

Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Klasse

der

K. B. Akademie der Wissenschaften

zu München

1912. Heft II

Mai- bis Julisitzung

München 1912

Verlag der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)



Bemerkung über den Energieverlust von Elektronen beim Zusammenstoß mit Gasmolekülen.

Von **R. Seeliger.**

Vorgelegt von A. Sommerfeld in der Sitzung am 6. Juli 1912.

Die Theorie der Energieelemente, die in ihrer ursprünglichen Form auf periodische Vorgänge beschränkt ist, hat Herr Sommerfeld¹⁾ bekanntlich in Form einer Theorie der „Wirkungselemente“ auf unperiodische Vorgänge (reine Molekularprozesse) erweitert und schon damals als Beispiel für diese neue und umfassende Anwendungsmöglichkeit zu einer Theorie der lichtelektrischen Effekte benutzt. Vor kurzem skizzierte nun Herr Sommerfeld in Brüssel als Ergänzung zu seiner Auffassung des lichtelektrischen Effektes und der Entstehung der Röntgenstrahlen auf derselben Grundlage eine Theorie der Ionisation durch Stoß. Wenn nun auch damit nur ein erster, und wie Sommerfeld selbst meint, in vielen Punkten noch unbefriedigender Versuch zu einer Deutung der Erscheinungen der Stoßionisation gegeben ist, so werden doch durch die von ihm vertretenen Anschauungen eine Reihe von Fragen angeregt, deren Diskussion vielleicht zu einer weiteren Klärung der Sachlage beitragen kann. Als minimale Energiemenge, die von dem stoßenden Elektron auf das gestoßene Molekül übertragen werden kann, findet Sommerfeld aus der maximalen Größe des Bremsweges $l = 2 \sigma =$ Durchmesser des Moleküls den Betrag

¹⁾ Phys. Zeitschrift 12, p. 1057, 1911.

von $1,5 \cdot 10^{-11}$ Erg (entsprechend 9,3 Volt)¹⁾; hat ein Elektron eine kleinere kinetische Energie als diese, so könnte es überhaupt nicht gebremst werden: „Weder reicht die zur Verfügung stehende Zeit, die durch die Ausdehnung des Moleküls bestimmt ist, für die Energieübertragung aus noch die zur Verfügung stehende kinetische Energie zur Ionisierung.“

Im Zusammenhang damit dürfte nun vielleicht die Frage nicht ohne Interesse sein, wie groß die Energiemengen sind, die bei einem ionisierenden oder einem nichtionisierenden Zusammenstoß von einem Elektron auf ein Molekül übertragen werden bzw. ob überhaupt keine kleineren Energiemengen als $1,5 \cdot 10^{-11}$ Erg übertragen werden können. Ganz abgesehen davon, daß wir es bei einem solchen Stoß mit dem einzigen oder einem der wenigen Fälle zu tun haben, bei denen derartig kleine Energieübertragungen von einem System auf ein anderes stattfinden und die experimentell sich untersuchen lassen, kann man aus der Abhängigkeit der übertragenen Energiemengen von der Geschwindigkeit des Elektrons Schlüsse auf den Mechanismus eines solchen „Zusammenstoßes“ ziehen. Nach den vorliegenden experimentellen Untersuchungen über Absorption und Zerstreung von Kathodenstrahlen sind verschiedene Arten von Zusammenstößen zwischen Elektronen und Molekülen möglich, von solchen, die sich lediglich in einer Deflexion des Elektrons ohne Geschwindigkeitsverlust äußern bis zu solchen, die mit einer Ionisation des Moleküls und also mit einem Energieverlust des Elektrons $\geq 1,5 \cdot 10^{-11}$ Erg verbunden sind. Die Frage, ob ohne Stoßionisation eine Energieübertragung stattfinden kann, läßt sich also auch dahin formulieren, ob Energieübertragungen von kleineren Beträgen als etwa 10^{-11} Erg auftreten. Daß ein Elektron Energie in beliebig kleinen Mengen an ein Feld abgeben kann, daß es insbesondere z. B. durch ein gegengeschaltetes elektrisches Feld bis zur Geschwindigkeit Null kontinuierlich abgebremst werden kann, unterliegt wohl

¹⁾ Unter der vereinfachenden Annahme, daß das Molekül keine Affinität gegen das Elektron hat, und mit dem Werte σ für Helium.

keinem Zweifel. Weniger einfach liegen die Verhältnisse dagegen in Fällen wie den hier behandelten, wo es sich, wie schon erwähnt, um eine Energieübertragung zwischen einem Elektron und einem individuellen „elementaren“ System (Atom oder Molekül) handelt. Unter welchen Umständen dabei eine quantenhafte Energieübertragung stattfindet und auf welche Fälle die von Sommerfeld eingeführte Atomwirksamkeit und die Rolle des h zu beschränken ist, scheint mir noch durchaus ungeklärt zu sein. Es lassen sich diese Fälle bis jetzt vielleicht am besten dadurch charakterisieren, daß dabei das Atom „eine Klappe auftut“, ein Ausdruck, den ich einer gütigen brieflichen Mitteilung von Herrn Sommerfeld verdanke.

Es liegen bisher leider nur ganz wenige experimentelle Daten vor, die zu einer Beantwortung der Frage heranzuziehen sind, ob Energiemengen $< 10^{-11}$ Erg von einem Elektron auf ein Molekül übertragen werden können; soweit ich sehe, kommen nur zwei in Betracht, die ich früher¹⁾ zu anderen Zwecken diskutiert habe. Ich versuchte dort die bremsende Kraft zu berechnen, die ein Elektron in einem Gas erleidet, und fand für langsame (ungefähr 10 Volt) Elektronen in Wasserstoff von 0,1 mm Hg für sie den Wert $1,4 \cdot 10^{-12}$ Dyn, für schnellere (900 Volt) in Luft von 0,01 mm Hg den Wert $3,1 \cdot 10^{-13}$ Dyn. Der erstere Wert ergibt für eine Strecke von 3,5 cm (auf welcher die Elektronen bis zur Ionisierungsgeschwindigkeit beschleunigt werden) einen Energieverlust von $5 \cdot 10^{-12}$ Erg. Da nun einerseits aus den benützten Beobachtungen für die Abhängigkeit des Schichtpotentials vom Druck die Existenz einer Reibungskraft mit einiger Notwendigkeit mir zu folgen scheint, andererseits die freie Weglänge eines Elektrons unter den genannten Bedingungen nur etwa $\leq 0,75$ cm ist, so liegt es nahe, den obigen Energieverlust durch die Zusammenstöße des Elektrons mit Molekülen zu erklären; dabei handelt es sich um Stöße ohne Stoßionisation, da die Energie des Elek-

¹⁾ Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 13, p. 1094, 1911.

trons auf dem ganzen Weg noch nicht den zur Stoßionisation nötigen Schwellenwert erreicht hat. Wir hätten also hier Energieübertragungen, welche den Betrag von 10^{-11} Erg erheblich unterschreiten und zwischen einem Elektron von kleinerer als der Ionisierungsgeschwindigkeit und Molekülen stattfinden. Mit allerdings geringerer Wahrscheinlichkeit glaube ich auch aus dem zweiten loc. cit. zitierten Beispiel auf derartige Vorgänge schließen zu können. Es handelt sich um die spiralförmige Bahn von Elektronen in einem homogenen Magnetfeld, deren Länge 50 cm beträgt. Der Energieverlust längs dieser ganzen Bahn berechnet sich aus den loc. cit. gegebenen Formeln zu $50 \cdot 3 \cdot 10^{-13} = 1,5 \cdot 10^{-11}$ Erg. Bei einigen Elektronen ist der Energieverlust sicher einem einmaligen ionisierenden Zusammenstoß zuzuschreiben; zieht man jedoch die freie Weglänge, die unter den Versuchsbedingungen (0,01 mm Hg Luft) etwa 5 cm beträgt und für ionisierende Stöße etwa 5 mal so groß ist¹⁾, in Betracht, so ist man, wie ich glaube und wie sich z. B. aus dem scharfen Rand der spiralförmigen Strahlenbahn schließen läßt, auch hier zu dem Schluß berechtigt, daß Zusammenstöße mit Energieübertragungen von Beträgen $< 1,5 \cdot 10^{-11}$ Erg vorkommen. Bei gleichmäßiger Verteilung auf alle Stöße ergibt sich in guter Übereinstimmung mit dem Obigen ein Energieverlust von $1,5 \cdot 10^{-12}$ Erg für einen einzelnen Stoß, der dann natürlich nicht mehr mit Ionisation verbunden ist, obwohl die Elektronen erheblich größere (900 Volt) Geschwindigkeit besitzen als die Ionisierungsgeschwindigkeit. Man kann ferner jedenfalls mit einiger Bestimmtheit aus der gesamten Bremsung um $1,5 \cdot 10^{-11}$ Erg und aus dem scharfen Verlauf des Strahles den Schluß ziehen, daß bei einem mit Stoßionisation verbundenen Zusammenstoß das Elektron nicht wesentlich mehr als die Ionisierungsenergie abgibt, die gerade gleich dem obigen Betrag ist, daß also der Energieumsatz nicht in der zweiten nach Sommerfeld möglichen Weise vor sich geht, bei welcher das Elektron ein erheblich größeres Energiequantum

1) Vgl. R. Seeliger, Ann. Phys. 38, p. 764, 1912.

als 10^{-11} Erg verliert und ein Teil von diesem das neu erzeugte Elektron erhält.

Ähnliche kleine Bremsenergien wie für Gase sind nun auch beim Durchgang von Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten zu erwarten und es ist für einen direkten experimentellen Nachweis derselben durchaus nicht aussichtslos, Versuche an solchen anzustellen. Läßt man ein Bündel von homogenen Kathodenstrahlen durch eine dünne Metallfolie gehen, so ist es nach dem Durchgang inhomogen; nach den Versuchen von Leithäuser¹⁾ wird es durch ein Magnetfeld in ein kontinuierliches Spektrum auseinandergezogen. Wenn es nun für die bei jedem Zusammenstoß zwischen einem Elektron und einem Metallatom übertragene Energie einen Schwellenwert V_0 gibt, so muß das Spektrum nicht kontinuierlich, sondern diskontinuierlich sein in Abständen, die jeweils Geschwindigkeitsdifferenzen $\sqrt{V_0}$ entsprechen, da die Endgeschwindigkeit jedes Elektrons sich additiv zusammensetzt aus der Primärgeschwindigkeit und den Geschwindigkeitsverlusten bei den einzelnen Zusammenstößen. In den Leithäuserschen Resultaten kann sich eine derartige „Kannelierung“ des Spektrums wegen der zu geringen auflösenden Kraft seines Magnetfeldes nicht zeigen. Daß es (unter Anwendung der nötigen experimentellen Vorsichtsmaßregeln gegen diffuse Strahlung und dergleichen) jedoch durchaus möglich ist, das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein einer unteren Grenze für die elementare Bremsenergie nachzuweisen, die etwa wie oben zu 9 Volt angenommen werde, zeigt eine leichte Überlegung. Primär homogene Strahlen von etwa 10000 Volt Geschwindigkeit herzustellen, deren Geschwindigkeit nur um einige Volt schwankt, ist durchaus möglich und ebenso würde bereits ein Feld von 1 cm Länge und etwa 10000 Gauß die nötige Dispersion besitzen, um zwei Strahlen mit einer Geschwindigkeit von 10^4 Volt und einer Geschwindigkeitsdifferenz von 9 Volt etwa $1/100$ mm zu trennen, eine Entfernung, die sich durch Schiefstellen der das

¹⁾ Ann. Phys. 15, p. 283, 1904.

Spektrum fixierenden photographischen Platte oder des Phosphoreszenzschirmes und durch Vergrößerung des Abstandes der Platte vom Magnetfeld leicht vergrößern läßt. Analoge Versuche für den Fall des Durchgangs langsamer Wehneltstrahlen durch ein Gas sind bereits im Gang.

Charlottenburg, Juni 1912.