

# DIE NATURWISSENSCHAFTEN

WOCHENSCHRIFT FÜR DIE FORTSCHRITTE DER NATURWISSENSCHAFT, DER MEDIZIN UND DER TECHNIK

HERAUSGEGEBEN VON

DR. ARNOLD BERLINER UND PROF. DR. AUGUST PÜTTER

Achter Jahrgang.

5. März 1920.

Heft 10.

## Betrachtungen zu Rutherfords Versuchen über die Zerspaltbarkeit des Stickstoffkerns.

Von W. Lenz, München.

### 1. Einleitung.

Bekanntlich ist es Rutherford kürzlich gelungen zu zeigen, daß der Stickstoffkern beim Auftreffen schneller  $\alpha$ -Strahlen zerspalten wird<sup>1)</sup>. Dieser Nachweis gelang durch den vom Entdecker vorausgesehenen günstigen Umstand, daß beim Durchgang von  $\alpha$ -Strahlen durch Stickstoff eine allerdings sehr geringe Menge einer neuen Art von  $\alpha$ -Strahlen entsteht, deren Reichweite viermal so groß ist als die Reichweite der ursprünglichen  $\alpha$ -Strahlen des RaC, nämlich in atmosphärischer Luft 28 cm gegen 7 cm. Die gleiche Erscheinung tritt auf, wenn die  $\alpha$ -Strahlen durch reinen Wasserstoff geschickt werden; es entstehen wiederum  $\alpha$ -Strahlen von 28 cm Reichweite, die nach Ausweis von Ablenkungsversuchen aus schnellbewegten Wasserstoffkernen bestehen. Da sich im Falle des Stickstoffs durch Einführung von Wasserstoff (in Form von Wasserdampf) leicht zeigen ließ, daß solche künstliche Verunreinigung den Haupteffekt nur unwesentlich beeinflusst, so kann als sicher angesehen werden, daß die schnellen  $\alpha$ -Strahlen ihre Entstehung dem Stickstoff verdanken. Beim Vergleich mit dem Effekt in reinem Wasserstoff liegt im Hinblick auf die abnorm hohe Reichweite der Schluß nahe, daß die in Stickstoff entstehenden hochgeschwindigen  $\alpha$ -Strahlen schnell bewegte Wasserstoffkerne sind, während die  $\alpha$ -Strahlen des RaC bekanntlich in schnellen Heliumkernen bestehen.

Für eine theoretische Betrachtung ist an Rutherfords fundamentaler Entdeckung vor allem der Umstand wichtig, daß der Wasserstoffkern beim Kernaufbau eine wesentliche Rolle spielt. Es ist dadurch die Rückkehr zur Proutischen Hypothese nahegelegt, die ja bekanntlich aus der vermeintlichen Ganzzahligkeit der Atomgewichte einen Aufbau aller Elemente aus Wasserstoff folgerte. Dies entspricht der früher schon von Rutherford besonders in bezug auf den Heliumkern vertretenen Auffassung, den er sich aus 4 Wasserstoffkernen und 2 Elektronen aufgebaut denkt. Auch später zu besprechende theoretische Versuche von Harkins und Wilson<sup>2)</sup>, des Verfasser<sup>1)</sup>

und von Stern und Vollmer<sup>2)</sup> gründen sich auf diese Auffassung. Es ist in dieser Hinsicht belanglos, ob man sich wegen der Gruppierung der Atomgewichte um die Zahlen  $4n$  und  $4n+3$  die Kerne aus Helium- und Wasserstoffkernen aufgebaut denken will, da ja der Heliumkern selbst wieder als komplex anzusehen ist.

Von einer Theorie der Kernstruktur kann heute noch nicht die Rede sein. Man müßte von ihr verlangen, daß sie auf Grund der Annahme eines Aufbaus der Kerne aus Wasserstoffkernen und Elektronen vor allem die Abweichung der Atomgewichte von den Vielfachen des Wasserstoffs und die aus den Tatsachen der Radioaktivität und den Rutherfordschen Versuchen folgende Unbeständigkeit der Kerne erklärt. Von einem Verständnis der radioaktiven Erscheinungen sind wir noch weit entfernt. Dagegen vermögen wir hinsichtlich der Frage der Atomgewichte und, wie hier besonders ausgeführt werden soll, hinsichtlich der Frage der Unbeständigkeit der Kerne gegen äußere Einflüsse wenigstens plausible Angaben zu machen.

Hierzu setzt uns instand die Anwendung des aus der Relativitätstheorie folgenden Satzes von der Trägheit der Energie, der bekanntlich ganz allgemein besagt, daß gemäß der Beziehung „Masse = Energie/Quadrat der Lichtgeschwindigkeit“ jeder Energie, gleichgültig in welcher Form sie sich befindet, Masse zugeschrieben werden muß. Jede Änderung der Energie eines Körpers oder Systems etwa in Form von potentieller oder kinetischer Energie hat eine entsprechende Änderung seiner Masse zur Folge. Indem sich unsere Betrachtungen ganz wesentlich auf diesen Satz stützen, gewinnen sie neben der immerhin hypothetischen Annahme des Kernaufbaus aus Wasserstoffkernen eine Grundlage von großer Sicherheit. Die Beweiskraft unserer Überlegungen ist dagegen durch den Mangel ausreichender Kenntnis der in Frage kommenden experimentellen Daten sehr beeinträchtigt.

### 2. Die Frage der Atomgewichte.

Man kann nun versuchen, nach dieser relativistischen Beziehung zwischen Masse und Energie die Abweichung der Atomgewichte von der Ganzzahligkeit auf Energiedifferenzen der Kerne gegenüber dem Zustand völliger Trennung in Elementarkerne zu schieben. Überlegungen dieser Art wurden zuerst von Harkins und Wilson (l. c.)

<sup>1)</sup> Phil. Mag. 37, 1919, S. 537.

<sup>2)</sup> Zeitschr. f. anorg. Chemie 95, S. 1 und 20, 1916.

<sup>1)</sup> Sitz.-Ber. d. bayr. Akad. d. Wiss. Math.-phys. Kl. 1918, S. 355.

<sup>2)</sup> Ann. d. Phys. 59, 1919, S. 225.

angestellt. Tatsächlich erweisen sich die Atomgewichte der leichteren Elemente, etwa bis Fluor, mit Ausnahme von Be kleiner als die entsprechenden Vielfache des Wasserstoffkerns. Das würde in obiger Auffassung bedeuten, daß beim Aufbau dieser Kerne, ganz analog wie in der Bohrschen Theorie beim Aufbau des Atoms, Energie abgegeben worden ist. Die Masse der am Aufbau teilnehmenden Elektronen kann dabei, wie eine Überschlagsrechnung lehrt, vernachlässigt werden. Die Ausnahme bei Be, wie auch die zahlreichen Unstimmigkeiten bei den schwereren Elementen, können vielleicht ihren Grund im Vorhandensein von Isotopen haben.

Von Stern und Vollmer (l. c.) ist eine weitere Deutungsmöglichkeit angegeben und experimentell geprüft worden. Die Atomgewichte sind angenähert Vielfache von 1 und nicht von 1,0077, dem Atomgewicht des Wasserstoffs. Man könnte sich nun denken, daß das Atomgewicht des Wasserstoffs tatsächlich gleich eins ist und die Abweichung des beobachteten Atomgewichts dieses Elements von 1 durch Beimengung von Isotopen des Wasserstoffs vom Atomgewicht 2 bzw. 3 zustande kommt. Die experimentelle Prüfung zeigte jedoch, daß diese Annahme nicht zutrifft.

Eine theoretische Prüfung der Zulässigkeit der Erklärung mittels Energiedifferenzen wurde vom Verfasser (l. c.) und in ganz analoger Weise von Stern und Vollmer auf Grund der Quantentheorie durch Konstruktion einfachster Kernmodelle aus Wasserstoffkernen und Elektronen versucht. Der Gang der Überlegung möge hier kurz angedeutet werden. Das Bohrsche Modell wird in der Weise invertiert, daß die Elektronen als die ruhenden und die Wasserstoffkerne als die umlaufenden Ladungen betrachtet werden; die Kernmodelle wurden deshalb vom Verfasser als invertierte Bohrsche Modelle bezeichnet. Für den Heliumkern wird z. B. ähnlich dem Bohr-Debyeschen Wasserstoffmodell angenommen, daß um die Verbindungslinie zweier ruhender Elektronen in der Symmetrieebene 4 Wasserstoffkerne umlaufen. Die Durchrechnung dieses Modells nach der Quantentheorie liefert Dimensionen, die im wesentlichen im Verhältnis der Elektronenmasse zur Masse des Wasserstoffkerns gegen diejenigen des Bohr-Debyeschen Wasserstoffmodells verkleinert sind, d. h. sie liefert Abmessungen von der Größenordnung  $10^{-12}$  cm. Damit gelangt man also in die Größenordnung der von Rutherford<sup>1)</sup> und C. G. Darwin<sup>2)</sup> ermittelten oberen Grenzen der Kernabmessungen. Dagegen erweist sich die Differenz zwischen der Energie des Modells und derjenigen seiner Teile im Zustand völliger Trennung als viel zu klein, um die Differenz zwischen dem Atomgewicht des Heliums und dem vierfachen des Wasserstoffs erklären zu können. Dieses Ergebnis muß

jedoch nicht unbedingt in dem Sinn gedeutet werden, daß die quantentheoretische Modellauflösung falsch ist. Vielmehr hat man nach dem Versuch von Mie, Einstein und Weyl, die Elektrodynamik in das „Innere“ der Ladung fortzusetzen, allen Grund anzunehmen, daß das Coulombsche Gesetz und die gewöhnliche elektromagnetische Energieberechnung in den kleinen bei den Kernmodellen in Frage kommenden Entfernungen vom Ladungsmittelpunkt nicht mehr gilt. Es wäre durchaus möglich, daß die Schwierigkeiten sich hierdurch beheben ließen und die Kernmodelle ein wichtiges Anwendungsgebiet dieser erweiterten Elektrodynamik werden.

### 3. Die Frage der Beständigkeit der Atomkerne.

Da man bei unserer bisherigen Unkenntnis der Elektrodynamik im Kern bzw. Elektron in der Frage der Atomgewichte z. Zt. offenbar nicht weiterkommt, so wird man prüfen, ob sich aus unseren Grundannahmen nicht über die andere Hauptfrage, nämlich die der Beständigkeit der Atomkerne etwas aussagen läßt.

Nach dem Vorbilde des Ionisierungsvorganges der Atome wollen wir einen Kern dann gegenüber äußeren Einflüssen als beständig betrachten, wenn die zu seiner Trennung in einfachere Kerne erforderliche Energie größer ist als die Energie der  $\alpha$ -Strahlen des RaC, also größer als  $1,3 \cdot 10^{-5}$  erg. Dies ist, abgesehen von der ThC-Strahlung, der größte Energiebetrag, der praktisch zur Beeinflussung des Kerns zur Verfügung steht. Wegen der bekannten Beziehung zwischen Masse und Energie muß also nach dieser Festsetzung die Masse eines stabilen Kerns mindestens um  $1,3 \cdot 10^{-5} / 9 \cdot 10^{20} = 1,45 \cdot 10^{-26}$  g kleiner sein als die Summe der Einzelmassen der bei seiner Zerlegung entstandenen Kerne. In Bruchteilen der Einheit der Atomgewichtsskala ( $m_H = 1,64 \cdot 10^{-24}$  g) ausgedrückt, findet man für diesen Massenunterschied 0,009. Die Masse des Elektrons beträgt in dieser Einheit  $\mu = 0,0006$ .

Die Atomgewichtsbestimmungen besitzen leider nicht den Grad von Genauigkeit, wie er für die folgenden Überlegungen wünschenswert wäre; vielleicht vermag dagegen umgekehrt die Ausgestaltung des von Rutherford erschlossenen neuen Gebietes experimenteller Kernforschung uns instand zu setzen, auf Grund von Betrachtungen, wie sie im folgenden gegeben werden, die Atomgewichte mit einem bei chemischen Methoden heute nicht erreichbaren Grad von Genauigkeit zu berechnen. Nach Brauner<sup>1)</sup> und Guye<sup>2)</sup> darf man mit einer Ungenauigkeit von einigen Einheiten der letzten angegebenen Stelle setzen:

$$m_H = 1,00775$$

$$m_{He} = 4,002$$

$$m_C = 12,002$$

$$m_N = 14,010$$

<sup>1)</sup> In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie.

<sup>2)</sup> Journal de Chimie Physique 1916, S. 449, 1917, S. 60 und S. 208.

<sup>1)</sup> Phil. Mag. 27. 1914. S. 488.

<sup>2)</sup> Phil. Mag. 27. 1914. S. 499.

Der angegebene Wert für Helium stammt von Heuse. Es möge nun vorerst die Anwendung unserer Stabilitätsdefinition auf den He-Kern gemacht werden.

a) Beständigkeit des Heliumkerns.

Rutherford sagt<sup>1)</sup>, es sei weniger überraschend, daß der Stickstoffkern abgebaut wird, als daß der Heliumkern dabei der Zerstörung entgeht. Wir wollen diese Frage auf Grund der obigen Festsetzung prüfen. Die Differenz  $4m_H - m_{He} = 0,028$  übertrifft um ein Mehrfaches den obigen Mindestunterschied von 0,009. Der Heliumkern ist also als stabil zu betrachten, sofern eine vollständige Zerspaltung in Frage kommt. Über die Abspaltung eines Teilkerns kann unsere Rechnung zwar nichts aussagen, aber wegen des großen Massenunterschieds läßt sich doch verstehen, daß der Heliumkern tatsächlich auch gegenüber einer Beeinflussung der Teilkerne beständig ist. Diese Betrachtung findet sich in ganz analoger Weise bei Harkins und Wilson und dem Verfasser (l. c.).

Will man andererseits den Heliumkern nicht als komplex ansehen, so entsteht die Schwierigkeit, wie der Kern, z. B. des Sauerstoffs, der dann etwa aus 4 einfachen He-Kernen bestehend zu denken wäre, seinen Zusammenhalt finden soll. Man muß dann annehmen, daß die He-Kerne sich bei hinreichender Annäherung anziehen anstatt sich abzustößen und müßte so den polaren Charakter der Kerne z. T. aufgeben. Hierzu wird man sich, zum mindesten was die Wechselwirkung der Kerne betrifft, nicht ohne Not entschließen. Andererseits ist die Annahme einer komplexen Struktur des Heliumkerns nach dem Obigen sehr wohl zulässig und führt auch wegen der Anwesenheit der Elektronen ohne besondere Hilfsannahme auf die Möglichkeit des Zusammenhalts eines allein aus He-Kernen aufgebauten Kerns. Übrigens macht es Rutherford<sup>2)</sup> durch Untersuchung des Stoßvorganges zwischen He- und H-Kernen (Durchgang von RaC-Strahlen durch Wasserstoff) sehr wahrscheinlich, daß der He-Kern komplex ist. Ohne diese Annahme ist die von ihm experimentell festgestellte Tatsache nicht zu verstehen, daß die beim Stoß entstandenen schnellen H- $\alpha$ -Strahlen sich der Richtung des stoßenden  $\alpha$ -Teilchens vorzugsweise sehr eng anschmiegen und eine überraschend große Homogenität in den Geschwindigkeiten zeigen.

Mehr als die Frage der Stabilität interessiert naturgemäß diejenige der Unbeständigkeit. Wir können in Unkenntnis der näheren Umstände des Zerfalls zwar nicht angeben, ob in einem bestimmten Fall eine Zerspaltung eintritt, doch können wir dank der relativistischen Beziehung zwischen Masse und Energie wenigstens aus den Atomgewichtsbestimmungen, falls sie in hinreichender Genauigkeit auch für die Spaltprodukte vor-

liegen, folgern, ob die energetischen Voraussetzungen für den Zerfall jeweils vorliegen. Denn aus dem Energiesatz folgt nach dem Obigen, daß unter dem Einfluß der  $\alpha$ -Strahlen (des RaC) Unbeständigkeit nur bei solchen Umsetzungen eintreten kann, bei denen die Summe der nötigenfalls relativistisch korrigierten Massen der Endprodukte kleiner oder höchstens gleich ist der Masse des zu zersplattend Kerns vermehrt um 0,009, wenn alles in Einheiten der Atomgewichtsskala ausgedrückt wird. Wir wollen die Anwendung davon auf die in Rutherfords Versuchen hauptsächlich untersuchten Stoffe N, O und C machen.

b) Unbeständigkeit des Stickstoffkerns.

Das Atomgewicht des Stickstoffs spielt unter den leichten Elementen eine Ausnahmrolle, da es nicht in die Reihen  $4n+3$  paßt, und vielleicht ist es gerade dieser Umstand, der den Zerspaltungseffekt möglich macht. Rutherford bemerkt, daß der Stickstoffkern vermutlich aus 3 Helium- und 2 Wasserstoffkernen besteht. Wir wissen bisher nicht, welches Endprodukt bei der Zerspaltung des Kerns entsteht, sondern nur mit großer Wahrscheinlichkeit, daß überhaupt Wasserstoffkerne als Spaltprodukte auftreten. Am wahrscheinlichsten dürfte, auch nach dem Folgenden, die Annahme sein, daß nur ein Wasserstoffkern aus dem Verbands des N-Kerns gelöst wird; diesen Fall können wir indessen wegen unserer Unkenntnis des Atomgewichts eines solchen Endprodukts nicht beurteilen.

Ebensowenig ist dies der Fall bei der von Rutherford ins Auge gefaßten Möglichkeit, daß ein Kern vom Atomgewicht 2, eines zu Wasserstoff isotopen Elements, abgespalten wird. Können wir zwar mit Hilfe einer später anzugebenden Reichweitenformel von Rutherford aus der beobachteten Reichweite von 28 cm, die dann als diejenige der H-Isotope aufzufassen wäre, deren Geschwindigkeit und damit deren kinetische Energie berechnen, so fehlt uns doch jeder Anhaltspunkt für den erforderlichen genauen Wert des Atomgewichts dieser Isotope.

Doch ist es denkbar, daß der N-Kern unter Abgabe von zwei getrennten H-Kernen (etwa eines schnellen und eines langsameren) zum C-Kern abgebaut wird. Wir wollen die energetischen Voraussetzungen hierzu vorerst unter der Annahme prüfen, daß die entstandenen Spaltprodukte (der C- und die beiden H-Kerne) als ruhend angesehen werden können; diese Annahme ist auch der Darstellung zugrunde gelegt, die Sommerfeld<sup>3)</sup> in seinem soeben erschienenen Buch gibt. Aus unserer Übersicht der Atomgewichte entnimmt man

<sup>1)</sup> Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien, S. 535, 1919. Wie ich nach Niederschrift dieser Betrachtungen von Herrn Sommerfeld erfahre, hat Herr Vegard ihm gegenüber auf die Notwendigkeit hingewiesen, die kinetischen Energien der Spaltprodukte zu berücksichtigen.

<sup>1)</sup> l. c. S. 587.

<sup>2)</sup> l. c. S. 558—561.

$m_C + 2m_H - m_N = 0,007$ . Dieser Massenunterschied ist zwar sehr ungenau wegen der bei  $m_C$  und  $m_N$  zulässigen Fehler, doch ist es wahrscheinlicher, daß er unterhalb, als daß er oberhalb des Mindestunterschieds 0,009 stabiler Kerne liegt und läßt daher grundsätzlich eine Unbeständigkeit des N-Kerns vermuten. Diese Feststellung bedeutet also, daß energetische Gründe *nicht* gegen die Zerfallsmöglichkeit sprechen. Danach braucht der Zerfall noch nicht tatsächlich in der angenommenen Weise einzutreten, da wir ja nicht in Rechnung gesetzt haben, von welchen etwa energieverbrauchenden Vorgängen (z. B. kinetische Energie der Zerfallsprodukte) der Zerfall begleitet ist. Da wir diese Begleitumstände beim Stickstoffzerfall wenigstens teilweise kennen, so wollen wir sie bei unserer Betrachtungsweise in Rechnung setzen. Es sind also die nachweislich nach dem Zerfall vorhandenen kinetischen Energien, insbesondere diejenige des hochgeschwindigen H-Kerns zu berücksichtigen, indem wir vorerst annehmen, daß nur *einer* der beiden H-Kerne eine in Betracht zu ziehende hohe Geschwindigkeit hat. Da man gleichschnelle H-Kerne in reinem Wasserstoff erhält, so kann wie bei Rutherford ihre Energie aus einer einfachen Stoßbetrachtung unter Annahme zentralen Stoßes zwischen dem  $\alpha$ -Strahl des RaC und dem H-Kern gefunden werden. Es ergibt sich rund  $\frac{1}{2}$  der Energie des auftreffenden  $\alpha$ -Strahls; dem entspricht nach der Relativitätstheorie, in der Skala der Atomgewichte gemessen, ein Zuwachs der Masse des schnellen H-Kerns gegenüber dem ruhenden von 0,006. Mit Bestimmtheit wissen wir bei dem ins Auge gefaßten Spaltungsvorgang nur, daß *ein* schneller H- $\alpha$ -Strahl entsteht; ob sonst noch beträchtliche kinetische Energien nach dem spaltenden Zusammenstoß bestehen, muß dahingestellt bleiben. Wir können also jedenfalls als Bedingung der Zerfallsmöglichkeit die Ungleichung zwischen der Energie vor und nach dem Stoß aufstellen:

$$m_N + m_{He} + 0,009 \geq m_C + m_{He} + 2m_H + 0,006.$$

Beim Übergang eines neutralen N-Atoms mit 14 H-Kernen und 14 Elektronen, davon 7 im Kern, in ein neutrales C-Atom werden zwei Elektronen und 2 H-Kerne frei. Man kann also auf beiden Seiten unsrer Ungleichung mit neutralen Atomen rechnen und daher die gewöhnlichen Atomgewichte einsetzen, die ja bei größeren Elektronenverlusten eine Korrektur erfahren müßten. Führt man vorerst nur den hinreichend genau bekannten Wert von  $m_H$  ein, so fordert also die Energiebilanz für den Zerfall des N-Kerns:

$$m_N - m_C \geq 2,012.$$

Das Gleichheitszeichen ist zu nehmen, falls nach dem Stoß keine beträchtlichen kinetischen Energien angenommen werden, außer der des H- $\alpha$ -Strahls; im anderen Falle tritt das  $>$ -Zeichen in Kraft. Bei der Ungenauigkeit der Atomgewichtsbestimmung können wir natürlich auch

hier wieder nur sagen, ob der spaltende Stoß in den zulässigen Fehlergrenzen, bei bestimmter Annahme über die Energien nach dem Stoß, möglich ist. Unsere obigen Werte für die Atomgewichte liefern  $m_N - m_C = 2,008$ , die zulässigen Fehler sind jedoch so groß, daß die Differenz wohl bis 2,015 betragen könnte. Hiermit ist unsere obige Ungleichung nur dann verträglich, wenn außer dem H- $\alpha$ -Strahl nach dem Stoß keine beträchtlichen Energien angenommen werden. Insbesondere ist es nicht zulässig, anzunehmen, daß beim Zerfall *zwei* hochgeschwinde H- $\alpha$ -Strahlen entstehen oder, daß zwar nur *ein* solcher entsteht, aber der ankommende He- $\alpha$ -Strahl *seine* Energie nicht in der Hauptsache an diesen abgibt.

Da uns hiernach die Energiebilanz stark an die Grenzen der zulässigen Fehlerbereiche der Atomgewichte führt, so möchten wir es als wahrscheinlich betrachten, daß der spaltende Stoß nicht, wie hier vorausgesetzt, zwei, sondern nur einen H-Kern aus dem Verbands des N-Kerns löst. Es mochte bei unserer Überlegung indessen nicht uninteressant sein, zu sehen, daß man sich im Gegensatz zu den Verhältnissen bei Helium im Falle des Stickstoffs schon nahe an der Grenze der Instabilität befindet. Man wird hieraus das Vertrauen schöpfen, daß der vermutlich nur unter Abspaltung *eines* H-Kerns verlaufende wirkliche Zerfallsprozeß des N-Kerns tatsächlich auf dem hier beschrittenen Weg verstanden werden kann, wenn man nur erst einmal die Natur und die Geschwindigkeit der Zerfallsprodukte genauer kennt.

Entsprechend der Bedeutung, die dem Sauerstoff und Kohlenstoff in den Rutherfordschen Versuchen zukommt, wollen wir die energetischen Voraussetzungen für einen Zerfall auch bei diesen Elementen prüfen.

#### c) Stabilität bei Sauerstoff und Kohlenstoff.

Die Kerne O und C gehören zur Reihe  $4n$  und sind daher vermutlich aus Heliumkernen aufgebaut, die zwar selbst komplexen Charakter haben, aber im Gesamtkern doch eine mehr selbständige Rolle zu spielen scheinen. Hierauf läßt insbesondere die Kleinheit der Differenzen  $4m_{He} - m_O$  und  $3m_{He} - m_C$  schließen gegenüber denjenigen von  $16m_H - m_O$  und  $12m_H - m_C$ . Wir werden uns also fragen, ob bei O und C die energetischen Vorbedingungen für die Abspaltung eines He-Kerns vorliegen. Dies ist leider nur im Fall einer hypothetischen Zerspaltung des O-Kerns in einen C- und He-Kern möglich, da nur hier die Atomgewichte der Endprodukte bekannt sind. Es ist  $m_C + m_{He} - m_O = 0,004$  mit einem Fehlerbereich, der jedoch schwerlich einen Wert über 0,009 zuläßt. Demnach ist diese Abspaltung energetisch möglich. Beim Abbau des C-Kerns und auch des N-Kerns, wenn man die Zerspaltung eines He-Kerns in Erwägung zieht, sind die Endprodukte (vom Atomgewicht 8 bzw. 10) nicht bekannt.

Gesetzt den Fall, die Zerspaltung des O-Kerns

liege in der Natur tatsächlich vor, mußte dann bei Rutherfords Versuchen dieser Vorgang nicht beobachtet werden? Diese Frage ist zu verneinen, wenn zur Zerspaltung Energieaufwand nötig ist, zu bejahen, falls der Zerspaltungsprozeß unter Energieabgabe verläuft. Es ist ja der abgespaltene Kern seiner korpuskularen Natur nach identisch mit dem  $\alpha$ -Strahl des RaC; er kann also nur bei Vorliegen größerer Reichweite, also größerer Geschwindigkeit, von den übrigen  $\alpha$ -Strahlen unterschieden werden, abgesehen davon, daß bei Rutherford überhaupt nur eine Unterscheidung hinsichtlich der Reichweite vorgenommen wird. Dazu aber muß ihm bei der Zerspaltung außer der etwa durch Stoß übernommenen Energie des ankommenden  $\alpha$ -Strahls noch ein weiterer aus dem ursprünglichen Kern stammender Energiebetrag zugeführt worden sein, d. h. es muß sein  $m_C + m_{He} < m_O$  eine Annahme, gegen die sich wegen der Fehlerbereiche der Atomgewichte nichts aussagen läßt.

Bei Rutherfords Versuchen am Sauerstoff und Stickstoff wurden tatsächlich Strahlen beobachtet, deren Reichweite größer war als die der auffallenden Strahlen, nämlich 9 cm gegen 7 cm der  $\alpha$ -Strahlen des RaC. Dagegen zeigte Kohlenstoff (in  $CO_2$ ) keine derartige Anomalie. Entgegen einer sogleich zu besprechenden Rutherfordschen Erklärungsweise der weitreichenden Strahlen in O und N möchte ich nun auf die Möglichkeit hinweisen, diese Strahlen als He- $\alpha$ -Strahlen zu deuten, die ihre höhere Energie dem Abspaltungsprozeß eines He-Kerns aus dem O- bzw. N-Kern verdanken. Bei der Ungenauigkeit der Atomgewichte kann gegen eine derartige Annahme vom Standpunkt unserer Energie-Massenbilanz nichts ausgesagt werden. Betrachtet man He- $\alpha$ -Strahlen verschiedener Geschwindigkeit, so verhält sich bekanntlich ihre kinetische Energie wie die 3/2te Potenz ihrer Reichweite; im obigen Fall ist also die Energie des Spaltstrahls in Masseneinheiten der Atomgewichtsskala ausgedrückt, um

$$\left(\frac{9}{7}\right)^{\frac{3}{2}} - 1 \cdot 0,009 = 0,0016$$

größer als die des spaltenden Strahls. Es ist nicht erforderlich, numerische Nachprüfungen anzustellen, um zu erkennen, daß ein so kleiner Energieposten wegen der weiten Fehlergrenzen der Atomgewichte bei unserer Energiebilanz nicht ins Gewicht fällt. Bei dieser Auffassung besteht freilich eine Schwierigkeit darin, anzunehmen, daß das Endprodukt energieärmer, also stabiler ist als der ursprüngliche Kern. Doch findet sich die gleiche Schwierigkeit bei den radioaktiven Elementen; allerdings findet hier ein selbsttätiger Übergang in die energieärmere Form statt. Ob die Existenz selbsttätigen Zerfalls eine notwendige Folge einer solchen positiven Energiedifferenz ist, bleibe dabei dahingestellt.

Rutherfords Erklärungsweise stützt sich wesentlich auf eine für  $\alpha$ -Strahlen beliebiger Herkunft und Natur geltende Reichweitenformel, die

er in speziellerer Form aus einer Bohrschen Betrachtung ableitet, die wir aber sogleich in allgemeiner von ihm angewendeter Form angeben wollen. Sei  $R$  die im gleichen Medium, z. B. in Luft, gemessene Reichweite dieser Strahlen,  $M$ ,  $E$ ,  $V$  ihre jeweilige Masse, Ladung und Geschwindigkeit, so findet er:

$$R = \alpha \cdot \frac{M}{E^2} \cdot V^3.$$

Darin bedeutet  $\alpha$  eine nur noch von der Natur des durchlaufenen Mediums abhängende Konstante; sie kann etwa bestimmt werden durch Einsetzen der bekannten Daten für die  $\alpha$ -Strahlen des RaC. Statt der dritten Potenz der Geschwindigkeit setzt Rutherford die 2,85te Potenz, wofür sich empirische Gründe angeben ließen.

Nun nimmt Rutherford an, daß die schnellen Strahlen in Sauerstoff aus O-Atomen, d. h. O-Kernen mit Elektronenhülle bestehen. Aus einer einfachen Stoßbetrachtung entnimmt er dann, daß die Geschwindigkeit der O-Atome höchstens gleich 0,4 der der stoßenden He- $\alpha$ -Strahlen ist. Einsetzen dieses Wertes und desjenigen für die Masse  $M$  ergibt unter Annahme einer Ladung  $E$  des O-Atoms für das Verhältnis der Reichweite  $R_O$  des O-Atoms zu derjenigen  $R_{He}$  des He- $\alpha$ -Strahls  $R_O : R_{He} = 4 \cdot (0,4)^3 \cdot 4/E^2 \sim 1/E^2$ , wenn  $E$  in Einheiten der positiven Elementarladung ausgedrückt wird. Mit Rücksicht auf die Potenz 2,85 statt 3 ergeben sich bei Rutherford ein wenig größere Werte; für  $E = 1$  hat man  $R_O/R_{He} = 1,1$ , d. h.  $R_O = 7,8$  cm. Nur wenn die Ladung des O-Atoms gleich 1 gesetzt wird, kann formal aus obiger Reichweitenbeziehung etwa die zu fordernde große Reichweite von 9 cm erreicht werden. Abgesehen davon, daß es zweifelhaft erscheint, ob die Bohrsche Betrachtung, die sich auf punktförmig konzentrierte Ladung des  $\alpha$ -Teilchens bezieht, die große bei Rutherford vorgenommene Extrapolation zuläßt, liegt eine große Schwierigkeit für die physikalische Auffassung darin, anzunehmen, daß das O-Atom imstande sein soll, unbehelligt seine Elektronenhülle bis auf ein Elektron mit sich durch das Gas hindurchzuführen. Um so größer wäre allerdings der Gewinn an physikalischer Einsicht, wenn sich Rutherfords Auffassung an Hand weiterer Versuche bestätigen sollte.

Für N und C ergeben sich aus der gleichen Rutherfordschen Berechnungsweise  $R_N = 9,3$  cm,  $R_C = 11,2$  cm. Wie schon bemerkt, zeigt der Kohlenstoff nicht die hiernach zu erwartende Anomalie; deshalb nimmt Rutherford an, daß es keine einfach geladenen C-Atom- $\alpha$ -Strahlen gibt. Nach unserer obigen Formel nimmt ja die Reichweite umgekehrt mit dem Quadrat der Ladung ab. Ein O-, N- oder C-Kern, als den wir am ehesten die betreffenden  $\alpha$ -Strahlen vermuten würden, hätte also wegen der hohen Ladung eine gegen die des RaC- $\alpha$ -Strahls verschwindende Reichweite.

Läßt man schon zu, daß die Elektronenhülle des Atoms mitgeführt wird, so könnten auch ungeladene  $\alpha$ -Strahlen existieren. An der Rutherfordschen Formel beurteilt, müßte deren Reichweite jedenfalls außerordentlich groß sein; solche sind aber nicht beobachtet. Aus diesen Gründen haben wir im obigen versucht, die Entstehung der weitreichenden Strahlen in O (bzw. N) in anderer Weise zu deuten.

#### 4. Elementare Ableitung der Rutherfordschen Reichweitenformel.

Bei der Bedeutung, die der obigen Formel in Rutherfords Betrachtungen zukommt, mag der hier mitzuteilende Versuch nicht uninteressant sein, die wichtige Beziehung mit einem Minimum von theoretischen Voraussetzungen und unter möglichst weitgehender Benutzung empirischer Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, während sie bei Rutherford aus einer theoretischen Untersuchung von Bohr<sup>1)</sup> über die Geschwindigkeitsabnahme der  $\alpha$ -Strahlen gefolgert wird.

Wir setzen als bekannt und für alle Medien gültig voraus die empirisch ermittelte Beziehung zwischen der vom  $\alpha$ -Strahl schon zurückgelegten Strecke  $r$ , seiner maximalen Reichweite  $R$  und der an der Stelle  $r$  noch herrschenden Geschwindigkeit  $v$ , nämlich <sup>2)</sup>  $a(R-r) = v^3$ . Der Faktor  $a$  soll im folgenden näher bestimmt werden. Bezeichnet man mit  $W$  die kinetische Energie des  $\alpha$ -Strahls an der Stelle  $r$ , so kann man leicht durch Differentiation aus diesem Gesetz die Energieabnahme des  $\alpha$ -Strahls pro Zentimeter ableiten:

$$\frac{dW}{dr} = \frac{a \cdot M}{3} \cdot \frac{1}{v}.$$

Wenn man sich vorstellt, daß diese Energieabnahme durch Ionisation des durchlaufenen Mediums zustande kommt, so hat man also nur die Zahl der gebildeten Ionen zu beurteilen. Es mögen nun  $\alpha$ -Strahlen von zwar gleicher Ladung und Geschwindigkeit, aber von verschiedener Masse durch das gleiche Medium geschickt werden; in jedem Fall soll aber die Energie des Strahls so groß sein, daß der Energieverlust bei einem Ionisationsakt dagegen völlig verschwindet. Dann wird also auf eine kurze Strecke die Geschwindigkeit des  $\alpha$ -Teilchens nahezu ungeändert sein. Nun kann offenbar die Zahl der Ionisationsprozesse nur abhängen von den elektrischen Kräften und der raumzeitlichen Lage des  $\alpha$ -Teilchens gegenüber den Atomen des durchlaufenen Mediums. Von den Teilchen gleicher Ladung und Geschwindigkeit und verschiedener Masse werden also auf der Strecke  $dr$  gleichviele Ionisationsprozesse verursacht werden, d. h.  $dW/dr$  muß von der Masse unabhängig sein und demnach  $a \propto 1/M$ .

<sup>1)</sup> N. Bohr, Phil. Mag. 25, S. 10, 1913.

<sup>2)</sup> Vgl. Handbuch der Radiologie Bd. II, E. Rutherford, Radioaktive Substanzen und ihre Strahlungen, S. 119, 1913.

Schwieriger ist es, bei gleicher Masse und Geschwindigkeit den Einfluß verschiedener Ladung zu beurteilen. Wir können bloß allgemein vermuten, daß mit zunehmender Ladung die Zahl der Ionisationsprozesse zunimmt. Sei  $e$  die Ladung des Elektrons und  $E$  die des Teilchens, so wird man daher ansetzen  $a = \frac{1}{M} f\left(\frac{E}{e}\right)$  und wird ver-

suchen, die Funktion möglichst einfach zu wählen und im Anschluß an vorliegende Daten zu bestimmen. Als solche wollen wir die Reichweite  $R_H$  der H- $\alpha$ -Strahlen heranziehen, die in Luft 28 cm beträgt, und sie zu derjenigen der He- $\alpha$ -Strahlen des RaC von  $R_{He} = 7$  cm Reichweite in Vergleich setzen. Die beim Zusammenstoß entstehende maximale Geschwindigkeit  $V$  der H- $\alpha$ -Strahlen ist, wie eine einfache bei Rutherford durchgeführte Stoßbetrachtung lehrt, 1,6 mal der Geschwindigkeit  $V_0$  der He- $\alpha$ -Strahlen. Durch Einsetzen dieser Werte in unsere Ausgangsbeziehung  $aR = V^3 = \frac{R}{M} \cdot f\left(\frac{E}{e}\right)$  und Berechnung von  $R_H : R_{He}$  finden wir so, daß nahezu  $f(2) = 4f(1)$ , d. h. man wird  $f \propto (E/e)^2$  setzen und gelangt damit zu dem Rutherfordschen Ausdruck. Die Rutherfordsche Potenz 2,85 statt 3 ist so gewählt, daß exakt  $f(2) = 4f(1)$  herauskommt.

#### Zusammenfassung.

Indem wir nachdrücklich auf die in der Natur der Sache liegende Unsicherheit unserer obigen Betrachtungen hinweisen, wollen wir zusammenfassend als Ergebnis des Vorstehenden folgendes feststellen:

1. Rutherfords Ergebnisse legen die Annahme nahe, daß gemäß der Prout'schen Hypothese die Kerne aus H-Kernen (und Elektronen) aufgebaut sind. Die Abweichung der Atomgewichte von den Vielfachen des Wasserstoffs kann gemäß der relativistischen Beziehung zwischen Masse und Energie als Verschiedenheit der Energieinhalte gedeutet werden.

2. Es werden die energetischen Voraussetzungen für Beständigkeit bzw. Zerspaltbarkeit eines Kerns entwickelt. Die Anwendung auf den He-Kern macht dessen Stabilität verständlich. Diejenige auf Stickstoff ist weniger eindeutig, doch läßt sie die Unbeständigkeit dieses Kerns durchaus erklärlich erscheinen.

3. Auch bei Sauerstoff liegen die energetischen Voraussetzungen für einen Zerfall vor. Es wird im Gegensatz zu Rutherfords Auffassung eine Deutung der weitreichenden Strahlen in Sauerstoff als hochgeschwinde He- $\alpha$ -Strahlen (Produkte einer O-Zerspaltung) in Vorschlag gebracht.

4. Die Rutherfordsche Reichweitenformel wird in ihrer Anwendung auf die weitreichenden Strahlen in Sauerstoff kritisch geprüft und eine elementare Ableitung der Formel angegeben.