ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 37.

1. *Über monomolekulare Elektrizitätsträger
in Gasen und eine
neue Meßmethode der Molekulardurchmesser;
von W. Altberg.*

(Aus dem Radiologischen Institut der Universität Heidelberg.)

Die Entstehung der Elektrizitätsträger in Gasen besteht, wie zuerst von Hrn. P. Lenard an dem Falle der Leitfähigkeitserzeugung durch Kathodenstrahlen¹⁾ gezeigt worden ist, in einer Abspaltung eines negativen Elementarquantums von dem Gasmolekül und der nachherigen Aufnahme des abgetrennten Quantums durch ein anderes Molekül. Man würde danach erwarten, daß die Wanderungsgeschwindigkeiten (Beweglichkeiten) der so gebildeten Elektrizitätsträger molekularer Größe entsprechen; die bisher experimentell bestimmten Wanderungsgeschwindigkeiten sind zum Teil viel größer, meist aber kleiner, als bei molekularer Größe der Träger zu erwarten wäre.

Der erstere Fall (sehr große Beweglichkeit) fand sich — bei Gasen von Atmosphärendruck — zuerst in Flammen, woraus Hr. P. Lenard den Schluß zog, daß die negativen Träger hier zum Teil freie Elektronen seien²⁾; später ist von Hrn. J. Franck³⁾ gezeigt worden, daß auch in einigen Fällen kalter Gase, z. B. in sauerstofffreiem Stickstoff und in Argon, enorm große Beweglichkeiten der negativen Träger beobachtet werden können.

Das gewöhnliche ist jedoch der zweite Fall, daß die beobachteten Beweglichkeiten geringer sind, als monomolekularen Trägern entspräche. Man kann sogar sagen, daß genau mono-

1) P. Lenard, Ann. d. Phys. 12. p. 475. 1903.

2) P. Lenard, Ann. d. Phys. 9. p. 649. 1902.

3) J. Franck, Verh. d. Deutsch. Physik. Ges. 12. p. 291 u. 618. 1910.

molekulare Träger bisher mit Sicherheit überhaupt noch nicht konstatiert worden sind¹⁾; meist hat es den Anschein, daß die Träger durch Anlagerungen irgendwelcher Art vergrößert sind. Man vgl. hierzu die Untersuchungen der Herren P. Lenard und C. Ramsauer, in welchen die Bildung großer Träger auf Anlagerungen an ursprünglich monomolekulare Träger zurückzuführen ist²⁾, ohne daß jedoch diese letzteren Träger für sich untersucht worden wären.

Hr. A. Becker hat neuerdings den Fall der kleinsten Träger eingehend untersucht³⁾, hat jedoch die Trägerbeweglichkeiten wieder wesentlich geringer gefunden, als sie für monomolekulare Träger zu erwarten wären. Dabei stellt er eine geringe Beweglichkeitszunahme mit abnehmendem Alter der Träger fest. Die Zeit zwischen Erzeugung und Messung der Träger wurde zwischen 12 und 0,35 Sek. variiert, die Beweglichkeit wurde mit Hilfe des von ihm verfeinerten Zylinderkondensators gemessen.⁴⁾

Ist diese Abhängigkeit der Beweglichkeit vom Alter der Träger auf Anlagerungen zurückzuführen, so muß aus den Versuchen von Hrn. A. Becker geschlossen werden, daß diese Anlagerung an die ursprünglich monomolekularen Träger in weniger als 0,35 Sek. verläuft. Man hätte also, um die monomolekularen Träger nachzuweisen, die Zeit zwischen Bildung und Messung noch weiter zu verkürzen, was bei der von Hrn. A. Becker angewandten Methode des Zylinderkondensators nicht möglich ist.

Zur Untersuchung der schnellsten Träger ist daher der Netzkondensator (elektrisches Feld $\parallel$ dem Gasstrom) mehr ge-

1) Es ist zu bemerken, daß wir hier stets nur die von Herrn Lenard angegebene Formel für den Zusammenhang zwischen Wanderungsgeschwindigkeit und Trägergröße benutzen (P. Lenard, *Ann. d. Phys.* **3.** p. 298. 1900). Über die Beziehung dieser Formel zu den anderen sonst aufgestellten Formeln vgl. A. Becker, *Ann. d. Phys.* **36.** p. 209. 1911.

2) P. Lenard u. C. Ramsauer, *Heidelb. Akad.* 1910/11, besonders Teil III u. V p. 49. Es ist dort gezeigt, daß ganz große Elektrizitätsträger durch Anlagerung an Nebelkerne (feste Partikel), nicht durch Zusammenlagerung mit Gasmolekülen entstehen; kleinere vielleicht auch durch Zusammenlagerung einiger wenigen Gasmoleküle.

3) A. Becker, *Ann. d. Phys.* **36.** p. 209. 1911.

4) A. Becker, *Zeitschr. f. Instrumentenk.* **29.** p. 258. 1909.

eignet, da er, falls die Träger innerhalb des Meßraumes erzeugt werden, die Beobachtung der Träger zu einer Zeit nach ihrer Erzeugung ermöglicht, welche noch kürzer ist als die obenerwähnte.

Diese Methode wurde zuerst von Hrn. J. Zeleny zur Messung des Verhältnisses der Beweglichkeit von negativen und positiven Trägern angewandt¹⁾ und von Hrn. P. Lenard zur direkten Messung der Trägerbeweglichkeit benutzt.²⁾

Auf Veranlassung von Hrn. Prof. Lenard wurde im folgenden diese Methode des Netzkondensators zur Aufsuchung der schnellsten Träger angewendet und der Fall dieser Träger eingehend untersucht.

Diese Methode besteht bekanntlich in der Auffindung der elektrischen Kraft, welche notwendig ist, um einen Träger gegen einen Gasstrom zu treiben, der sich mit einer bekannten Geschwindigkeit parallel zu den Kraftlinien bewegt.

Im Wesen dieser Methode selbst liegt der Vorteil, daß es möglich erscheint, bei einer bestimmten Spannung aus der Menge der mit verschiedenen Geschwindigkeiten sich bewegenden Träger nur die schnellsten herauszugreifen, während die langsameren einfach durch den Gasstrom nach der entgegengesetzten Richtung weggeblasen werden.

Deshalb ist diese Methode geeignet zur genauen Beweglichkeitsmessung der allerschnellsten Träger, und zwar sofort nach ihrer Erzeugung, wo sie aus einzelnen geladenen Molekülen bestehen und noch nicht zu Molekülgruppen sich zusammengelagert oder durch Nebelkerne sich beschwert haben.

Als Vorzug der Netzkondensatormethode muß auch verzeichnet werden, daß die Rekombinationen hier keine merkliche Rolle spielen (s. w. unten) und der Einfluß der Diffusion, welcher bei kleinen Gasgeschwindigkeiten störend wirken kann, leicht durch entsprechende Vergrößerung der Gasgeschwindigkeit zu eliminieren ist (vgl. w. u.).

Infolge dieser Eigentümlichkeiten der Methode war es möglich, in Gasen, welche Röntgenstrahlen ausgesetzt waren, neben den gewöhnlichen, Molekülkomplexe darstellenden Trägern

1) J. Zeleny, Phil. Mag. (1) **46**, p. 120. 1898.

2) P. Lenard, Ann. d. Phys. **3**, p. 298. 1900.

auch die Existenz schneller Träger nachzuweisen, deren Größe (aus ihrer Beweglichkeit nach der Lenardschen Formel¹⁾ berechnet) so nahe an die Dimensionen der Moleküle herankommt, daß man sie wohl mit Recht als monomolekulare ansehen darf.

Diese Feststellung der monomolekularen Träger in Gasen soll somit einen Beitrag liefern zur Kenntnis der Natur der Elektrizitätsträger überhaupt und auch zur Rechtfertigung der obenerwähnten Vorstellung über die Bildung der Träger in Gasen.

Man kann aber alsdann auch weiter gehen und kann — wie es in der Überschrift dieser Arbeit angedeutet ist — die Beweglichkeitsmessung der schnellsten, aus einzelnen Molekülen (oder Atomen) bestehenden Elektrizitätsträger zusammen mit der von Hrn. Lenard angegebenen Formel als einen Weg zur Ermittlung von Molekül- (bzw. Atom-)Durchmessern benutzen. Besonders in Hinsicht der positiven Träger gilt dies, da es bei diesen ausgeschlossen erscheint, daß sie mit freien (nicht materiellen) Elementarquanten vermischt sein könnten.

Ein solcher neuer Weg zur Ermittlung von Moleküldurchmessern muß willkommen erscheinen, auch wenn es sich, wie es hier der Fall ist, nicht um normale elektrisch neutrale, sondern um elektrisch geladene Moleküle handelt. Denn der bereits bekannten Wege zum gleichen Ziele sind sehr wenige, wenn man von den älteren Methoden absieht, welche bloß die Größenordnung der Molekül- oder Atomdurchmesser angeben.²⁾ Es kommen dann nur die *drei* weiter unten zu berücksichtigenden Wege in Betracht, nämlich: 1. aus der Dichte im festen (flüssigen) Aggregatzustande unter Benutzung des heute schon genügend exakt bekannten absoluten Molekulargewichtes; 2. aus der inneren Reibung mit Benutzung der heute ebenfalls genügend exakt bekannten Molekülzahl in der Volumeneinheit der Gase; 3. aus der Absorption langsamer Kathodenstrahlen.³⁾

1) P. Lenard, Ann. d. Phys. 3. p. 313. 1900.

2) Diese früheren Wege, deren viele sind — zu einem sehr wichtigen Teil von Lord Kelvin angegeben — haben den großen historischen Wert, zuerst zur Erkenntnis geführt zu haben, daß die Vorstellung von Molekülen bzw. Atomen bestimmt angebbaren Durchmessers konsistent und also wohlberechtigt ist.

3) P. Lenard, Ann. d. Phys. 12. p. 703. 1903.

Netzkondensator.

Der Netzkondensator (Fig. 1), welcher zur Beweglichkeitsmessung schnellster Träger diente, bestand aus zwei parallel nebeneinander gestellten runden Platten *A* und *B* von 8,3 cm Durchmesser mit zentrisch durchbohrten Öffnungen, welche mit feinem Drahtnetz (0,08 mm Drahtdicke und 0,2 mm² Maschengröße) ausgefüllt sind. Eine von diesen hat in der Mitte des Netzes einen kreisförmigen Ausschnitt von 10 mm Durchmesser, und die Öffnung ist ausgefüllt (nicht vollständig) mit einer runden Scheibe *C* von 8,5 mm Durchmesser aus dem gleichen

Fig. 1.

Netz (Fig. 2). Diese Scheibe ist mit einem Quadrantenpaar des Elektrometers in Verbindung und dient zur Aufnahme der Träger, während das sie umgebende Netz mit der Platte *A* einen Schutzring bildet, um das Feld homogen zu machen. Die andere Platte *B* ist auf drei isolierende Stützen gestellt und mit einem Pole — negativen, wenn die negativen Träger beobachtet wurden — der Akkumulatorbatterie, deren anderer Pol zur Erde abgeleitet ist, verbunden. Die Platte *A* und die zylinderförmige Büchse *H*, welche den ganzen Netzkondensator umgab, waren auch zur Erde abgeleitet. Die Büchse konnte

Fig. 2.

man auseinanderschieben, um das Einstellen der Platten mit den Netzen auf verschiedene Abstände zu ermöglichen. Zum Durchblasen des Gases durch die Netze diente eine in die Büchse eingepaßte Röhre R von 1,9 cm innerem Durchmesser. Die Netze und alle Teile des Kondensators, sowie die ihn umgebende Büchse H waren, um Kontaktpotentiale möglichst zu vermeiden, aus demselben Metall (Messing) hergestellt. Die Dichtung der Büchse und aller Rohrverbindungen geschah durch von außen umwickeltes Stanniol und Kautschukstreifen darüber.¹⁾ Die Träger wurden im Raume zwischen den beiden Netzen in einer etwa 0,5 cm breiten Gasschicht erzeugt; dazu dienten zwei Aluminiumfenster $F_1 F_2$ (Fig. 1).

Nach derselben Form war ein zweiter Kondensator, ebenfalls aus Messing, konstruiert; alle seine Dimensionen waren 2,5 mal so groß wie die des ersten und gestatteten deshalb, die Netze bis auf 9 cm zu entfernen, ohne dabei die Gleichmäßigkeit des Feldes in der Mitte, wo sich das kleine Netz befand, zu beeinträchtigen.

Versuchsanordnung.

Die zu untersuchenden Gase wurden käuflichen Bomben entnommen, über ein Wasserventil geleitet (Fig. 3), dann mit

Fig. 3.

Chlorcalcium und wasserfreier Phosphorsäure getrocknet und passierten kurz vor Eintritt in den Netzkondensator ein Asbestfilter, um von Staub und etwaiger Ladung befreit zu werden.²⁾

1) P. Lenard u. C. Ramsauer, Sitzungsber. d. Heidelb. Akad. 31. Abh. p. 17. 1910.

2) P. Lenard u. C. Ramsauer, Heidelb. Akad. 32. p. 28. 1910.

Zur Erzeugung der Träger diente eine *weiche* Röntgenröhre mit konzentrierter Wirkung, welche innerhalb eines Bleikastens mit einem 0,5 cm breiten Spalt aufgestellt war. Unmittelbar vor dem Aluminiumfenster des Kondensators war eine zweite Blende *D* mit gleichem Spalt.

Zur Unterbrechung des Stromes im primären Kreise des Induktoriums diente ein Foucaultscher Unterbrecher, welcher Unterbrechungen in genügenden Zeitabständen gab, so daß sie bequem zu zählen waren. Ein Teil der Beobachtungen wurde auch mit einem Wehneltunterbrecher ausgeführt.

Die Ermittlung der Gasgeschwindigkeit an der Stelle, wo die Träger durch das kleine Netz *C* aufgefangen werden, stützt sich einerseits auf die Kenntnis der mit Gasuhr gemessenen Gesamtmenge *Q* des pro Zeiteinheit durchgeflossenen Gases, andererseits auf die Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung des Gases über den Rohrquerschnitt. Wie von Hrn. A. Becker¹⁾ gezeigt worden ist, wird diese für das Rohrinne sehr nahe durch eine kubische Parabel dargestellt, und nach Beobachtungen von Hrn. Shri Nehru²⁾ gilt dies auch für alle dem Rohrende benachbarten Stellen. In der Achse und mit genügender Genauigkeit auch in deren Nähe — über die ganze Ausdehnung des aus diesem Grunde klein gewählten Netzes — ist danach die Geschwindigkeit

$$v_0 = \frac{5}{3} v_m = \frac{5}{3} \frac{Q}{\pi r^2},$$

wo v_m = die mittlere Gasgeschwindigkeit, r = Radius des Rohres und Q = das Durchflußvolumen des Gases in der Zeiteinheit ist. Alle weiter unten angegebenen Zahlen der Gasgeschwindigkeit sind nach dieser Formel berechnet für die Mitte des Rohres mit dem kleinen Netz *C*. Damit die Anzeigen der Gasuhr die wirklich durchflossene Gasmenge angeben, muß die Dichtung des Kondensators und seiner Teile vollkommen sein, was mit Hilfe des obenerwähnten Wasserventils (Fig. 3), das nach Abstellen des Gasausflusses aus dem Kondensator (vor der Gasuhr) als Wassermanometer benutzt werden konnte, zu kontrollieren war. Es zeigte sich dabei, daß die Dichtung

1) A. Becker, Ann. d. Phys. 24. p. 863. 1907.

2) Shri Nehru, Inaug.-Diss. Heidelberg, 6. Febr. 1911.

als genügend angesehen werden kann, wenn das Wasserniveau im Manometer innerhalb 10 Minuten nicht mehr als etwa 20 cm stieg.

Zur Messung der mit dem kleinen Netz aufgefundenen Trägermenge diente ein Elektrometer nach Dolezalek, welches einen Ausschlag von 25 cm gab, wenn an die Quadrantenpaare eine Potentialdifferenz von 1 Volt angelegt wurde und die Nadel auf 40 Volt geladen war (Skalenabstand gleich 1,5 m).

Zur Messung der angelegten Spannungen wurden ein Zweifadenelektrometer (für Spannungen unter 100 Volt) und ein Multizellularelektrometer (für Spannungen von 100 Volt und darüber) benutzt. Dieselben wurden mit einem geeichten dynamischen Präzisionsvoltmeter verglichen, und die sich zeigenden Abweichungen wurden an den jeweiligen Angaben der ersteren als Korrektur angebracht.

I. Kontrollversuche und mögliche Fehler.

Die Beobachtungen sind in folgender Weise ausgeführt. Zunächst wurde bei kontinuierlich mit bekannter Geschwindigkeit strömendem Gas das kleine Netz mit dem Elektrometer nach vorheriger Erdung isoliert, dann durch Betätigung des Foucaultschen Unterbrechers 10 (in anderen Fällen 20 und darüber) Entladungen erzeugt und die durch die aufgenommenen Träger hervorgerufenen Elektrometerausschläge, die nach Aufhören der Entladungen einen konstanten Endwert erreichten, abgelesen. Die Ausschläge sind proportional der Menge der durch die elektrische Kraft gegen den Gasstrom hingetriebenen und vom Netz *C* aufgenommenen Träger. Wenn die Platte *B* (Fig. 1) dieselbe Spannung hat wie *A*, d. h. Null, so gibt das Elektrometer keinen Ausschlag. Ebenfalls kann man keinen Ausschlag bemerken bei allen kleinen Spannungen der Platte *B*, und das zeigt an, daß die elektrische Kraft nicht genügend groß ist, um einem Träger eine größere Geschwindigkeit als die des Gases zu erteilen. Von einer gewissen Spannung ab, die von der Gasgeschwindigkeit und dem Netzabstand abhängt (vgl. weiter unten), fängt das Elektrometer an, Ausschläge zu geben, die graphisch als eine zur *x*-Achse etwas geneigte gerade Linie sich darstellen lassen (Fig. 4).

Bei weiterer Vergrößerung des Feldes erleidet die Kurve eine Krümmung und verläuft schließlich geradlinig, parallel zur x -Achse.

Um ein solches Verhalten der Kurve¹⁾ zu erklären, ist die

CO₂ Negativer Träger. Netzabstand = 1 cm.

Fig. 4.

1) Hier muß noch erwähnt werden, daß man zu solchem Verhalten nur dann gelangt, wenn der Netzkondensator so beschaffen ist, daß das elektrische Feld im Meßraume *homogen* und die Geschwindigkeitsverteilung des Gases über die ganze Fläche des kleinen Netzes *gleichmäßig* ist. Die erste Forderung wurde durch Anwendung des Schutzringes, Vergrößerung der Kondensatorplatten im Vergleich zu ihrer Entfernung und besonders durch feines und richtiges Einpassen des Netzes C in die Öffnung des Schutzringes erfüllt. Der zweiten Forderung wurde durch Anwendung feiner Netze und Verkleinerung des Netzes C im Vergleich zu der Rohrweite R (Fig. 2) Rechnung getragen. Die Anwendung eines kleinen Meßnetzes führte zugleich zur Eliminierung des möglichen Einflusses von Wirbeln, die bei großen Geschwindigkeiten im Gas entstehen könnten. (Über die Notwendigkeit großer Gasgeschwindigkeiten, um den Diffusionseinfluß zu eliminieren, vgl. weiter unten.) Für Konstanz der Gasgeschwindigkeit sorgte das Wasserventil (Fig. 3). Ist das elektrische Feld oder der Gasstrom nicht genügend homogen (oder die Gasgeschwindigkeit nicht konstant), so erhält man kleine Ausschläge des Elektrometers auch bei kleineren Spannungen, und der Kurvenverlauf ist dann dem ähnlich, den Hr. J. Zeleny (l. c.) beobachtet hat. Deshalb benutzte er den Netzkondensator nicht zur absoluten Messung der Trägerbeweglichkeit (diese wurde von ihm mit Hilfe des Zylinderkondensators ausgeführt), sondern (wie oben erwähnt wurde) nur zur Messung des Verhältnisses der Beweglichkeit negativen und positiven Träger.

Annahme gemacht, daß sofort nach der Trägererzeugung während einer kurzen Zeit (vgl. weiter unten) ein Gemisch von Trägern verschiedener Größe entsteht, von denen die kleinsten, wie vorliegende Messungen ergeben haben, einzelne Moleküle¹⁾ und die größten einen Komplex von 5—6 Molekülen darstellen, wie sie von Hrn. A. Becker kurze Zeit nach der Erzeugung als vorherrschend gefunden wurden.²⁾ Größere Träger finden sich in vorliegenden Versuchen nicht, und sie werden auch nach längerer Zeit, wie dies aus Hrn. A. Beckers Versuchen hervorgeht, nicht gebildet. Da die Gase bei den gegenwärtigen Versuchen staubfrei filtriert waren und Röntgensche Strahlen keine (großen) Nebelkerne erzeugen, so entspricht dies ganz dem Resultate der Herren P. Lenard u. C. Ramsauer, daß große Träger nur durch Anlagerung an Nebelkerne entstehen.

Ob die gefundenen aus einigen wenigen Molekülen bestehenden Träger aus entsprechend sehr kleinen, in unseren Gasen vorhandenen, oder durch die Strahlen gebildeten Nebelkerne (festen oder flüssigen Aggregatzustands) gebildet sind, oder ob sie bloße Zusammenlagerung von Gasmolekülen darstellen, muß eine offene Frage bleiben.³⁾

Der bei einer gewissen kleinsten Spannung auftretende Ausschlag rührt danach von den allerkleinsten Trägern her; denn nur diese können durch das Feld eine größere Geschwindigkeit als die des Gasstromes bekommen, während alle anderen vom Gasstrom weggeblasen werden.

Bei größerer Spannung werden außer den schnellsten auch die langsameren (größeren) Träger ans Netz gelangen und den Elektrometerausschlag vergrößern.

Ist endlich die Spannung so groß, daß auch die größten (gewöhnlich beobachteten) Träger imstande sind, sich gegen den Gasstrom zu bewegen, so werden die Ausschläge bei allen noch größeren Spannungen konstant bleiben, da dann alle

1) Daß einzelne Moleküle, vielleicht Atome als kleinste Träger vorhanden sind, haben auch schon die ersten Versuche von Hrn. P. Lenard (Ann. d. Phys. 3. p. 314. 1900), ebenfalls mit Hilfe des Netzkondensators, gezeigt.

2) A. Becker, l. c. p. 227. 1911.

3) Vgl. P. Lenard u. C. Ramsauer, Heidelb. Akad. 16. Abh. p. 20. 1911.

erzeugten Träger durch das Feld an das Netz C getrieben werden. Der Punkt, wo die Kurve die x -Achse schneidet, zeigt also die Spannung an, bei welcher die schnellsten Träger die Geschwindigkeit erreichen, die gleich ist der Gasgeschwindigkeit.

Im speziellen Falle der Fig. 4, welche für Kohlensäure aufgenommen war, schneidet die Kurve die x -Achse (bei 1 cm Netzabstand) bei 12 Volt, und da die Gasgeschwindigkeit 68 cm betrug, kann man die Beweglichkeit der kleinsten negativen Träger (die Spannung an B war negativ) in Kohlensäure berechnen

$$\omega_- = \frac{\text{Gasgeschwindigkeit}}{\text{Schnittpunktsabstand} : \text{Netzabstand}} = \frac{68}{12:1} = 5,7 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} : \frac{\text{Volt}}{\text{cm}}.$$

Die Beweglichkeit der gewöhnlichen negativen Träger in Kohlensäure ist bisher bekanntlich gleich $0,8 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} : \frac{\text{Volt}}{\text{cm}}$ gefunden worden.

Da die allerschnellsten Träger, soviel mir bekannt ist, mit einem gerade für solche Träger geeigneten Netzkondensator bisher nicht untersucht worden sind, erschien eine Reihe von Kontrollversuchen mit einem und demselben Gas notwendig, wobei die Geschwindigkeit des Gases sowohl bei unveränderten wie auch bei verschiedenen Netzabständen in weiten Grenzen variiert wurde.

Endlich war es noch wichtig, den Einfluß der Intensität der Röntgenstrahlen, der Breite des Strahlenbündels und der Entfernung des kleinen Netzes von dem Erzeugungsorte zu untersuchen. Alle diese Kontrollversuche wurden an negativen Trägern in Kohlensäure durchgeführt. Da es sich um die schnellsten Träger handelt, so wurde im folgenden meistens nur der erste geradlinige Teil der Beweglichkeitskurven aufgenommen, um den Schnittpunkt feststellen zu können.

Verschiedene Gasgeschwindigkeiten bei unverändertem Netzabstande.

Wenn bei der Aufnahme der Beweglichkeitskurve eine größere Gasgeschwindigkeit als im vorhergehenden Falle angewendet wird, dann muß entsprechend auch die elektrische Kraft größer sein, die imstande ist, einen Träger gegen den schnelleren Gasstrom zu treiben. Darum muß in diesem Falle eine Schnittpunktsverschiebung stattfinden, und zwar proportional

der Geschwindigkeitsänderung des Gases. Zur Prüfung solcher Abhängigkeit wurden bei gleichem Netzabstande ($= 3$ cm) Bewegunglichkeitskurven für verschiedene Gasgeschwindigkeiten aufgenommen (Fig. 5).

CO₂ Negative Träger. Netzabstand = 3 cm.

Fig. 5.

Tabelle I.

Kohlensäure. Netzabstand = 3 cm.

	Gasgeschwindigkeit V in cm · sec ⁻¹	Schnittpunktsabstand P in Volt	$P: V$
—	6,2	2	0,32
Kurve I	9,0	4	0,44
„ II	36,0	18	0,50
„ III	49,0	25,5	0,52
„ IV	58	31,5	0,54
„ V	102	54	0,53
—	122	68	0,56

In der Tab. I sind die Gasgeschwindigkeiten und die entsprechenden Schnittpunktsabstände angeführt, und in der letzten Kolonne sind die Verhältnisse beider Größen angegeben, aus welchen zu ersehen ist, daß im Geschwindigkeitsintervalle von 25—122 cm/sec (die größte Geschwindigkeit, welche angewendet wurde) in den Grenzen der Beobachtungsfehler zwischen dem Schnittpunktsabstände und der Gasgeschwindigkeit in Wirklichkeit Proportionalität besteht. Die merkbare Abweichung von

der Proportionalität bei kleinen Geschwindigkeiten ist durch den Einfluß der Diffusion zu erklären. Die Träger werden in einer durch Röntgenstrahlen bestrahlten dünnen Gasschicht a erzeugt (Fig. 6). Infolge der Diffusion wird ein Teil der Träger allmählich nach allen Richtungen auch gegen den Gasstrom zerstreut, und zwar diffundieren gegen den Gasstrom um so mehr Träger und es wird eine um so größere Strecke von diesen zurückgelegt, je kleiner die Gasgeschwindigkeit ist.

Infolgedessen sind bei kleiner Gasgeschwindigkeit die Träger, welche gegen den Gasstrom diffundieren, imstande, schon bei kleinerer Spannung das Meßnetz zu erreichen, als die, die nötig wäre, auch alle anderen Träger derselben Gattung (Zeichen) zum Netz C zu treiben. Das Resultat dieser Wirkung ist die Schnittpunktsverschiebung der Beweglichkeitskurve in der Richtung der abnehmenden Spannungen. Um solchen Einfluß der Diffusion auf die Beweglichkeitsmessungen zu verhindern, wird die Gasgeschwindigkeit vergrößert, bis die Lage des Schnittpunktes bei weiterer Vergrößerung proportional mit ihr sich ändert. Dann ist die Diffusion eliminiert, denn die Überlegungen, welche die Proportionalität fordern, sind ohne Rücksicht auf die Diffusion angestellt.

Die Verkleinerung des Meßnetzes und zugleich des gaszuführenden Rohres R (Fig. 1) ermöglichte es, die Gasgeschwindigkeit bis 122 cm pro Sek. (und noch darüber) zu vergrößern.

Verschiedene Gasgeschwindigkeiten bei verschiedenen Netzabständen.

Analog den vorhergehenden Beobachtungen wurde jetzt die Lage des Schnittpunktes der Beweglichkeitskurven bei verschiedenen Netzabständen bestimmt, um sich zu überzeugen, daß auch zwischen der Abszisse des Schnittpunktes und dem Netzabstande Proportionalität besteht, vorausgesetzt, daß die Gasgeschwindigkeiten in beiden Fällen die gleichen sind. Und da im vorhergehenden Falle die Proportionalität zwischen Schnittpunktsabstand und Gasgeschwindigkeit bei unverändertem Netzabstand schon festgestellt worden ist, so muß im

Fig. 6.

allgemeinen Falle für verschiedene Netzaabstände und verschiedene Gasgeschwindigkeiten folgende Beziehung stattfinden:

$$\frac{\text{Schnittpunktsabstand}}{\text{Netzaabstand} \times \text{Gasgeschwindigkeit}} = \text{Konstanz. } ^1)$$

In der Tab. II sind die Schnittpunktsabstände P , die entsprechenden Gasgeschwindigkeiten V für verschiedene (1, 2, 3 und 7 cm) Netzaabstände und in der letzten Kolumne die Verhältnisse $P/d \times V$ angegeben.

Tabelle II.

Kohlensäure.

Netzaabstand d	Gasgeschwindigkeit V in $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$	Schnittpunktsabstand P in Volt	$\frac{P}{d \times V}$
1 cm	51	9	0,18
	57	9,5	0,17
	68	12	0,18
2 cm	58	19	0,16
	68	23	0,17
	78	28	0,18
	87	30	0,17
3 cm	36	18	0,17
	49	25,5	0,17
	58	31,5	0,18
	102	54	0,18
7 cm Beobachtungen mit dem großen Netz- kondensator	48	56	0,17
	64	84,2	0,19
	83	95,2	0,16

Trägerdichte. Zur Aufklärung der Frage, ob nicht eine Änderung der Trägerdichte die Lage des Schnittpunktes verändert, wurde die Intensität der Röntgenstrahlen durch Einschieben einer 0,5 mm dicken Aluminiumplatte geschwächt und

¹⁾ Diese Beziehung gilt selbstverständlich nur für diejenigen Gasgeschwindigkeiten, bei welchen die Diffusion keinen merklichen Einfluß hat.

einmal die Beweglichkeitskurve für die geschwächten Strahlen und das andere Mal zum Vergleich eine Kurve für ungeschwächte Strahlen (bei gleicher Gasgeschwindigkeit) aufgenommen (Kurven I und II). Wie aus der Fig. 7 zu ersehen ist, hat sich die Lage des Schnittpunktes dabei nicht geändert, obwohl eine Änderung der Trägerdichte im Verhältnis 1:8 stattgefunden hat.

Da nun die Rekombination vom Quadrate der Trägerzahl abhängt, so ist aus dieser Beobachtung zu schließen, daß die Rekombinationen bei der Beweglichkeitsmessung aus dem Schnittpunktsabstände keine merkwürdige Rolle spielt.

Ebenso zeigte keinen nachweisbaren Einfluß auf die Schnittpunktslage die Änderung der Breite des Strahlenbündels, wovon man sich überzeugen konnte durch Anwendung von Blenden mit verschiedenbreiten Spalten.

Trägeralter. Nach dieser Reihe von Kontrollversuchen, welche an *einem* Gase (Kohlensäure) und an *einer* Sorte von Trägern (den negativen) angestellt worden sind und welche den Einfluß der einzelnen in die Beweglichkeitsmessung eingehenden Faktoren aufgeklärt haben, wurden diese Messungen in verschiedenen Gasen ausgeführt. Vor Ausführung dieser Messungen ist es aber notwendig, einige Versuche, welche mit der Frage über das Trägeralter zusammenhängen, zu erwähnen.

Es ist zu beachten, daß eine Änderung des Abstandes zwischen dem Meßnetz und dem Röntgenstrahlbündel unvermeidlich eine Änderung der Zeit, während der die Träger das Netz erreichen, zur Folge hat. Deshalb fängt das Netz bei der Änderung des zu durchlaufenden Weges die Träger verschiedenen Alters auf. Um den Einfluß des Trägeralters auf die

CO₂ Negative Träger. Netzabstand 3 cm.
Gasgeschwindigkeit 48 cm/sec.
I geschwächt durch Al-Platte,
II ungeschwächt.

Fig. 7.

Beweglichkeitskurve zu untersuchen, wurden die Beobachtungen mit Hilfe des großen Kondensators, dessen Netze in einer Entfernung von 7 cm aufgestellt waren, ausgeführt. Bei einer konstanten Gasgeschwindigkeit ($V = 48 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$) wurden die Beweglichkeitskurven für verschiedene Netzentfernungen (von 1—6 cm) vom Strahlenbündel aufgenommen. Die Schnittpunktabstände für vier verschiedene Netzentfernungen sind in der Tab. III angegeben.

Tabelle III.

Großer Kondensator. Kohlensäure.
 Netzentfernung $d = 7 \text{ cm}$. Gasgeschwindigkeit $V = 48 \text{ cm/sec}$.

Netzentfernung vom Erzeugungsorte	Schnittpunkts- abstand P	Trägerbeweglichkeit ω
ca. 1 cm	59 Volt	$5,7 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1} : \text{Volt} \cdot \text{cm}^{-1}$
„ 3 „	84,2 „	4,0 „ „
„ 5 „	105,2 „	3,2 „ „
„ 6 „	120,2 „	2,8 „ „

Wie aus dieser Tabelle ersichtlich ist, führt die Vergrößerung der Entfernung, d. h. die Zeitverlängerung des Durchlaufens, eine Verschiebung des Schnittpunktes in der Richtung der größeren Spannungen nach sich, was einer Verminderung der Trägerbeweglichkeit entspricht, wie das aus der letzten Kolumne der Tabelle zu ersehen ist.

Eine solche Verschiebung des Schnittpunktes könnte man durch die Annahme erklären, daß die schnellsten Träger nur eine kurze Lebensdauer haben, d. h., daß sie als einzelne getrennte Moleküle nur während einer gewissen kurzen Zeit¹⁾ existieren können, um nachher durch Anlagerung zu einem größeren Teilchen sich zu verwandeln und infolgedessen mit einer kleineren Geschwindigkeit sich bewegen zu können.

Wenn die Entfernung des Netzes so groß geworden ist, daß die Zeit des Durchlaufens der Strecke vom Erzeugungsorte größer ist, als die Lebensdauer der schnellsten Träger, so werden sie schon unterwegs sich vergrößern und sich langsamer bewegen, so daß sie bei derselben Spannung das Netz

1) Eine genaue Berechnung dieser Zeit ist dadurch erschwert, daß ein Teil des Weges, der ebenfalls unbekannt ist, von freien Quanten zurückgelegt wird, bevor sie von den Gasmolekülen aufgenommen werden.

überhaupt nicht mehr erreichen können. Nur bei größerer Spannung wird die Geschwindigkeit dieser Träger wieder die Gasgeschwindigkeit übertreffen.

Daß auch bei diesen Versuchen der Einfluß der Diffusion ausgeschaltet ist, zeigte sich dadurch, daß weiter vergrößerte Gasgeschwindigkeit den beobachteten Wert von ω für die schnellsten Träger unverändert ließ. Es dürfte damit ein Anschluß der hier vorwiegend beobachteten Beweglichkeitswerte an die mit anderen Methoden in der Literatur meist gefundenen kleineren Werte gewonnen sein.

Nach dieser Anschauung ist die Verschiebung des Schnittpunktes durch das Dickerwerden der schnellsten Träger verursacht. Eine eingehende Untersuchung dieses Gegenstandes würde — wie es scheint — die Struktur der Träger in verschiedenen Stadien ihrer Bildung und den zeitlichen Verlauf ihres Dickerwerdens aufklären können.

II. Beweglichkeit der schnellsten Träger und ihre Größe in verschiedenen Gasen.

Die Beweglichkeitsmessungen der positiven bzw. negativen Träger wurden außer in Kohlensäure noch in Luft, Sauerstoff und Stickstoff ausgeführt. Dabei wurden für jedes Gas die Beweglichkeitskurven bei den verschiedenen Gasgeschwindigkeiten aufgenommen, um das Geschwindigkeitsintervall zu finden, in welchem die Konstanz der berechneten Beweglichkeit besteht, während alle anderen Bedingungen für alle Gase dieselben blieben, und zwar der Netzabstand (des kleinen Kondensators) gleich 3 cm, die Netzentfernung von den Röntgenstrahlen gleich 1—1,5 cm.¹⁾

Die aus diesen Kurven entnommenen Schnittpunktsabstände, die entsprechenden Gasgeschwindigkeiten und die daraus berechneten Beweglichkeiten der negativen und der positiven Träger sind in der Tab. IV angeführt.

1) Bei der Bestimmung der Lage des Strahlenbündels mit Hilfe eines gewöhnlichen Bariumplatincyanschirms konnte man bemerken, daß der helle Streifen bei einzelnen Entladungen um einige Millimeter nach der einen oder nach der anderen Seite sich verschieben kann.

Tabelle IV. Netzabstand $d = 3$ cm.

Gas		Gasgeschwindigkeit V in $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$	Schnittpunkts- abstand P in Volt	Beweglichkeit $\omega = \frac{V \cdot d}{P}$ in $\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1} : \text{Volt} \cdot \text{cm}^{-1}$
Kohlensäure	Negative	6,2	2	9,3
	Träger	9,0	4	7,0
	(Aus Kurven	36	18	6,0
	der Fig. 5	49	25,5	5,7
	entnommen)	58	31,5	5,5
		102	54	5,6
		122	68	5,4
	Positive	36	19,5	5,5
Luft	Träger	52	27,4	5,7
		78,5	40	5,9
	Negative	9,0	2	18,5
	Träger	18,1	4,5	12,1
		31,0	9	10,3
		46	14	9,8
		60	17	10,5
		84	22,4	10,1
Sauerstoff	Positive	31	13	7,5
	Träger	46	17	7,3
		64	25	7,7
	Negative	9	2	14
	Träger	33	9	11
		48	13,5	10,1
		62	17,5	10,6
	Positive	9	3	9
Stickstoff	Träger	34	14	7,2
		48	18	8
		62	24	7,7
	Negative	7,3	1,9	11,5
	Träger ¹⁾	19,5	5,7	10,3
		39	10,8	10,0
		52	17	9,1
		63	19,2	9,8
	Positive	19,5	6,5	9,0
	Träger	39	17	7,0
		50	23	6,5
		60	24,3	7,4

1) Da der benutzte Stickstoff (aus Bombe) nicht von Sauerstoff-beimischung befreit war, so ist die beobachtete Beweglichkeit negativer Träger eigentlich den O_2 -Molekülen zuzuschreiben, weil nach Versuchen von Hrn. J. Franck (Verh. d. Deutsch. Physik. Ges. XII. Jahrg. p. 613. 1910) folgt, daß die negativen Elementarquanten an O_2 viel stärker als an N_2 -Molekülen festgehalten werden. Deswegen konnten hier die von Hrn. J. Franck gefundenen sehr großen Beweglichkeiten der negativen Träger auch nicht beobachtet werden.

Der Zusammenhang der so berechneten Trägerbeweglichkeit in verschiedenen Gasen mit der Geschwindigkeit des Gasstromes ist in der Fig. 8 graphisch dargestellt. Aus diesen Kurven kann man die Geschwindigkeitsgrenzen, innerhalb welcher die Konstanz der Trägerbeweglichkeit besteht, erkennen.

Fig. 8.

Aus der Beweglichkeit kann man auf die Größe der Träger schließen. Wie von Hrn. Lenard gezeigt worden, ist nämlich für den Fall, daß die Masse eines Trägers gleich der Masse eines Gasmoleküls ist

$$\omega = \frac{3}{2\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{e}{300 D W \cdot s^2},$$

wo s die Radiensumme von Träger und Gasmolekül, D die Dichte des Gases, W die mittlere Geschwindigkeit der Molekularbewegung, ω die Beweglichkeit des Trägers und e die Elementarladung¹⁾ ist.

1) Es ist hierfür in allen folgenden Angaben der mit besonders großer Genauigkeit von Hrn. R. A. Millikan (Physik. Rev. 32. p. 349. 1911) festgestellte Wert $e = 4,891 \times 10^{-10}$ stat. Einh. benutzt worden.

Tabelle V.

Gas		Luft	CO ₂	O ₃	N ₂	H ₂
Beobachtete Trägerbeweglichkeit ω in cm·sec ⁻¹ ; Volt·cm ⁻¹	{ Positive Träger	7,5	5,7	7,6	7,0	(105) ¹⁾
	{ Negative "	10,1	5,8	10,3	(9,5) ⁸⁾	(152)
Trägergröße $r \times 10^6$ cm berechnet nach der Lenardschen Formel	{ Positive Träger	21,5	19,2	20,8	22,9	(7,9)
	{ Negative "	16,6	18,9	15,8	(17,6)	(4,7)
Molekülliradien $R \times 10^6$ cm	berechnet aus der inneren Reibung der Gase nach der Formel $R^2 = \frac{0,15483}{N \cdot \eta} \sqrt{\frac{p \cdot D}{\pi^3}}$ ²⁾	14,8	18,2	14,2	14,9	11,1
	berechnet aus dem maximalen absorbierenden Querschnitt bei 1 mm Hg für 6 Volt Kathodenstrahlen ³⁾	16,2	17,3	12,95 ⁴⁾	17,5 ⁴⁾	19,6
	berechnet aus der Dichte im flüssigen Zustande ⁵⁾	21,9	22,8	21,9	23,8	22,8
Spezifisches Gewicht bei 18° C. und 760 mm Hg $D \times 10^6$ g·cm ⁻³		1213	1843	1340	1176	84,44
Mittlere Molekulargeschwindigkeit bei 18° C. ⁶⁾ $\bar{W}$ in cm·sec ⁻¹		46060	37370	43820	46770	174600
Koeffizient der inneren Reibung ⁷⁾ für $t = 18^\circ$ C. $\eta \times 10^7$ g·cm ⁻¹ ·sec ⁻¹		1791	1435	1995	1727	868,6

- 1) Über die Versuche im Wasserstoff vgl. weiter unten (III. Teil).
- 2) Wo D die Dichte, η der Koeffizient der inneren Reibung (wie oben, letzte Zeile der Tabelle), N die Anzahl der in der Volumeneinheit beim Druck p und entsprechender Temperatur ($t = 18^\circ \text{C.}$) enthaltenen Gasmoleküle ist. Bei 0° und 760 mm Hg ist die Molekülanzahl nach Millikan (l. c.) $N_0 = 2,644 \times 10^{19}$.
- 3) Entnommen bei P. Lenard, Ann. d. Phys. 12. p. 703. 1903.
- 4) Entnommen bei J. Robinson, Ann. d. Phys. 31. p. 769. 1910.
- 5) Berechnet nach der Beziehung (vgl. auch A. Becker, Heidelb. Akad. 7. p. 16. 1911).

$$R^3 = \frac{3M \cdot C}{4\pi \cdot q},$$

wo M das Molekulargewicht, q die Dichte des Gases im flüssigen Zustande und C das Gewicht des Wasserstoffatoms (nach Millikan $C = 1,71 \cdot 10^{-24} \text{ g.}$).

- 6) Berechnet aus der Dichte D und dem Druck p des Gases bei 18°C. nach der Formel

$$p = \frac{\pi}{8} D W^2 \quad (\text{vgl. O. E. Meyer, Kinetische Theorie der Gase 1899}).$$

- 7) Berechnet nach der Formel (Sutherland, Phil. Mag. 36. p. 507. 1893)

$$\eta_t = \eta_0 \frac{1 + \alpha \frac{C}{D}}{1 + \frac{\alpha}{g}},$$

wo die Werte für die Konstante C und für η bei 0° für Luft und Kohlensäure bei P. Breitenbach (Ann. d. Phys. 5. p. 168. 1901), für Sauerstoff und Stickstoff bei F. Kleint (Diss. Halle 1904) und für Wasserstoff bei H. Markowski (Diss. Halle 1903).

8) Dieser Wert der Beweglichkeit wird, wie oben schon erwähnt wurde, wohl den O_2 -Molekülen zuzuschreiben sein. Die unter dieser Annahme durchgeführte Berechnung des Trägerradius führt zu $r = 16,4 \times 10^{-9} \text{ cm.}$, an Stelle der oben verzeichneten $17,6 \cdot 10^{-9} \text{ cm.}$ Der Vergleich der so erhaltenen drei Werte für die Größe des negativen Sauerstoff-trägers aus Luft, Sauerstoff und Stickstoff zeigen befriedigende Übereinstimmung.

Die Formel ergibt direkt die Radiensumme s . Handelt es sich um Träger, welche unter unelektrischen Gasmolekülen gleicher Art sich bewegen (z. B. um Sauerstoffträger in Sauerstoffgas), so könnte der Molekülradius als $\frac{1}{2}s$ gerechnet werden. Rationeller erscheint es aber, von vornherein zwischen den unelektrischen und elektrisch geladenen Molekülen (Trägern) zu unterscheiden, den Radius der unelektrischen Moleküle aus der inneren Reibung der Gase zu entnehmen¹⁾ und nur den Trägerradius als unbekannt anzusehen und aus der Differenz zu berechnen. Die so berechneten Trägerradien finden sich in der Tab. V, zusammen mit den benutzten Daten für D , W und η (Koeffizient der inneren Reibung); für die Elementarladung ist, wie erwähnt, $e = 4,891 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische CGS.-Einheiten eingesetzt. Außerdem sind in der Tabelle die Radien der Gasmoleküle, nach den drei oben erwähnten Methoden berechnet (aus der Dichte im flüssigen Zustande, aus der inneren Reibung der Gase und aus der Absorption langsamer Kathodenstrahlen), angegeben.

Wie aus dieser Tabelle zu ersehen ist, stimmen die aus den beobachteten Beweglichkeiten berechneten Trägergrößen mit den berechneten Radien der Gasmoleküle ziemlich gut überein, woraus der Schluß zu ziehen ist, daß die mit dem Netzkondensator beobachteten schnellsten Träger als einzelne Gasmoleküle aufzufassen sind.

Es ist noch besonders die gute Übereinstimmung für Kohlensäure zu betonen. Der Größenunterschied zwischen den negativen und positiven Trägern würde wohl durch gleichzeitiges Vorhandensein freier Elementarquanten zu erklären sein, welche die mittlere Beweglichkeit der negativen Träger zu groß erscheinen lassen.²⁾ Daher sind die aus ω berechneten Werte eigentlich als die wahren Trägergrößen zu betrachten. Daß die Werte bei allen untersuchten Gasen (mit Ausnahme des Wasserstoffs) größer sind als die aus der Reibung berechneten Moleküldimensionen, kann am wahrscheinlichsten als Folge der elektrischen Ladung aufgefaßt werden.

1) Die innere Reibung ist ein Vorgang gleicher Art wie die Wanderung der Träger; deshalb wurde der Berechnung aus der inneren Reibung hier der Vorzug gegeben.

2) Vgl. P. Lenard u. C. Ramsauer, Heidelb. Akad. 32. Abh. p. 16. 1910.

Vergleichung der verschiedenen Formeln für die Wanderungsgeschwindigkeit. Es ist im vorstehenden bisher stets die von Hrn. Lenard angegebene Formel für die Wanderungsgeschwindigkeit zur Berechnung der Trägergröße benutzt worden. Was die anderen in der Literatur vorfindlichen Formeln gleicher Art anlangt, so haben dieselben mindestens bei schweren Trägern, wie schon mehrfach erkannt wurde, zu Widersprüchen geführt.¹⁾ Es ist nun hier Gelegenheit, und für unseren vorliegenden Zweck auch von Interesse, nachzusehen, wie diese Formeln in dem hier vorliegenden Falle der kleinen, nicht schweren Träger sich verhalten. Ein so großer Unterschied, wie für Träger von großer Masse, besteht zwischen den verschiedenen Formeln nicht; sondern es handelt sich in dem Falle der leichten Träger nur um Faktorenverschiedenheit im Verhältnis $1 : \sqrt[2]{\frac{2}{3}} : \frac{2}{3} : \sqrt[1]{\frac{1}{3}}$ bei Lenard bzw. Langevin, Riecke, J. Thomson. Aber selbst diese relativ geringfügigen Unterschiede kommen für unseren Fall, wie man aus der unten befindlichen Zusammenstellung sieht, schon sehr in Betracht, und es ist daher hier eine Gelegenheit, diese Formeln an der Erfahrung, besonders für leichte Träger, besser zu prüfen, als es bisher möglich war.

Es sind daher die nach den verschiedenen Formeln aus dem hier beobachteten ω -Werte berechneten Radien der positiven Träger für Kohlensäure und Sauerstoff²⁾ in der Tab. VI zusammengestellt, wobei wieder von der durch die Formeln unmittelbar gelieferten Summe von Träger- und Molekülradius der letztere mit seinem aus der Reibung gefundenen Werte abgezogen ist.

Tabelle VI.

Gas	Molekülradius berechnet nach Reibung $R \times 10^9$ cm	Radien der positiven Träger ($r \times 10^9$ cm) berechnet nach den Formeln von			
		Lenard	Langevin	Riecke	J. Thomson
CO ₂	18,2	19,2	12,4	6,8	8,4
O ₂	14,2	20,8	14,5	9,3	6,1

1) Näheres darüber vgl. A. Becker, Ann. d. Phys. 36. p. 217. 1911.

2) Für die anderen Gase wurden ganz entsprechende Abweichungen gefunden.

Wie aus dieser Tabelle zu ersehen ist, geben die Lenardschen und Langevinschen Formeln nahe an den Molekülradien liegende Werte an, während die zwei anderen Formeln, insbesondere die Thomsonsche, zu kleine Werte geben. So fällt z. B. für CO_2 die nach der letzten Formel berechnete Trägergröße 5—6 mal kleiner aus, als dem Wert für ein CO_2 -Molekül (nach einer zuverlässigen Methode erhalten, vgl. Tab. V) entspräche, ein schwer erklärliches Resultat, da es nicht einzusehen ist, wie die Moleküle als Elektrizitätsträger so viel mal (im Volumen 100—200 mal) kleiner sein sollten als im unelektrischen Zustande. Eine geringe Vergrößerung des Durchmessers, wie sie sich nach der benutzten Formel von Hrn. Lenard ergibt, erscheint verständlich, da das bestehende Kraftfeld, das dem Träger zugehört Raum einnehmen kann, der außerhalb des gewöhnlichen Molekülvolumens liegt.

Also führen die übrigen Formeln nicht nur bei großen Trägermassen, wie z. B. bei den radioaktiven Atomen, oder Rb bzw. Cs in Flammen, oder CCl_4 , sämtlich zu Unstimmigkeiten, sondern es tritt dies auch (ausgenommen hier nur die Langevinsche Formel) in dem vorliegenden Falle der kleinsten Träger ein.

Beimischungen. Nach der Ausführung der vorhergehenden Messungen war es notwendig, die Frage über den möglichen Einfluß der Verunreinigung der aus den käuflichen Bomben entnommenen Gase auf die Trägerbeweglichkeit zu berühren.

Dazu wurden die Beweglichkeitsmessungen in Luft einmal ohne, dann mit einer Beimischung von etwa 2 Proz. von Wasserstoff ausgeführt (über die Messungen in H_2 selbst vgl. weiter unten). Aus der erhaltenen Kurve (Fig. 9) ist zu schließen, daß solche Beimischung zu der Luft keinen in den Grenzen der Beobachtungsfehler merklichen Einfluß hat. Ebenso wurde die Beweglichkeit der Kohlensäureträger durch geringe Beimischung von Wasserstoff nicht beeinflußt.

Das berechtigt einigermaßen zur Annahme, daß die durch geringe Beimischung auch der anderen Gase hervorgerufene mögliche Verunreinigung der zur Untersuchung aus Bomben entnommenen Gasen (mit Ausnahme des Wasserstoffs) die Resultate der Messungen nicht merklich beeinflußt. Nur bei

größerem Prozentgehalt von H_2 war eine Vergrößerung der Beweglichkeit zu beobachten, was durch die Verminderung der Dichte des Gasgemisches zu erklären ist (vgl. weiter unten).

Fig. 9.

Die Messungen in Bombenwasserstoff selbst ergaben für die Beweglichkeit der positiven Träger im Mittel

$$\omega_+ = 68 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1} : \text{Volt} \cdot \text{cm}^{-1}$$

und für die der negativen

$$\omega_- = 107 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1} : \text{Volt} \cdot \text{cm}^{-1}.$$

Es muß aber hier erwähnt werden, daß die Messungen in Wasserstoff auf zweierlei Schwierigkeiten stießen. Erstens zeigte sich, daß der Gesamteffekt hier nur etwa $\frac{1}{200}$ des Effektes in Luft ausmacht, so daß infolgedessen die Messungen nur mit kleinerer Genauigkeit ausgeführt werden konnten. Zweitens wurde gefunden, daß eine Beimischung von etwa 2—3 Proz. (nach Volumen) eines fremden Gases, z. B. Luft, einen merklichen Einfluß auf die Träger hervorruft, indem eine Abnahme der Beweglichkeit zu beobachten war.

Direkte Dichtebestimmung (durch Wägen) des aus der Bombe entnommenen, getrockneten und filtrierten Wasserstoffs

ergab den Wert 0,0875 (Luft = 1), während die Dichte des reinen Wasserstoffs gleich 0,0695 ist. Nimmt man, was wahrscheinlich ist, als Ursache der vergrößerten Dichte eine Beimischung von Luft an, so findet sich hierfür etwa 2 Proz. (nach Volumen). Es sind hierdurch auch die oben erwähnten Beweglichkeitswerte wohl als für reinen Wasserstoff zu klein gefunden zu betrachten.

Da aber bei der angewandten Methode es nicht möglich war, reinen Wasserstoff in genügend großen Mengen zu benutzen, so wurde versucht, die Trägerbeweglichkeit in Wasserstoffgemischen von verschiedenem Gehalt an Luft zu beobachten und durch Extrapolation wenigstens einen angenäherten Wert für die Beweglichkeit im reinen Wasserstoff zu bestimmen, um daraus die angenäherte Größe der Wasserstoffträger zu berechnen. Um aber über die Trägerbeweglichkeit in einem Gasgemisch Rechenschaft geben zu können, ist es notwendig, zuerst die oben erwähnte Lenardsche Formel zu erweitern, um sie auch auf die Gasgemische anwenden zu können.

III. Gasgemische.

Theoretisches. Es seien m , M_1 , M_2 die Massen des Trägers und der Moleküle der im Gemische sich befindenden zweierlei Gase, r , R_1 , R_2 seien die Radien derselben (als Kugeln angenommen). Ist die augenblickliche Trägergeschwindigkeit unmittelbar vor einem Zusammenstoße mit einem Molekül gleich v , so wird im Falle einer Art von Gasmolekülen die nach dem Stoße übrig bleibende Geschwindigkeitskomponente in der Richtung von v im Mittel für alle vorkommenden Arten des Zusammenstoßes, wie Hr. Lenard¹⁾ angegeben hat, gleich $vm/(m + M_1)$.

Im Gasgemische stößt ein jeder Träger mit zweierlei Arten von Molekülen zusammen, und es sei Z_1 die Zahl der Zusammenstöße pro Sekunde mit einer Art und Z_2 die mit der zweiten Art von Gasmolekülen, so daß die Gesamtzahl der Zusammenstöße pro Sekunde

$$Z = Z_1 + Z_2 \text{ ist.}$$

1) P. Lenard, l. c. p. 312. 1900.

Dann ist die Geschwindigkeitskomponente nach dem Stoße im Mittel gleich

$$v \left(\frac{Z_1}{Z} \frac{m}{m + M_1} + \frac{Z_2}{Z} \frac{m}{m + M_2} \right)$$

und die Verminderung der augenblicklichen Wanderungsgeschwindigkeit v durch einen Zusammenstoß ist daher im Mittel gleich

$$v \left(\frac{Z_1}{Z} \frac{M_1}{m + M_1} + \frac{Z_2}{Z} \frac{M_2}{m + M_2} \right).$$

Infolge Ausgleichens dieses Geschwindigkeitsverlustes durch die Beschleunigung des Trägers im elektrischen Felde F ist

$$v \left(\frac{Z_1}{Z} \frac{M_1}{m + M_1} + \frac{Z_2}{Z} \frac{M_2}{m + M_2} \right) = \frac{e}{m} F \frac{L}{V},$$

wo L die mittlere freie Weglänge im Gasgemische, V die mittlere Molekulargeschwindigkeit des Trägers und e deren Ladung ist.

Die Trägerbeweglichkeit ω drückt sich sodann aus

$$(1) \quad \left\{ \begin{aligned} \omega &= v \left(\frac{Z_1}{Z} \frac{m}{m + M_1} + \frac{Z_2}{Z} \frac{m}{m + M_2} \right) + \frac{e}{2m} F \frac{L}{V} \\ &= \frac{L}{V} e F \left\{ \frac{Z_1 (m + M_2) + Z_2 (m + M_1)}{Z_1 M_1 (m + M_2) + Z_2 M_2 (m + M_1)} + \frac{1}{2m} \right\}. \end{aligned} \right.$$

Nach Maxwell¹⁾ ist die Anzahl der Zusammenstöße eines Teilchens m mit Molekülen eines fremden Gases pro Sekunde

$$Z_1 = N_1 \pi s_1^2 \sqrt{V^2 + W_1^2},$$

wo N_1 die Anzahl der Moleküle in der Raumeinheit, s_1 die Radiensumme des Teilchens und des Moleküls, V und W_1 die Geschwindigkeiten der Molekularbewegung derselben ist.

Wenn sich das Teilchen m jetzt in einem Gemische von zwei Gasen bewegt, dann ist die gesamte Anzahl der Zusammenstöße pro Sekunde, falls N_2 die Molekülzahl pro Kubikzentimeter des zweiten Gases und $s_2 = r + R_2$ ist,

$$Z = Z_1 + Z_2 = N_1 \pi s_1^2 \sqrt{V^2 + W_1^2} + N_2 \pi s_2^2 \sqrt{V^2 + W_2^2}$$

oder nach Einführen der Werte der Molekulargeschwindigkeiten

$$V = \frac{2}{\sqrt{\pi \pi m}}, \quad W_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi \pi M_1}}, \quad W_2 = \frac{2}{\sqrt{\pi \pi M_2}}, \quad ^2)$$

1) J. C. Maxwell, Phil. Mag. (4) 19. p. 28. 1860.

2) Vgl. O. E. Meyer, Kinet. Theorie d. Gase 1899.

wo die Konstante κ durch die Energie der Wärmebewegung bestimmt ist,

$$Z = \pi V \left(N_1 s_1^2 \sqrt{\frac{m + M_1}{M_1}} + N_2 s_2^2 \sqrt{\frac{m + M_2}{M_2}} \right).$$

Die freie Weglänge des Teilchens m im Gasgemische ist daher im Mittel

$$L = \frac{V}{Z} = \frac{1}{\pi V} \cdot \frac{1}{N_1 s_1^2 \sqrt{\frac{m + M_1}{M_1}} + N_2 s_2^2 \sqrt{\frac{m + M_2}{M_2}}}.$$

Nach Einsetzen der Werte von L , Z_1 und Z_2 in (1) wird die Wanderungsgeschwindigkeit des Trägers

$$\omega = \frac{1}{\pi V} \cdot \frac{e F}{N_1 s_1 \sqrt{\frac{m + M_1}{M_1}} + N_2 s_2^2 \sqrt{\frac{m + M_2}{M_2}}} \cdot \left\{ \frac{N_1 s_1^2 \sqrt{\frac{m + M_2}{M_1}} + N_2 s_2^2 \sqrt{\frac{m + M_1}{M_2}}}{N_1 s_1^2 \sqrt{M_1(m + M_2)} + N_2 s_2^2 \sqrt{M_2(m + M_1)}} + \frac{1}{2m} \right\}.$$

Für den Fall, daß die Träger Moleküle eines der im Gemische sich befindenden Gase sind, z. B. des ersteren, ist nach Einführen der Partialdichten $D_1 = N_1 M_1$ und $D_2 = N_2 M_2$

$$\omega = \frac{1}{\pi W_1} \cdot \frac{e F}{\frac{D_1 s_1^2}{M_1} \sqrt{2} + \frac{D_2 s_2^2}{M_2} \sqrt{\frac{M_1 + M_2}{M_2}}} \cdot \left\{ \frac{q \cdot s_1^2 \sqrt{\frac{M_1 + M_2}{M_1}} + s_2^2 \sqrt{\frac{2}{M_2}}}{q \cdot s_1^2 \sqrt{M_1 + M_2} + s_2^2 \sqrt{2 M_2}} + \frac{1}{2 M_1} \right\},$$

wo $q = N_1 : N_2 =$ Volumenverhältnis der Gase im Gemische ist. Im Falle $M_1 = M_2$ gehen diese Formeln selbstverständlich in die bekannte Lenardsche Formel über.

Nach dieser Formel wurde die Beweglichkeit der Luftträger im Gasgemische aus Luft und Wasserstoff berechnet, wobei für die Radien der Gasmoleküle die aus der inneren Reibung und für die der Träger die aus der beobachteten Beweglichkeit berechneten Werte (aus der Tab. V entnommen) benutzt wurden. Die zur Berechnung der Partialdichten benutzten Werte der Dichtigkeit der Luft und des Wasserstoffs bei $t = 20^\circ \text{C}$ sind $120,5 \cdot 10^{-5}$ und $8,388 \cdot 10^{-5} \text{ g. cm}^{-3}$. Die

Geschwindigkeit der Molekularbewegung für Luft und Wasserstoff bei 20° C. ist danach 46340 und 176400 cm.sec⁻¹; die Elementarladung wurde gleich $4,89 \cdot 10^{-10}$ C.G.S.-Einheiten angenommen. Der Verlauf der so erhaltenen Beweglichkeit der negativen und der positiven Luftträger im Gemische von verschiedenem Prozentgehalt der Bestandteile ist in der Fig. 10 durch Kurven I und II dargestellt.

Die Geraden III, IV und V stellen die Dichtigkeit des Gasgemisches und die Partialdichten von Luft und Wasserstoff dar.

Beobachtungen. Für die Messungen wurden die beiden Gase durch ein Y-förmiges Rohr vereinigt und dann gemeinsam durch einen Geschwindigkeitsmesser (Rotameter) über die Trocknungsmittel, den Netzkondensator und dann durch die Gasuhr geleitet. Zuerst wurde das Gas der einen Bombe mit konstanter und gewisser Geschwindigkeit fließen lassen, dann ein beliebiger Gasstrom von der zweiten Bombe zugeführt¹⁾ und die Durchflußvolumina des Gemisches an der Gasuhr abgelesen. (Nach der Ausführung einer Beobachtungsreihe wurde die Geschwindigkeit des ersten Gases wieder gemessen und zur Berechnung der Mittelwert genommen.) Daraus wurde der Prozentgehalt beider Gase im Gemische berechnet. Die Ausmessung der kleinen Mengen des zugemischten Gases geschah mit Hilfe eines Meßzylinders über Wasser.

Die so beobachteten Werte der Trägerbeweglichkeit sind für negative mit 000 und für positive Träger mit + + + in der Fig. 10 angezeichnet. Wie zu ersehen ist, stimmen die beobachteten mit den berechneten Werten (ausgenommen in den Fällen, wo der Prozentgehalt von Luft klein ist) ziemlich gut überein, woraus zu schließen ist, daß die beobachteten Träger Luftträger sind. Die beträchtliche Abweichung der beobachteten Werte in dem Falle, daß das Gemisch wenig Luft enthält, ist durch das Hervortreten größerer Mengen von Wasserstoffträgern zu deuten, die um so mehr ins Übergewicht kommen, je kleiner der Luftgehalt ist. Um über das Mengen-

1) Wobei der rotierende Schwimmer des Rotameters jetzt als Indikator zum Kontrollieren der Konstanz der Gasgeschwindigkeit während einer Beobachtungsreihe benutzt wurde.

verhältnis der Luft- und H_2 -Träger eine Vorstellung zu bekommen, sind in der Tab. VII die maximalen Elektrometerausschläge angegeben, welche in Gemischen mit verschiedenem Luftgehalt bei einer Spannung von 90 Volt (wo schon sämtliche Träger abgefangen werden) beobachtet wurden.

Fig. 10.

Aus der Tabelle ist zu ersehen, daß der Gesamteffekt in Luft rund 200 mal größer ist als in Bombenwasserstoff. (Das Verhältnis der Dichten der beiden Gase ist dabei nur ca. 15; es entspricht dies der bekannten Tatsache, daß zwar die Absorption der Röntgenschen Strahlen der Dichte angenähert proportional ist, nicht aber die Trägerbildung.)

Tabelle VII.

Prozentgehalt der Luft im Gemische	Maximaler Elektrometer- ausschlag in Skt.
2% (Bombenwasserstoff)	2
3	4,5
3,6	8
4,7	12
8	20
11,8	32—36
100% (Luft)	375—420

Da die Trägermenge jeder Art der Gasmenge im Gemische proportional angenommen werden kann, so kann z. B. die Kurve V (Fig. 10) gleichfalls auch die relative Menge der H_2 -Träger im Gemische darstellen. Um eine analoge Kurve der relativen Trägermengen für Luft zu erhalten, müßte man in der Fig. 10 für 100 Proz. Luft eine 200 mal größere Ordinate, als die für 100 Proz. H_2 , auftragen, und dann den so gewonnenen Ordinatenpunkt mit dem Nullpunkt verbinden. Die so erhaltene Kurve VIII stellt dann zusammen mit der Kurve V die relativen Mengen der Luft- bzw. H_2 -Träger im Gemische dar.

Die im Gemische mit kleinem Luftgehalt verhältnismäßig großen Schwankungen der beobachteten Beweglichkeit sind erstens durch eine beträchtliche Verminderung des Gesamteffektes und zweitens durch den wahrscheinlicherweise nicht genügend gleichmäßig gewordenen Gasstrom zu erklären. Die beobachteten Beweglichkeitswerte für den Bombenwasserstoff, der eigentlich als Gasgemisch mit 2 Proz. Luft (wie oben erwähnt wurde) anzusehen ist, sind in der Fig. 10 auf der dem zweiprozentigen Gemisch entsprechenden Ordinate aufgetragen. Zieht man jetzt über die beobachteten Punkte eine Kurve (gestrichelte), bis sie die Ordinatenachse schneidet, so erhält man einen zwar extrapolierten, aber doch nahe angenäherten Wert für die Trägerbeweglichkeit im reinen Wasserstoff (105 für positive und $152 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{Volt} \cdot \text{cm}^{-1}$ für negative Träger).

Berechnet man aus diesen Werten die Größen der Wasserstoffträger, so erhält man für die positiven $r_+ = 7,95 \cdot 10^{-9} \text{ cm}$

und für die negativen Träger $r_- = 4,8 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^1$) und der Beweglichkeitsverlauf der negativen bzw. positiven Träger im Gemische würde dann durch die Kurven VI und VII (berechnet nach der Formel) dargestellt werden. Daß die beobachteten Kurven hiervon völlig abweichen, kommt daher, daß beim Vorhandensein selbst geringer Menge von Luft fast nur Luft- (O_2, N_2)-Träger gebildet werden, kaum mehr Wasserstoffträger (vgl. Tab. VII).

Zum Schlusse sei es mir gestattet, Hrn. Geh. Rat Prof. P. Lenard für die Anregung zu dieser Arbeit und für das stets rege Interesse an derselben, sowie Hrn. Prof. A. Becker für seine lebenswürdige Unterstützung meinen besten Dank auszusprechen.

1) Diese Zahlen können dahin gedeutet werden, daß die Träger im Falle von Wasserstoff keine ganzen Moleküle sind, denn die Radien dieser letzteren sind wesentlich größer (vgl. Tab. V), als diese aus extrapolierten Beweglichkeitswerten berechneten Trägerradien. Als Erklärung scheint — namentlich bei den positiven Trägern — nun die Möglichkeit vorhanden zu sein, daß die Wasserstoffträger einzelne Wasserstoffatome sind.

(Eingegangen 22. Januar 1912.)