetrischer Struktur wie die Edelgase oder Kohlenstoff gerade Nummern haben. Es folgt die Rubrik der neutralen Nebenkerne, sodann die der Zahlen der Atomgewichte der reinen Isotopen, die auf Vollständigkeit keinen Anspruch macht¹²⁾, und schließlich die Reihe der empirischen Atomgewichte.

Wir erkennen vor allein, daß die Erscheinung der Isotopie von der Möglichkeit kleiner Verschiedenheiten in der Addition neutraler Atome herrührt. Der Charakter des Elements ist lediglich bedingt von der Konfiguration der Elektronenbahnen, die wiederum von der Ladung des Hauptkerns abhängen. Der Nebenkern ist ein neutraler, in gewissen Grenzen variabler Ballast. Bei dem Hergange seiner Addition handelt es sich jedenfalls um zweierlei Einflüsse. Die Hauptrolle spielen Ladung und Masse. Wir sehen deutlich, daß bei den Anfangselementen bis zum 18., dem Argon, nur ein bis zwei Wasserstoffatome aufgenommen werden. Dann folgen bis zum 30. Element, dem Zink, Kerne, die höchstens ein Heliumatom enthalten, die Anzahl der Heliumatome steigt dann auf zwei, drei usw. ziemlich gleichmäßig bis zu dreizehn. Zugleich werden meist auch ein bis drei Wasserstoffatome addiert. Es ist bemerkenswert, wie selten die Zahl drei vorkommt. Außer Masse und Ladung muß aber noch ein anderes unbekanntes Moment in Betracht kommen, das die Addition beeinflußt und die Unregelmäßigkeiten in der Anstiegskurve der Atongewichte verursacht.

Die Zahl der Elemente, deren Kern nur aus Heliumkernen gebildet wird, ist klein. Es sind dies nur die folgenden acht Elemente (bzw. Isotope). Die Zahl der Heliumkomponenten ist in Klammern beigefügt:

C(3 He), O(4 He), Ne(5 He), Mg(6 He), Si(7 He), S(8 He), A(9 He), Ca(10 He). Nach dem Calcium kennen wir kein Element, dessen Kern nicht zu-

gleich einen Neutralteil enthielte. Aus der Neutralteiltheorie lassen sich wichtige Schlüsse ziehen. Die Elemente, aus denen Rutherford Wasserstoff abspalten konnte, nämlich B, N, F, Na, Al und P sind alles Elemente, die bei relativ niederein Atomgewicht Wasserstoffatome im Neutralteil besitzen. Es ist verständlich, daß hier die Wasserstoffabspaltung am leichtesten gelingen muß. Danach ist anzunehmen, daß es sich bei Rutherford's Versuchen um eine künstliche Bildung von Isotopen handelt, also von Modifikationen des gleichen Elements und nicht um Überführung eines Elements in ein anderes. Die Illusion, daß hier endlich ein alter

¹²⁾ Eine Zusammenstellung s. Abt. A des Aprilhefts 1923 der Berichte d. D. chem. Ges. und Ztschr. f. angew. Chem. 1923, 222.

¹³⁾ Nature, März 1923. Bohr, Annal. d. Phys., Heinrich-Kayser-Heft 1923, 266.

Elektronenzahl denen des Urans entsprechen. $1,10^{-13}$ ist aber die Größenordnung der Kerne selbst. Jede weitere Vermehrung der Ladung und Elektronenzahl über das Uran hinaus würde daher zur Folge haben, daß die inneren Elektronenbahnen in der Sphäre des Kerns verlaufen würden. Hier liegt daher die Grenze der Existenzmöglichkeit von Atomen.

Aber noch eine Frage auf diesem Gebiete wird durch unsere Theorie einer möglichen Lösung zugeführt. Mit Recht hat man die Frage aufgeworfen, wie es denn denkbar ist, daß überhaupt heute noch radioaktive Elemente existieren. Nun bedarf es — wie eben dargelegt wurde — damit eine Kollision zustande kommt, der Mitwirkung der Elektronenhülle, welche die innersten Elektronen dem Kern zutreibt. Bei bestimmten Konstellationen reicht beim Uran die Summe der Kräfte gerade aus, um einen Einbruch des Elektrons in die Kernsphäre zu verursachen. Man kann sich vorstellen, daß dadurch eine Störung des Kerns, und der Beginn des Zerfalls bewirkt wird. Tritt die hierzu erforderliche Konstellation der äußeren Elektronen nur selten ein, so wird die Zerfallzeit eine lange sein, tritt sie häufig ein, so kann die Zerfallzeit sehr klein werden. Nun wissen wir, daß die Atome bei hohen Temperaturen einen oft sehr bedeutenden Verlust an äußeren Elektronen erleiden, daß sie stark ionisiert werden. Ein derartiger Zustand der Atome besteht z. B. wie Saha¹⁴⁾ nachgewiesen hat, bei vielen Atomen, deren Spektren wir in den leuchtenden Sternen beobachten. Denken wir uns nun das Uran einer Anzahl seiner äußeren Elektronen beraubt, so würde damit die Wirkung der Hülle auf die innersten Bahnen verringert, diese also ein wenig erweitert werden. In einem Grenzfall, wie dem vorliegenden, dürfte dies gerade genügen, um die Kollision zu vermeiden. Daraus würde folgen, daß das stark ionisierte Uranatom beständig ist und daß erst, wenn bei abnehmender Temperatur die Elektronenzahl 92 annähernd erreicht ist, der radioaktive Zerfall beginnt. Ein solcher Moment müßte dann eingetreten sein, als auf der erkaltenden Erde die Uranminerale kristallisierten, also, wie ihr Gehalt an Uranblei zeigt, vor etwa einer Milliarde Jahren.

Ehe man in der Lage war, sich auf Grund der Bohrschen Theorie ein Bild dieser Erscheinungen zu machen, haben verschiedene Physiker¹⁵⁾ die Hypothese verteidigt, daß Uran deshalb noch vorhanden sei, weil es sich stets von neuem bilde, es sei überhaupt der Ausgangspunkt für alle anderen Elemente, die daraus in sehr langen Zeiträumen durch radioaktiven Zerfall entstanden seien. Mit Recht bezeichnet Aston¹⁶⁾, gestützt auf seine Untersuchungen, diese Hypothese als „aussichtslos und irreführend“. Der Chemiker, an die Synthese des Komplizierten aus dem Einfachen gewöhnt, wird nicht im Zweifel sein, welcher Theorie er dem Vorzug geben soll, wenn er die Wahl hat zwischen dem geschilderten Aufbau der Atome aus Wasserstoff- und Heliumatomen und dem Abbau aus Uran oder gar einem hypothetischen Überuran. Durch die synthetische Auffassung ist heute der Weg zu einer Entstehungsgeschichte der Atome geöffnet.

[A. 157.]

Der Chlorgehalt der synthetischen Salzsäure.

Von Prof. Dr. B. NEUMANN, Breslau.

Mitteilung aus dem Institut für chem. Technologie der Technischen Hochschule Breslau.

(Eingeg. am 11.5. 1923.)

Seit einigen Jahren ist synthetische Salzsäure im Handel; sie wird in Deutschland von verschiedenen chemischen Firmen hergestellt, auch in England wird synthetische Salzsäure erzeugt.

Die Vereinigung von Chlor und Wasserstoff zu Chlorwasserstoffgas läßt sich, wie jedem Chemiker aus der Vorlesung über Experimentalchemie bekannt ist, dadurch zustande bringen, daß man eins dieser beiden Gase in dem anderen brennen läßt. Apparaturen zur Ausführung solcher Versuche sind beschrieben in Heumann, „Anleitung zum Experimentieren“, 1904, S. 315, ebenso in Arendt-Dörmers, „Technik der anorganischen Experimentalchemie“, 1910, S. 527. Es läßt sich danach sowohl Wasserstoff in Chlor wie umgekehrt Chlor in Wasserstoff verbrennen. Kürzlich hat auch F. Förster¹⁷⁾ eine einfache Vorlesungsapparatur angegeben, durch welche Wasserstoff in Chlor verbrannt wird. Dabei kann leicht „völlig farbloses, nur wenig unverbrannten Wasserstoff enthaltendes Chlorwasserstoffgas, und von unverbrauchtem Chlor ganz freie Salzsäure erhalten“ werden.

Die Vorschläge zur technischen Durchführung dieser Art der Vereinigung von Wasserstoff mit Chlor begannen 1903 mit einem Amer. Pat. 779 998 von W. T. Gibbs, welcher beide Gase getrennt in eine kleine erhitzte Kammer, die zu zwei Dritteln mit feuerfestem Material gefüllt ist, leitet, wo die Entzündung und Umsetzung stattfindet. Bei schwachem Wasserstoffüberschub verläuft die Verbrennung explosionslos, ist vollständig und liefert eine chlorfreie Salzsäure. In dem darauf folgenden D. R. P. 194 947 vom Jahre 1905 von J. L. Roberts wird allerdings behauptet, daß in der angegebenen Weise nach dem Gibbschen Verfahren „reine Salzsäure keinesfalls direkt erhalten werden kann“. Das Verfahren von Roberts beweckt „die Herstellung von Salzsäure aus molekularen oder ungefähr molekularen Mengen von Chlor und Wasserstoff in der Weise, daß die Gase durch besondere Rohre einem Verbrennungsraum zugeführt werden, in welchem sie unmittelbar nach dem Zusammentritt durch Entzündung zur Vereinigung gelangen“. „Die Flamme schlägt dann (nach der Entzündung) sofort zurück nach dem Vereinigungspunkt beider Gase, welche ruhig und gleichmäßig zu Salzsäure verbrennen.“ „Es vereinigen sich daher bei vorliegenden Verfahren beide Gase vollständig, so daß die neu dargestellte Salzsäure weder freien Wasserstoff noch freies Chlor enthält.“

Auf die Vorschläge, die Vereinigung von Wasserstoff und Chlor mit Hilfe von Kontaktsubstanzen auszuführen, wird hier nicht eingegangen; vgl. hierzu die Arbeit von B. Neumann²⁾: „Die explosionslose Vereinigung von Chlor und Wasserstoff zu Salzsäure mit Hilfe von Kontaktsubstanzen“, wo auch die entsprechende Literatur angegeben ist.

Nach Angabe von G. Levi und Migliorini³⁾ (1907) soll damals in französischen Chloralkaliwerken der Wasserstoff in besonderen Brennern in einer Chloratmosphäre verbrannt, und die entstandene chlorhaltige Salzsäure in die Anodenzenellen zur Verhinderung der Hypochloritbildung und zum Zwecke der Stromersparnis eingeleitet werden sein. Villani⁴⁾ empfiehlt ebenfalls einen besonderen Brenner (großes Glasgefäß), in welchem vom Boden Chlor und ebenso Wasserstoff mit Luft eingeführt wird. Der Wasserstoff brennt in Chlor und es entsteht Salzsäure, allerdings mit einem unvermeidlichen Chlorfiberschusse. Explosionsgefahr ist dabei nicht zu verhindern. Levi und Migliorini bemühten sich deshalb, bessere Brenner zu konstruieren; sie füllten einen Glasbehälter mit Wasserstoff, ließen zwischen Platindrähten einen Induktionsfunken übergehen und leiteten Chlor ein. Dieses entzündet sich sofort und brennt ruhig im Wasserstoff, wenn genügend ($\frac{1}{4}$) Überschub davon vorhanden ist; die Salzsäure ist rein.

Der Vorschlag der Funkenzündung findet sich auch sonst wieder, und zwar vor und nach der Angabe von Levi und Migliorini. Die Soc. Ital. di Elettrochimica (Ital. Pat. 73 737) wollte 1904 schon reine synthetische Salzsäure dadurch herstellen, daß sie gleiche Volumina Wasserstoff und Chlor, durch Kolbenhub in einen Zylinder einsaugt, das Gasgemisch durch Funken zündet, und das salzsäure Gas wieder herausdrückt, welches dann in Kondensationstürmen zur Absorption kommt. Eine ähnliche Idee verfolgt Baumann im D. R. P. 301 303 (1916), der ebenfalls molekulare oder nahezu molekulare Mengen Chlor und Wasserstoff in einem Explosionsmotor, eventuell unter Zunischung von Salzsäuregas zu dem Gasgemisch (D. R. P. 305 306), durch Funken zur Entzündung bringt.

Waldesbühl hat (Schweiz. Pat. 77 537) vorgeschlagen, zur gefahrlosen Verbrennung das Chlor mit großem Wasserstoffüberschub unter Druck durch ein poröses Diaphragma zu drücken und dann die Entzündung durch glühendes Platin oder Kohle zu bewirken.

A. Engelsdorf (Amerik. Pat. 1 112 910 [1914]) führt die Gase in eine Verbrennungskammer, in welcher die notwendige Temperatur durch Verbrennen von Wasserstoff mit Luftsauerstoff erzeugt wird. Die Zündung des Wasserstoffs erfolgt durch Funken. Da also ein Teil des Wasserstoffs mit Sauerstoff zu Wasser verbrennt, weiter ein anderer Teil Wasserstoff als Überschub vorhanden sein muß, so kann nur ein Teil des Elektrolytchors auf diese Weise verarbeitet werden. Es entweichen Chlorwasserstoff, Wasserstoff und Wasserdampf aus der Kammer, die zur Kondensation durch eine Kühlslange gehen.

Die Badische Anilin- und Soda-Fabrik (Engl. Pat. 525 206 [1920], D. Prior [1919]) will die Zündung des Gasgemisches an der Stelle des Zusammentreffens der Gase durch eine Zündflamme, die vorzugsweise durch Chlor und Wasserstoff gespeist wird, vornehmen. E. Nicoli (Franz. Pat. 522 754 [1920]; Engl. Pat. 159 869 [1921]) verwendet bei der Verbrennung von Wasserstoff in Chlor eine ständig brennende Sicherheitsflamme (brennender Wasserstoff).

¹⁴⁾ Ztschr. f. Phys. 5, 40 [1921].

¹⁵⁾ z. B. van den Broek, Harkins, Kohlweiler, Nernst.

¹⁶⁾ Ztschr. f. Elektroch. 1923, 64.

²⁾ Ztschr. f. angew. Chem. 18: 21, 613.

³⁾ Gazz. Chim. Ital. 37, 122 [1907].

⁴⁾ Soda caustica, Milano 1904, 33.