

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

22805

Politechniki Gdańskiej

*vom Verfasser
überreicht
1913.*

derabdruck

aus

oaktivität und Elektronik

Verlag von S. Hirzel in Leipzig

C. RAMSAUER

ÜBER DEN WIRKUNGSQUERSCHNITT DER
EDELGASMOLEKÜLE GEGENÜBER LANG-
SAMEN ELEKTRONEN

II. 22 905

Über den Wirkungsquerschnitt der Edelgasmoleküle gegenüber langsamen Elektronen¹⁾.

Von Carl Ramsauer.

Die Intensität J_0 eines Kathodenstrahlbündels von bestimmter Geschwindigkeit, welches auf eine absorbierende Schicht von der Dicke x und dem Absorptionskoeffizienten α fällt, wird auf den Betrag J geschwächt nach der Formel:

$$J = J_0 \cdot e^{-\alpha x}.$$

Handelt es sich um ein Gas, so ist α dem Druck p proportional und wird daher besser durch das Produkt aus p und dem spezifischen Absorptionsvermögen a für 1 mm Hg Druck ersetzt. Diese Konstante a hat eine sehr tiefe Bedeutung, welche zuerst von Herrn Lenard²⁾ in ihrer ganzen Wichtigkeit erkannt worden ist. a ist die Summe der absorbierenden Querschnitte aller in 1 cm³ bei 1 mm Druck und 0° C enthaltenen Moleküle, gemessen in cm². a ist also unmittelbar vergleichbar mit der entsprechenden gaskinetischen Querschnittssumme, welche man — allerdings nicht ganz mit Recht — als das Maß der Molekülgröße anzusehen pflegt. Auf diese Weise erhält man aus der Absorptionsmessung den Bruchteil des gaskinetischen Querschnitts, welcher bei der betreffenden Elektronengeschwindigkeit zur Absorption fähig ist.

Zur Vermeidung von logischen und experimentellen Unsicherheiten muß hierbei der Begriff der Absorption auf das schärfste gefaßt werden, und zwar nicht in allgemeiner energetischer Form, sondern in unmittelbarer Berücksichtigung der tatsächlich bei dieser speziellen

1) Vgl. Carl Ramsauer, „Über den Wirkungsquerschnitt der Gasmoleküle gegenüber langsamen Elektronen“. Ann. d. Phys. **64**, 513–540, 1921; dasselbe I. Fortsetzung Ann. d. Phys. **66**, 546–558, 1921; dasselbe II. Fortsetzung und Schluß Ann. d. Phys., im Erscheinen begriffen. Die vorliegende Arbeit soll eine kurze Übersicht dieser Untersuchungen geben, soweit sie sich auf die Edelgase erstrecken, da die ausführlichen Untersuchungen in den Annalen zunächst einen anderen Zweck verfolgt haben und infolgedessen die hier behandelten Hauptergebnisse in einer ziemlich zerstreuten, wenig glücklichen Form enthalten. Die obigen Arbeiten sind im folgenden kurz als Ann. 1, 2, 3 angeführt.

2) Ann. d. Phys. **12**, 714, 1903.

Strahlenart geltenden Einzelverhältnisse¹⁾. Absorbiert ist ein Elektron, wenn es durch einmaliges Zusammentreffen mit einem Molekül von der Strahlgeschwindigkeit auf molekulare Geschwindigkeit gebracht ist, einerlei, ob es dauernd oder vorübergehend von dem Molekül festgehalten wird. Nicht zum Absorptionsvorgang rechnen die geringen Geschwindigkeitsverluste und die geringen Richtungsänderungen der Elektronen beim Durchqueren von Molekülen, so daß derartig beeinflusste Elektronen auch experimentell bei der aufgefängenen Intensität zur Geltung kommen müssen. Kaum von der Absorption zu trennen ist die bei sehr langsamen Strahlen auftretende Reflexion (auch unechte Absorption genannt), bei welcher das Elektron ebenfalls beim Zusammentreffen mit einem Molekül aus einem parallelen Strahlenbündel ausgeschieden wird, wobei aber im Gegensatz zur echten Absorption seine Geschwindigkeit, mindestens der Größenordnung nach, erhalten bleibt, und im Gegensatz zur Diffusion Ablenkungen jeder Richtung nach dem Zusammenstoß gleich wahrscheinlich sind.

Dem absorbierenden Querschnitt kann man einen verwandten Begriff, den gesamten überhaupt wirksamen Querschnitt gegenüberstellen, d. h. den gesamten Querschnitt des Moleküls, welcher in irgendeiner Weise, sei es absorbierend oder geschwindigkeitsvermindernd oder ablenkend oder reflektierend, auf das Elektron wirkt, sozusagen die Gesamtgröße, welche das Molekül den Elektronen der betreffenden Geschwindigkeit gegenüber besitzt. In den angeführten Untersuchungen (Ann. 1) hatte ich mir zunächst die Aufgabe gestellt, das Verhältnis des gesamten Wirkungsquerschnittes zum absorbierenden Querschnitt, welches für schnelle Elektronen zweifellos von 1 verschieden ist, für langsame Elektronen zu bestimmen. Nach rein qualitativer Betrachtung schien mir ein wesentlicher Unterschied wahrscheinlich, während Herr Lenard auf theoretischem Wege für langsame Elektronen gerade das Fehlen der Diffusion festgestellt hatte (vgl. Anm. 1). Unterhalb etwa 12 Volt wurden keine merklichen Unterschiede zwischen den beiden Querschnitten gefunden (Ann. 1, 2), von da an setzten immer stärker werdende Andeutungen dieses Unterschiedes ein und oberhalb 30 Volt begannen diese beiden Funktionen der Elektronengeschwindigkeit deutlich auseinanderzulaufen (Ann. 3). Hierbei muß jedoch besonders hervorgehoben werden, daß die Größe des gesamten Wir-

1) Grundlegend für alle Begriffsbestimmungen, welche sich auf die Wechselwirkung zwischen Atom und Elektron beziehen, ist „Quantitatives über Kathodenstrahlen aller Geschwindigkeiten“ von P. Lenard, Heidelberg, Verlag Winter 1918.

kungsquerschnitts experimentell davon abhängt, wie geringe Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen nach dem Genauigkeitsgrad der Methode noch zur Beobachtung gelangen können.

Für sehr kleine Elektronengeschwindigkeiten könnte man sich demnach auf die Angabe des absorbierenden Querschnitts beschränken.

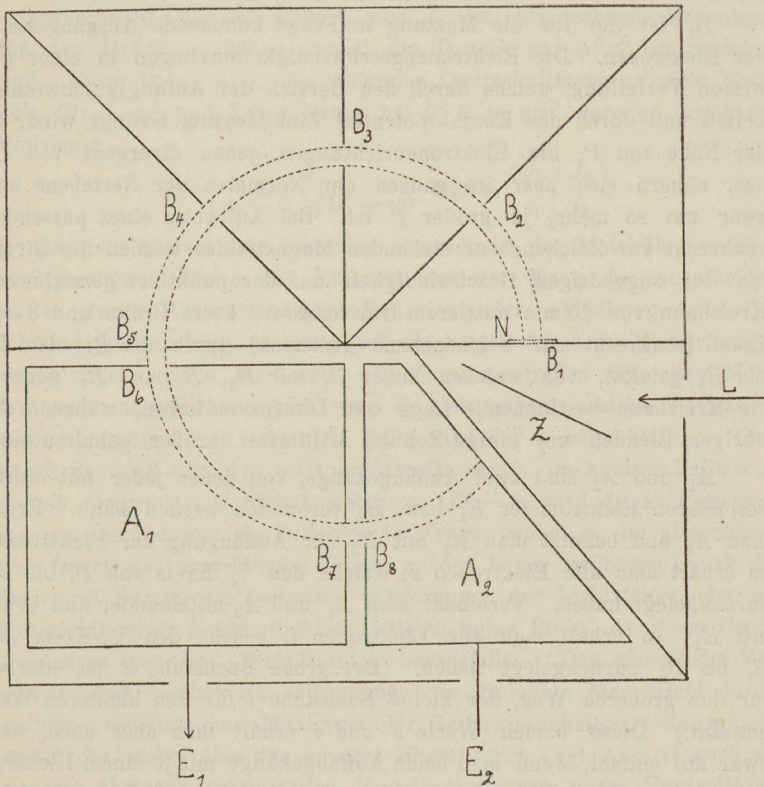


Fig. 1.

Da die Unterscheidung der beiden Querschnitte aber logisch einwandfrei und für größere Geschwindigkeiten real ist, und da die angewandte Methode sich auf den Wirkungsquerschnitt bezieht, so soll im folgenden nur vom Wirkungsquerschnitt schlechthin die Rede sein, wobei der Leser die Identität mit dem absorbierenden Querschnitt für geringste Elektronengeschwindigkeiten im Auge behalten mag.

Die Meßmethode, welche in der Hauptsache den folgenden Zahlen-
ergebnissen zugrunde lag, war folgende (vgl. Fig. 1):

Das durch Quarzlinsen konzentrierte Licht L einer Quarzquecksilberlampe fällt auf die isolierte Zinkplatte Z . Die ausgelösten Elektronen werden durch die negative Aufladung P der Zinkplatte (zwischen 0,5 und 50 Volt) gegenüber dem geerdeten, ganz aus Messing bestehenden Gesamtsystem beschleunigt, und gelangen zum Teil auf die mit zwei Netzen N bedeckte Blendenöffnung B_1 .

B_1 ist die für die Messung in Frage kommende Ausgangsstelle der Elektronen. Die Elektronengeschwindigkeiten liegen in einer gewissen Verteilung, welche durch den Bereich der Anfangsgeschwindigkeiten und durch das Kontaktpotential Zink/Messing bedingt wird, in der Nähe von P , die Elektronenrichtungen gehen divergent von B_1 aus, nähern sich aber im ganzen der Normalen der Netzebene und zwar um so mehr, je größer P ist. Bei Anlegung eines passenden senkrecht zur Zeichenebene stehenden Magnetfeldes werden die Strahlen der zugehörigen Geschwindigkeit auf der punktiert gezeichneten Kreisbahn von 20 mm mittlerem Durchmesser, 1 mm Breite und 8 mm Höhe (senkrecht zur Zeichenebene gemessen) durch die Blenden B_2 bis B_8 geleitet, von welchen außer B_1 nur B_3 , B_5 und B_7 genaue, die Kreisbahn bestimmende Lage und Dimension haben, während die übrigen Blenden um einige Zehntel Millimeter größer gehalten sind.

A_1 und A_2 sind zwei Auffangekäfige, von denen jeder mit einem besonderen Elektrometer E_1 bzw. E_2 verbunden werden kann. Erdet man A_1 und benutzt man A_2 mit E_2 zur Auffangung der Elektronen, so erhält man alle Elektronen J , welche den $\frac{3}{4}$ Kreis von B_1 bis B_8 zurückgelegt haben. Verbindet man A_1 und A_2 miteinander und beide mit E_2 , so erhält man alle Elektronen i , welche den $\frac{1}{2}$ -Kreis von B_1 bis B_6 zurückgelegt haben. (Der große Buchstabe J ist hierbei für den größeren Weg, der kleine Buchstabe i für den kleineren Weg gewählt.) Diese beiden Werte J und i erhält man aber auch, und zwar auf einmal, wenn man beide Auffangekäfige mit je einem Elektrometer verwendet. Dann ist nämlich J die Elektronenmenge, welche in A_2 aufgefangen wird, und i die Summe der Elektronenmengen, welche in A_1 und A_2 aufgefangen werden. Die letztere Meßart arbeitet doppelt so schnell wie die erstere, was bei der großen Anzahl der nötigen Messungen und den mit der Zeit wachsenden Fehlerquellen höchst erwünscht ist. Natürlich müssen stets J und i in gleichem Maß unter Berücksichtigung der speziellen Mengenempfindlichkeiten von E_1 und E_2 ausgedrückt werden, wobei auch die gegenseitigen Influenzierungen der Käfige gegeneinander als Korrektur in Rechnung zu stellen sind.

Diese ganze Anordnung wird in ein Glasrohr gebracht, welches vollkommen ausgepumpt bzw. mit dem zu untersuchenden Gase von entsprechendem Druck gefüllt wird. Über alle weiteren Einzelheiten, Fehlerquellen und Vorsichtsmaßregeln vgl. Ann. 1 und 2.

Es sei jetzt i_1 und J_1 die Elektronenmenge, welche beim Druck p_1 nach Durchlaufen des kürzeren bzw. längeren Weges w und W aufgefangen wird, und es möge i_2 und J_2 die entsprechende Bedeutung für den Druck p_2 haben, wobei die Drucke auf 0°C zu beziehen sind. Dann ist q , d. h. die wirksame Querschnittssumme aller Moleküle für 1 cm^3 und 1 mm Druck bei 0°C in cm^2 gegeben durch die Gleichung:

$$q = \frac{1}{(p_2 - p_1)(W - w)} \cdot \text{lognat} \left(\frac{J_1}{i_1} \middle/ \frac{J_2}{i_2} \right).$$

q entspricht hierbei dem gesamten Querschnitt des Moleküls, welcher in irgendeiner Weise das Elektron aus der Kreisbahn ausscheidet, sei es durch Absorption oder Reflexion oder Ablenkung oder Geschwindigkeitsverlust; in bezug auf die beiden letzteren Einwirkungen ist zu unterscheiden, ob bereits ein Zusammentreffen mit einem Molekül genügende Wirkung gibt, oder ob sich mehrere solche Wirkungen addieren müssen; in ersterem Falle wird das q beim kleinsten Gasdruck dasselbe sein wie beim größten Gasdruck, im zweiten Falle wird q mit steigendem Gasdruck wachsen. $W - w$ wird direkt gemessen; $p_2 - p_1$ kommt nur als Differenz in Frage, wobei p_2 im allgemeinen den Druck des eingeführten Gases, p_1 den kaum meßbaren Druck der Gas- und Dampfreste bedeutet. Änderungen der Lichtstärke oder der lichtelektrischen Empfindlichkeit spielen keine Rolle, da diese Beeinflussungen aus den Verhältnissen herausfallen. Der eigentliche Vergleich wird hierbei im allgemeinen für dasjenige Magnetfeld durchgeführt, welches dem Maximum der Geschwindigkeitsverteilungskurve entspricht, wobei aber für gewisse Korrekturen (vgl. Ann. 1) auch die ganzen, übrigens sehr steilen Verteilungskurven unter Kontrolle gehalten werden.

Das wiedergegebene Beobachtungsmaterial (Fig. 2 und 3) bezieht sich in der Hauptsache auf die Edelgase. Die Kurvenzüge sind in Fig. 3 nur bis etwa 36 Volt geführt, da von hier an experimentelle Komplikationen einsetzen, die noch nicht quantitativ geklärt sind (die Beobachtungswerte beginnen im Sinne des vorigen Absatzes vom Gasdruck abhängig zu werden, vgl. Ann. 3). Die Kurven sind der Übersichtlichkeit wegen auf zwei Figuren verteilt, wobei besonders darauf hingewiesen wird, daß der Ordinatenmaßstab der Fig. 2 fünfmal so

groß ist wie der der Fig. 3, um die flachen Maxima von He und Ne besser hervortreten zu lassen. Zum Vergleich mitaufgenommen sind die Kurven für die absorbierenden Querschnitte von N_2 und H_2 . Die Punktreihen für geringere Geschwindigkeit sind bestimmt von Herrn H. F. Mayer¹⁾, der Endpunkt für N_2 von Herrn Robinson²⁾, die

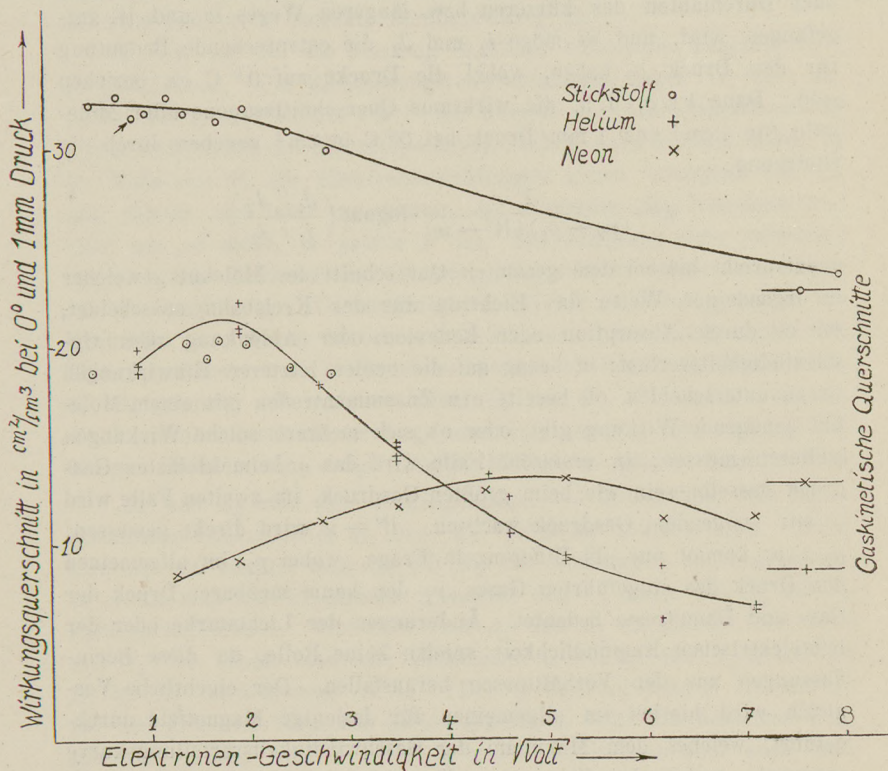


Fig. 2.

beiden Endpunkte für H_2 von Herrn Lenard³⁾ und Herrn Robinson. Außerdem sind in die N_2 - und H_2 -Kurven die von mir bestimmten gesamten Wirkungsquerschnitte eingetragen und durch einen Pfeil markiert; sie stimmen innerhalb der Versuchsfehler, wie oben schon bemerkt, mit den absorbierenden Querschnitten überein. Analog sind

1) Ann. d. Phys. **64**, 451, 1921.

2) Ann. d. Phys. **31**, 769, 1910.

3) Ann. d. Phys. **12**, 714, 1903.

die Werte der absorbierenden Querschnitte nach Herrn H. F. Mayer z. T. in meine Kurven eingetragen (\odot), soweit Herr Mayer die Edelgase untersucht hat.

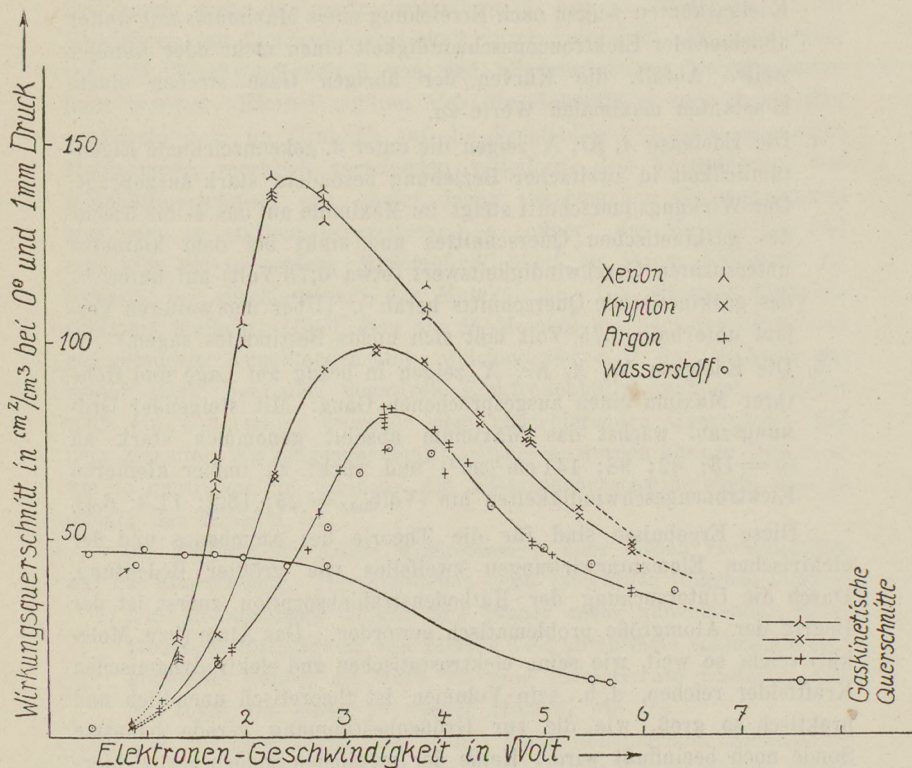


Fig. 3.

Die Versuchsergebnisse lassen sich unter folgenden Hauptpunkten zusammenfassen:

1. Der gesamte Wirkungsquerschnitt und der absorbierende Querschnitt fallen, soweit die Gase untersucht sind, für kleinste Geschwindigkeiten zusammen, innerhalb der prinzipiellen Empfindlichkeit der für die Bestimmung des Wirkungsquerschnitts angewandten Meßmethode.
2. Die gaskinetischen Querschnitte spielen keine irgendwie ausgezeichnete Rolle, sondern werden in sehr starkem Maße durch die Wirkungsquerschnitte über- und unterschritten.

3. Zwischen den Edelgasen und den übrigen bisher untersuchten Gasen, für welche N_2 einen durchschnittlichen und H_2 einen extremen Typ darstellt, besteht ein grundlegender Unterschied: Die Edelgaskurven zeigen nach Erreichung eines Maximums mit weiter abnehmender Elektronengeschwindigkeit einen mehr oder weniger steilen Abfall, die Kurven der übrigen Gase streben einem konstanten maximalen Werte zu.
4. Die Edelgase A , Kr , X zeigen die unter 3. gekennzeichnete Eigentümlichkeit in zweifacher Beziehung besonders stark ausgeprägt: Der Wirkungsquerschnitt steigt im Maximum auf das 4- bis 5fache des gaskinetischen Querschnittes und sinkt bei dem kleinsten untersuchten Geschwindigkeitswert (etwa 0,75 Volt) auf unter $\frac{1}{7}$ des gaskinetischen Querschnittes herab¹⁾. (Über den weiteren Verlauf unterhalb 0,75 Volt läßt sich nichts Bestimmtes sagen.)
5. Die Edelgase Ne , A , Kr , X zeigen in bezug auf Lage und Höhe ihrer Maxima einen ausgesprochenen Gang: Mit steigender Ordnungszahl wächst das Maximum absolut genommen stark an ($q = 13; 82; 98; 141 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$) und rückt zu immer kleineren Elektronengeschwindigkeiten hin ($\text{Volt}_{\text{max}} = 25; 13,2; 11,3; 6,4$).

Diese Ergebnisse sind für die Theorie des Atombaues und der elektrischen Elementarwirkungen zweifellos von größter Bedeutung. Durch die Untersuchung der Kathodenstrahlabsorption zuerst ist der Begriff der Atomgröße problematisch geworden. Das Atom (bzw. Molekül) reicht so weit, wie seine elektrostatischen und elektrodynamischen Kraftfelder reichen, d. h. sein Volumen ist theoretisch unendlich und praktisch so groß, wie die zur Größenbestimmung gerade benutzte Sonde noch beeinflußt wird. Keine der möglichen Sonden besitzt hierbei eine prinzipielle Vorzugsstellung. Dies gilt insbesondere auch von den gleichartigen Nachbarmolekülen, wie schon daraus hervorgeht, daß der gaskinetische Querschnitt mit der Veränderung der Sondengeschwindigkeit, nämlich mit veränderter Temperatur, merklich variiert. Als wichtigste Sonde muß das Elektron wegen des gewaltigen in Betracht kommenden Geschwindigkeitsbereichs und wegen seiner großen Einfachheit betrachtet werden. Auf Grund der klassischen Elektrizitäts-

1) Eine andere formell mögliche Deutung der Versuchsergebnisse für kleine Elektronengeschwindigkeiten ist die Umgehung des Atoms durch das Elektron in irgendeiner Form unter schließlicher Wiederherstellung der ursprünglichen Flugrichtung (vgl. F. Hund, Zeitschr. f. Phys. **13**, 241, 1923 und F. Zwicky, Phys. Zeitschr. **24**, 171, 1923), diese Vorstellung ist aber zu künstlich, um ohne zwingende Beweise angenommen werden zu können.

lehre kann man die Beziehungen des absorbierenden Querschnitts zur Elektronengeschwindigkeit qualitativ voraussagen: Der Querschnitt muß von allerkleinsten Werten, theoretisch 0, mit abnehmender Geschwindigkeit immer mehr und mehr, theoretisch bis auf ∞ , zunehmen, da die Elektronen von Lichtgeschwindigkeit durch kein Feld, die Elektronen von der Geschwindigkeit 0 von den allerschwächsten Feldern beeinflußt werden. Hierbei müßten sich die Moleküle je nach ihrem Bau praktisch, d. h. im Hinblick auf die Empfindlichkeit einer gegebenen Meßmethode, merklich verschieden verhalten. Die Vergrößerung des Molekülquerschnitts mit immer mehr abnehmender Geschwindigkeit muß um so stärker hervortreten, je „offener“ das Molekül ist, und muß eine um so größere Meßempfindlichkeit zu ihrem Nachweis erfordern, je „geschlossener“ das Molekül ist. Die extremen Beispiele sind: ein einfacher Dipol, dem das H_2 -Molekül am nächsten steht, und ein geladener Kugelkondensator, welchem sich z. B. das Ne -Atom mit seiner stark besetzten negativen Elektronenhülle annähert. Ferner muß ein Unterschied zwischen dem absorbierenden Querschnitt und dem gesamten Wirkungsquerschnitt beobachtet werden können, und zwar um so deutlicher, je geringer die Elektronengeschwindigkeit, und je offener das Molekül ist.

Die Messungsergebnisse widersprechen aber diesen Vorstellungen auf das allerstärkste. Hervorgehoben seien namentlich folgende Punkte:

1. Die Nichtedelgase zeigen mit immer mehr abnehmender Elektronengeschwindigkeit von etwa 4 Volt an abwärts schließlich eine konstante Größe, als wenn sie eine feste Grenze besäßen; dies gilt sogar von einem so offenen Molekül wie H_2 .
2. Die Edelgase zeigen mit immer mehr abnehmender Elektronengeschwindigkeit schließlich eine Abnahme des Wirkungsquerschnitts, welche bei A , Kr , X fast bis zur vollen Durchlässigkeit geht.
3. Der Wirkungsbereich der Moleküle gegenüber langsamen Elektronen ist scharf abgeschnitten, d. h. ein passierendes Elektron wird entweder absorbiert oder überhaupt nicht merklich¹⁾ beeinflußt. Dies geht aus der Gleichheit des absorbierenden Querschnitts und des gesamten Querschnitts hervor und ist bei langsamen Elektronen sowohl für offene Moleküle, namentlich H_2 , wie für geschlossene Moleküle, namentlich A nachgewiesen²⁾.

1) Über die prinzipielle Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts von der Meßempfindlichkeit vgl. S. 346/47.

2) Über einen eventuellen geringen Unterschied der beiden Querschnitte in der Nähe der Kurvenmaxima für A und He vgl. Ann. 2.

4. Der Wirkungsquerschnitt der drei schwersten Edelgasatome gegenüber langsamen Elektronen von bestimmter Geschwindigkeit übertrifft den Wirkungsquerschnitt gegenüber den Nachbaratomen um das Vier- bis Fünffache, während z. B. N_2 auch bei allerlangsamsten Elektronen nur um einen ziemlich kleinen Prozentsatz über den gaskinetischen Querschnitt hinausragt.

Von der quantitativen Erklärung dieser Erscheinungen sind wir zurzeit noch weit entfernt. Eine Theorie, die wirklich befriedigen will, müßte jedenfalls das ganze Gebiet umfassen.

Zum Schlusse möchte ich auch an dieser Stelle der Badischen Anilin- und Sodafabrik, besonders Herrn Dr. Hochheim, und der A. G. Julius Pintsch, besonders Herrn Dr. Schröter, für die Überlassung der seltenen und seltensten Edelgase herzlich danken. In bezug auf den Abschluß der Arbeit spreche ich außerdem der Helmholtz-Gesellschaft für die Bewilligung der Apparate und dem Japanausschuß der Notgemeinschaft für die Gewährung der laufenden Mittel meinen aufrichtigsten Dank aus.

Danzig, April 1923.

(Eingegangen 14. Mai 1923.)




~~~~~  
Druck von August Pries in Leipzig.  
~~~~~