

Werk

Titel: Der Streit um das Elektron

Autor: König, Walter

Ort: Berlin

Jahr: 1917

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0005|log303

Kontakt/Contact

Digizeitschriften e.V.
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

Herausgegeben von

Dr. Arnold Berliner und Prof. Dr. August Pütter

Fünfter Jahrgang.

8. Juni 1917.

Heft 23.

Der Streit um das Elektron.

Von Prof. Dr. Walter König, Gießen.

Seit acht Jahren laufen zwei Reihen großer Experimentaluntersuchungen nebeneinander her, die dasselbe Problem nahezu gleichzeitig und unabhängig voneinander nach der gleichen Beobachtungsmethode in Angriff genommen haben und die physikalische Welt dauernd in Spannung erhalten durch den scharfen Gegensatz, in dem sie in bezug auf die Deutung ihrer Versuchsergebnisse zueinander stehen. Die eine dieser Reihen wird in Amerika von *Millikan* und seinen Schülern in Chicago durchgeführt, die andere von *Ehrenhaft* und seinen Schülern in Wien mit Unterstützung der Wiener Akademie. Das Interesse an diesen Untersuchungen aber ist das denkbar größte; denn es handelt sich um eines der Grundprobleme der modernen Elektrizitätslehre, um die Frage nach der atomistischen Struktur der Elektrizität und nach der Größe der Ladung, die man dem elektrischen Atom, dem Elektron, zuschreiben hat. Die Arbeiten der ersten Gruppe sind in der *Physical Review*, gelegentlich auch im *Philosophical Magazine*, und die wichtigeren von ihnen in deutscher Übersetzung in der *Physikalischen Zeitschrift* erschienen. Die Arbeiten der andern Gruppe finden sich vor allem in den Berichten der Wiener Akademie, in kürzerer Form auch in der *Physikalischen Zeitschrift*. Eine größere und in gewissem Sinne abschließende Arbeit veröffentlichte *Ehrenhaft* 1914 in den *Annalen der Physik*. Nachdem nun kürzlich auch *Millikan* in den *Annalen der Physik* und in der *Physical Review* eine Übersicht von seinem Standpunkt aus gegeben hat, kann man es wohl unternehmen, den Sinn des Streitfalles, seine Entwicklung und seinen gegenwärtigen Stand auf Grund des vorhandenen Materials darzulegen.

1. *Die Vorgeschichte des Problems.* Wir pflegen in Deutschland den Gedanken des atomistischen Baues der Elektrizität auf *Helmholtz* zurückzuführen, der ihn 1881 in seiner Faraday-Vorlesung ausgesprochen hat. Aber es muß zugestanden werden, daß der Gedanke schon 7 Jahre früher von *Johnstone Stoney* auf der Versammlung der British Association in Belfast 1874 entwickelt worden ist, allerdings in einem anderen Zusammenhange als bei *Helmholtz* — nämlich in einem Vortrage über physikalische Natureinheiten¹⁾ — aber

¹⁾ Der Vortrag ist am 16. Februar 1881 noch einmal der Royal Dublin Society vorgelegt und im Mai desselben Jahres auch im *Phil. Mag.* veröffentlicht worden. *Helmholtz* hielt seine Faradayrede am 5. April

doch in voller Klarheit und sogar schon mit rechnerischer Auswertung der Größe der Elementarladung. Den Ausgangspunkt des ganzen Gedankenganges bildet *Faradays* Gesetz der Elektrolyse. Mit jedem Äquivalent eines beliebigen Ions, das an einer Elektrode abgeschieden wird, geht die gleiche Elektrizitätsmenge an die Elektrode über. Nimmt man den atomistischen Bau der Materie an, so muß an jeder Valenz jedes einzelnen Atoms die gleiche elektrische Ladung haften. Dann erscheint — zunächst wenigstens auf dem Gebiete der elektrolytischen Leiter — die Elektrizität ebenso atomistisch gegliedert wie die Materie. Sie besteht aus lauter kleinsten Teilchen von gleicher Größe, die man Valenzladungen, Elementarquanten oder elektrische Atome genannt hat, und für die derselbe *Stoney*, der den Gedanken zuerst gefaßt hat, in einer späteren Abhandlung (1891) den jetzt üblichen Namen Elektronen geprägt hat. Man kann die Größe des Elektrons aus dem elektrochemischen Äquivalent berechnen, wenn man die Zahl der Atome kennt, die ein Grammäquivalent eines Elektrolyten ausmachen. Denn das elektrochemische Äquivalent (96 540 Coulomb = $290 \cdot 10^{12}$ elektrostatischen Elektrizitätseinheiten) ist diejenige Elektrizitätsmenge, die zusammen mit einem Grammäquivalent eines Ions, also z. B. mit einem Gramm Wasserstoff an der Elektrode abgeschieden wird. Ist N die Anzahl der Moleküle, die ein Grammolekül eines Stoffes, also z. B. 2 Gramm Wasserstoff, enthält, so ist die Zahl der Atome von 2 Gramm Wasserstoff doppelt so groß, also die Zahl der Atome in 1 Gramm Wasserstoff = N , und die Größe des Elektrons e ergibt sich aus der Beziehung, daß $N \cdot e$ gleich dem elektrochemischen Äquivalent sein muß. Die Zahl N ist zuerst von *Loschmidt* auf Grund der Vorstellungen der kinetischen Gastheorie berechnet worden. Mit dieser Zahl hat *Stoney* die erste Berechnung von e zu $0,3 \cdot 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten durchgeführt. Die neueren Ergebnisse der kinetischen Gastheorie würden einen höheren Wert, etwa $4,75 \cdot 10^{-10}$ ergeben.

Diese aus der Elektrolyse geschöpften Anschauungen erfuhren im letzten Jahrzehnt des vergangenen Jahrhunderts eine außerordentliche Erweiterung und Vertiefung einerseits durch die neuen Forschungen über die Natur der Kathodenstrahlen, die als freie negative Elektrizitätsquanten erkannt wurden, und anderseits durch die Untersuchungen über die Elektrizitätsleitung in Gasen, die vor allem in England von *J. J. Thomson* und desselben Jahres vor der Chemischen Gesellschaft in London.

seinen Schülern durchgeführt wurden. Nachdem auch hier der konvektive Charakter dieser Elektrizitätsleitung, die Leitung durch Ionenbewegung, festgestellt war, drängte sich naturgemäß die Frage auf, ob auch bei diesen Erscheinungen die elektrischen Ladungen von der Größe des Elementarquantums wären. Diese Frage wurde zuerst durch *Townsend* und *J. J. Thomson* beantwortet. Sie maßen die Gesamtladung, die eine gewisse Ionenmenge mit sich führte, und dividierten sie durch die Zahl der Ionen. Diese aber ermittelten sie in sehr origineller Weise dadurch, daß sie die Ionen als Kondensationskerne einer durch adiabatische Ausdehnung in feuchter Luft erzeugten Nebelbildung benutzten. Aus der Geschwindigkeit, mit der die gebildete Nebelwolke niedersank, konnte die Größe der Nebeltröpfchen berechnet werden nach einer bekannten und viel benutzten Formel von *Stokes*, die die Fallgeschwindigkeit einer Kugel in einer reibenden Flüssigkeit ausdrückt; außerdem aber konnte die Gesamtmenge des kondensierten Wassers aus dem Grade der angewandten Expansion berechnet werden. Diese Menge dividiert durch die Masse des einzelnen Tröpfchens ergab die Zahl der Tropfen und damit die Zahl der Ionen unter der Voraussetzung, daß jeder Tropfen ein Ion als Kern enthält und jedes Ion einen Tropfen gebildet hat. Die nach dieser Methode gewonnenen Zahlen für die mittlere Ionenladung lagen zwischen 6.7 und $3.4 \cdot 10^{-10}$, also durchaus um den Wert herum, den die Elektrolyse für das Elementarquantum ergeben hatte.

Eine für die weitere Entwicklung unseres Problems wichtige Verbesserung der Methode wurde von *H. A. Wilson* erfunden. Er brachte in dem Nebelgefäß einen elektrischen Kondensator an, dessen Kraftlinien genau vertikal standen, und bemaß den Grad der Expansion so, daß sich der Nebel nur auf den negativen Ionen bildete, entsprechend den Erfahrungen, die *C. T. R. Wilson* bei seinen Untersuchungen über die Nebelbildung auf Ionen gemacht hatte. *H. A. Wilson* beobachtete nun die Geschwindigkeit des Sinkens der Nebelwolke, einmal wenn sie nur unter dem Einfluß der Schwerkraft sank (V_0) und dann, wenn ein elektrisches Feld von meßbarer Stärke $\mathcal{E}$ der Schwere entgegenwirkte (V_1). Diese beiden Beobachtungen ergeben unmittelbar das Verhältnis der Ladung des Tröpfchens e zu seiner Masse m . Denn da die Fallgeschwindigkeit der wirkenden Kraft proportional ist, so ist

$$V_0 = b \cdot m \cdot g \text{ und } V_1 = b(mg - \mathcal{E}e),$$

woraus folgt:

$$e = \frac{V_0 - V_1}{b\mathcal{E}} = \frac{m \cdot g}{\mathcal{E}} \frac{V_0 - V_1}{V_0}.$$

Aus der ersten der obigen Formeln aber läßt sich m berechnen, indem man für b den von *Stokes* angegebenen Wert $1/8 \pi \mu a$ einsetzt, unter a den Tropfenradius, unter μ die Reibungskonstante der Luft verstanden. Also läßt sich aus diesen

beiden Beobachtungen unmittelbar der Wert von e berechnen. *Wilson* fand nach dieser Methode $e = 3.1 \cdot 10^{-10}$. *Millikan* und *Begeman* verbesserten das Verfahren, indem sie den auf der Verdampfung des Tröpfchens beruhenden Fehler nach Möglichkeit herabzusetzen suchten, und fanden $e = 4.06 \cdot 10^{-10}$, und aus den gleichen Beobachtungen berechnete *Millikan* später unter Berücksichtigung genauerer Werte der Temperatur und des Reibungskoeffizienten $e = 4.5 \cdot 10^{-10}$.

2. Die neue Methode der Messung am einzelnen Ion. Die beschriebenen Messungen gehen sämtlich den Betrag des Elementarquantums als Mittelwert aus der Gesamtladung einer großen Anzahl von Ionen. Ob dabei jedes einzelne Ion die gleiche Ladung trägt, oder ob der erzielte Wert eben nur der Mittelwert aus vielen sehr ungleichartigen, teils größeren, teils kleineren Werten ist, das läßt sich mit den beschriebenen Methoden nicht entscheiden. Diese Frage unmittelbar in Angriff genommen und ein Verfahren zu ihrer Beantwortung gefunden zu haben, ist der wichtige Fortschritt und das große Verdienst, das in den Arbeiten von *Millikan* und *Ehrenhaft* liegt. Beide sind fast gleichzeitig auf das gleiche Verfahren gekommen, nicht durch Nachdenken oder Suchen, sondern durch gelegentliche Beobachtungen, die sie die Ausführbarkeit dieser neuen Methode empirisch finden ließen, aber beide von ganz verschiedenen Ausgangspunkten aus. *Millikan* hatte, zusammen mit *Begeman*, wie schon erwähnt, die *Wilsonschen* Versuche wiederholt. Er wollte die Methode noch weiter verbessern, indem er das elektrische Feld des Kondensators so weit steigerte, daß elektrische Kraft und Schwerkraft in den Tropfen sich das Gleichgewicht halten und die Wolke schweben sollte. Aber dieser Versuch mißlang. Die Wolke schwebte nicht als Ganzes; sondern ihre Tröpfchen wurden teils nach oben, teils nach unten an die Kondensatorplatten herangerissen und nur einzelne Teilchen blieben schwebend. Aber eben diese einzelnen Teilchen konnte *Millikan* beobachten, konnte sie längere Zeit schwebend erhalten oder nach oben oder unten wandern lassen, je nach der angelegten Kondensatorspannung, und damit war die neue Methode der Individualbeobachtung der einzelnen Teilchen gefunden.

Für *Ehrenhaft* dagegen lag der Ausgangspunkt unmittelbar in der mikroskopischen Beobachtung einzelner in der Luft schwebenden Teilchen. Er hatte nämlich 1907 eine schöne Untersuchung über die *Brownsche* Bewegung in Gasen mit Hilfe des Ultramikroskopes durchgeführt. Er beobachtete dabei Metallteilchen, die er aus einem zwischen Metallelektroden brennenden Lichtbogen in die Kammer des Ultramikroskopes hineinsaugte. Als dann im folgenden Jahre *de Broglie* bei Untersuchungen der gleichen Art an Tabakrauch mit Hilfe eines elektrischen Feldes den Nachweis führte, daß die Teilchen Ladungen trügen, führte auch *Ehrenhaft* in seine Rauchkammer einen klei-

nen Kondensator ein, und zwar zunächst mit horizontal gerichteten Kraftlinien, und beobachtete nun in seiner ersten auf das Elementarquantum bezüglichen Arbeit die Bewegung seiner Teilchen unter dem Einfluß des elektrischen Feldes einerseits und der Schwerkraft anderseits. Allerdings hat *Ehrenhaft* in dieser 1909 erschienenen Arbeit das Prinzip der Individualbeobachtung insofern noch nicht vollkommen durchgeführt, als er die beiden Beobachtungen zwar an einzelnen Teilchen, aber nicht an denselben Teilchen anstellte. Er maß vielmehr zunächst die elektrische Beweglichkeit an einer großen Anzahl von Teilchen und bildete den Mittelwert dieser Zahlen, und dann die Fallgeschwindigkeit an einer anderen großen Zahl von Teilchen, bildete auch hier den Mittelwert und berechnete aus der Verbindung beider Mittelwerte die mittlere Ladung der Teilchen. Er fand sie für seine Silber- und Zinkteilchen zwischen $4,5$ und $4,7 \cdot 10^{-10}$, also in guter Übereinstimmung mit den sonstigen Werten des Elementarquantums. Aber dieser Wert war auch nur ein Mittelwert, und noch nicht der Wert einer Einzelladung. Auf die Messung dieser ist *Ehrenhaft* erst in einer zweiten, 1910 erschienenen Arbeit übergegangen, und da er in dieser Arbeit die erste Arbeit von *Millikan* bereits erwähnt, so erscheint es zweifelhaft, ob er das Prinzip der Messung der Einzelladungen selbständig gefunden hat, oder ob er durch *Millikans* Mitteilungen darauf geführt worden ist. Zeitlich wird man *Millikan* den Vorrang nicht streitig machen können. Aber die Frage nach der Priorität beeinträchtigt nicht die Bedeutung, die den Arbeiten *Ehrenhafts* neben denen *Millikans* zukommt. Auch ist es auf alle Fälle von Interesse, zu sehen, wie die Arbeiten *Ehrenhafts* von ganz anderem Ausgangspunkte aus in ganz logischer Entwicklung in die gleichen Bahnen hineinführen, die *Millikan* vorgezeichnet hatte, und wie anderseits gerade die Verschiedenheit der Ausgangspunkte schließlich die Ursache des Widerstreites der Meinungen zwischen den beiden Forschern wird.

3. *Die Arbeiten von Millikan.* Ich will zunächst die Reihe der *Millikanschen* Arbeiten für sich besprechen. Sie sind ganz vorzügliche Experimentaluntersuchungen, geradezu vorbildlich in dem rastlosen, zielbewußten Bemühen, die Methode zu vervollkommen und ihre Ergebnisse sicherzustellen. In seiner ersten Untersuchung arbeitete *Millikan* nach dem Muster der Untersuchungen, von denen er ausgegangen war, mit Nebeltröpfchen. Aus der Fallgeschwindigkeit des Tropfens im Erdfelde und aus der elektrischen Feldstärke, die ihn zum Schweben bringt, berechnet er die Ladung des Tropfens. Er findet sehr verschiedene Ladungen an verschiedenen Tropfen. Aber sie haben nicht beliebige Werte, sondern zeigen ganz bestimmte Differenzen gegeneinander und lassen sich alle als ganze Vielfache einer Grundzahl darstellen. Mit welcher Genauigkeit das möglich ist, mögen folgende Zahlen zeigen.

Millikan fand bei 6 Reihen von Beobachtungen an Einzeltröpfchen folgende Ladungen:

13,77	18,25	$9,284 \cdot 10^{-10}$
$= 3 \times 4,59$	$= 4 \times 4,56$	$= 2 \times 4,64 \cdot 10^{-10}$
24,14	9,742	$28,16 \cdot 10^{-10}$
$= 5 \times 4,83$	$= 2 \times 4,87$	$= 6 \times 4,69 \cdot 10^{-10}$

Der Mittelwert dieser Grundzahl, $4,65 \cdot 10^{-10}$ entspricht recht gut den auf anderen Wegen ermittelten Werten der Elementarladung.

Aber diese Wassertröpfchen haben die störende Eigenschaft, im Laufe der Beobachtung durch Verdunstung immer kleiner zu werden. Man sieht sie in einem konstanten Feld von passender Stärke anfangs sinken, dann schweben, schließlich steigen. Daher ersetzte *Millikan* in der nächsten Arbeit (von 1910) das Wasser durch nicht flüchtige Flüssigkeiten, Öl, Quecksilber, Glycerin. In dem oberen Teil eines zylindrischen Gefäßes, in dessen unterem Teil der Kondensator aufgestellt ist, wird die Flüssigkeit mit Hilfe eines Zerstäubers in feine Tröpfchen zerstäubt. Durch eine Öffnung in der oberen Kondensatorplatte gelangt ein einzelnes Tröpfchen zwischen die Platten. Die Öffnung wird geschlossen; das Tröpfchen wird durch passend angelegte Potentialdifferenzen zwischen den Platten auf- und abbewegt und seine Durchgangszeiten durch bestimmte Marken im Beobachtungsfernrohr werden gemessen. Jetzt gelingt es, einen einzelnen Tropfen stundenlang, bis zu $4\frac{1}{2}$ Stunden, zu beobachten. Mit dieser verfeinerten Methode führt *Millikan* den Nachweis der atomistischen Struktur der Elektrizität in dreifacher Form. Erstens besitzen die Tropfen eine Anfangsladung, die von der Reibung beim Zerstäuben herrührt. Zweitens ändern sich ihre Ladungen, wenn die Luft, in der sie schweben, ionisiert wird, indem sie Ionen auffangen. Drittens können sie durch Bestrahlung mit Röntgenstrahlen verunreinigt werden, negative Ladungen abzugeben. In allen drei Fällen ergeben die Messungen *Millikans*, daß die Ladungen niemals willkürliche Werte, sondern stets ganze Vielfache einer und derselben Grundladung sind, und daß alle Ladungsänderungen durch Ionenfang oder Elektronenabspaltung sich stets in Sprüngen von dem Betrag dieser Grundladung (gelegentlich auch mehrerer Grundladungen) vollziehen. Aber bei der Berechnung des Betrages dieser Grundladung e aus den Beobachtungen an vielen Tropfen von verschiedener Größe ergibt sich eine Abhängigkeit des Wertes von e von der Tropfengröße; für kleine Tropfen wächst e stark an. Diese Tatsache erklärt sich durch den Umstand, daß das Stokessche Gesetz für den Reibungswiderstand in seiner einfachen Form nicht mehr gültig ist, wenn der Durchmesser des Tröpfchens von der Größenordnung der mittleren Weglänge der Gasmoleküle ist. *Millikan* verbessert die Stokessche Formel durch Hinzufügung eines Korrektionsgliedes, das in seiner Form einer von *Cunningham* vorgeschlagenen Abänderung des Stokesschen Gesetzes entspricht.

dessen Konstante er aber empirisch aus seinen Beobachtungen bestimmt. Mit dieser Verbesserung berechnet er nun den Endwert von e aus den Messungen dieser zweiten Arbeit zu $4.891 \cdot 10^{-10}$. Der neue Wert ist nicht unbeträchtlich größer als der ältere. *Millikan* ist geneigt, den Unterschied auf Fehler der älteren Versuche, und zwar auf die Unsicherheit des Zustandes in der Nebelkammer, zurückzuführen. Aber er sieht sich durch diese Nichtübereinstimmung der Endwerte der beiden Messungsreihen zu einer kritischen Beurteilung des ganzen Verfahrens veranlaßt, die ihn zu einer Neubestimmung aller in der Formel vorkommenden Größen, zu neuen Verbesserungen der Apparatur und zu einer weiteren Variation der Versuchsbedingungen führt. Die neuen Ergebnisse werden in einer dritten großen Arbeit 1913 veröffentlicht. Hier ist vor allem die Reibungskonstante der Luft nach 5 verschiedenen Methoden neu bestimmt worden. Ferner ist das optische System zur Beobachtung der Tropfen wesentlich verbessert; zur Vermeidung von Konvektionsströmen zwischen den Kondensatorplatten ist der Apparat von einem Wasserbad umgeben, und endlich ist er so umgestaltet, daß die Versuche bei beliebigen Gasdrücken ausgeführt werden können. Er beobachtet 58 Tropfen, bei denen der Radius von $4.69 \cdot 10^{-5}$ bis $58.56 \cdot 10^{-5}$ cm, die Ladung von $1 e$ bis $136 e$, der Gasdruck von 4.46 bis 76.27 cm Quecksilber variiert, und zieht aus der Vergleichung dieser Beobachtungen einige wichtige Schlüsse: daß der Reibungswiderstand durch die Ladung der Tröpfchen nicht verändert wird, daß die Öltropfen sich wie feste Kugeln verhalten und ihre Dichtigkeit von der des Öls im ganzen nicht verschieden ist. Nach all diesen Feststellungen und nachdem sich die atomistische Struktur der Ladungen wieder wie bei den früheren Untersuchungen ergeben hat, berechnet er den Wert der Elementarladung schließlich im Mittel dieser neuesten Messungen zu $4.774 \cdot 10^{-10}$. Die letzte, 1916 erschienene Arbeit bringt lediglich eine Bestätigung dieses Ergebnisses durch weitere Messungen an Quecksilbertropfen in Luft und an Öltropfen in Luft und in Wasserstoff, bei denen er mit dem Tropfenradius bis auf $2.5 \cdot 10^{-5}$ cm heruntergeht.

Man muß zugeben, daß die Aufgabe, die sich *Millikan* gestellt hatte, die atomistische Struktur der Elektrizität nachzuweisen, in diesen Arbeiten glänzend gelöst ist. Alle Ladungen, die er gemessen hat, erscheinen als Vielfache einer Elementarladung, als zusammengesetzt aus elektrischen Atomen oder Elektronen von durchaus gleicher Größe, die rund zu 4.8×10^{-10} elektrostatischen Einheiten anzunehmen ist.

4. *Die Arbeiten von Ehrenhaft.* Ganz anders lautet das Ergebnis bei *Ehrenhaft*. Mit nicht minderer Entschiedenheit und mit nicht geringerem Aufwand an Beobachtungsmaterial sucht er in vollem Gegensatz zu *Millikan* zu beweisen, daß die elektrischen Ladungen keineswegs an die angegebene untere Grenze gebunden seien, sondern

daß sich wesentlich kleinere Ladungen nachweisen lassen. Man hat solche Ladungen dann als *Subelektronen* bezeichnet. Gleich in der ersten Arbeit, in der er sich mit der Messung von Einzel Ladungen beschäftigt (der zweiten von den oben erwähnten Arbeiten, die er 1910 veröffentlichte und über die er auf dem Naturforschertag in Königsberg berichtete), stellte er diese Behauptung auf. Entsprechend dem Ausgangspunkte seiner Untersuchungen beobachtete er wieder mit dem Ultramikroskop kleine Metallteilchen, die aus einem zwischen Elektroden aus dem betreffenden Metall brennenden Lichtbogen in die Beobachtungskammer hineingesaugt wurden. In dieser Kammer war jetzt nach dem Muster von *Wilson* ein kleiner Kondensator mit vertikal gerichteten Kraftlinien angebracht, und er maß einerseits die Fallzeit eines Teilchens im Schwerfeld und andererseits die Hebezeit desselben Teilchens durch dieselbe Strecke in einem der Schwere entgegenwirkenden elektrischen Felde. Die nach der einfachen Stokeschen Formel berechneten Halbmesser seiner Teilchen lagen bei Gold zwischen 0.35 und 1.29×10^{-5} , bei Platin zwischen 0.44 und 1.47×10^{-5} , bei Silber zwischen 0.60 und 2.83×10^{-5} cm. Um auch hier ein Beispiel für die Ergebnisse der Ladungsmessungen zu geben, teile ich folgende Zahlen mit. An 22 Silberteilchen von den Radien 2.83 bis 1.015×10^{-5} cm findet *Ehrenhaft* die nach abnehmender Größe der Teilchen geordneten Ladungen: $24.2, 26.6, 18.5, 17.3, 15.2, 19.8, 11.8, 14.3, 11.9, 13.4, 7.0, 4.1, 6.5, 9.5, 8.5, 3.1, 4.1, 3.6, 3.1, 5.3, 5.7, 4.4 \times 10^{-10}$; an 8 weiteren Teilchen mit den Radien 0.95 bis 0.60×10^{-5} cm die Ladungen: $2.3, 3.0, 6.5, 1.4, 2.0, 3.0, 2.4, 0.9 \times 10^{-10}$. Man sieht daraus, daß bei den größeren Teilchen die Ladungen zwar von der Größe des Elektrons oder seiner ganzen Vielfachen im Millikanschen Sinne sind (es kommen allerdings auch Zwischenwerte vor, die nicht ganzen Vielfachen von e entsprechen), daß aber von gewissen Teilchengrößen an ganz auffällige Unterschreitungen des Elementarquantums vorkommen. Sie beginnen bei allen untersuchten Metallen zur Regel zu werden etwa von der Größenordnung 1.0×10^{-5} cm an. Je kleiner die Teilchen sind, um so kleiner erscheinen auch ihre Ladungen. Eine weitere Arbeit aus dem Jahre 1911 bringt eine Wiederholung dieser Untersuchung und eine Bestätigung der Ergebnisse; als Mittelwert der Ladungen seiner kleinen Metallteilchen gibt er hier an 1.7×10^{-10} für Silber, 1.0×10^{-10} für Gold, also Werte, die nicht größer als ein Drittel bis ein Viertel des Millikanschen Wertes sind. Auf Grund dieses Befundes stellt *Ehrenhaft* den Satz auf, daß mit immer kleinerer Kapazität der Teilchen auch ihre Ladungen immer kleiner würden, und daß man daher, um ein Urteil über die kleinsten nachweisbaren Ladungen zu gewinnen, mit der Untersuchung der Teilchen bis an die äußerste Grenze des ultramikroskopischen Sehens

heruntergehen müßte. Dieser Satz ist der eigentliche Kern der Ehrenhaftschen Arbeiten. Er geht aus der Anwendung des Ultramikroskopes hervor, von der *Ehrenhaft* ausging und an der er bis heute festgehalten hat, nachdem er nun einmal mit dieser Methode seine besonderen, von denen anderer Forscher abweichenden Ergebnisse erhalten hatte. *Millikans* Beobachtungsmethode ist ja im Grunde die gleiche wie jene, die beim Ultramikroskop angewendet wird; das schwebende Teilchen wird von der Seite intensiv beleuchtet und erscheint vor dunklem Hintergrunde als heller Stern. Aber er beobachtet es mit einem Fernrohr, einem optischen System von mäßiger Vergrößerung, mit dem er nur größere Tröpfchen, aber nicht so kleine Teilchen, wie sie *Ehrenhaft* benutzte, beobachten konnte. Entsprechend sind auch alle Ausmaße seiner Apparate größer. Sein Kondensator hat 20 cm Durchmesser und 1,6 cm Plattenabstand, und der Fallraum, den er die Tröpfchen durchmessen läßt, beträgt 1 cm und gelegentlich noch mehr. *Ehrenhaft* beobachtet mit starkem Mikroskop von 220- bis 1000-facher Vergrößerung; seine Kondensatorplatten haben nur 14 mm Durchmesser und stehen in 1,8 bis 1,9 mm Abstand, und der Fallraum seiner Teilchen beträgt nur einige Zehntel eines Millimeters. Es handelt sich also bei dem Streit zwischen *Millikan* und *Ehrenhaft* nicht etwa um eine Verschiedenheit der Ergebnisse an den gleichen Objekten nach den gleichen Beobachtungsmethoden, sondern um eine verschiedene Beantwortung derselben Frage in zwei ganz verschiedenen Größenbereichen der untersuchten Objekte, und zwar in Bereichen, die sich auch nicht einmal stellenweise überdecken, sondern nur eben berühren. Denn bei *Millikan* geht die Größe seiner Tröpfchen nicht unter $2,5 \times 10^{-5}$ cm. *Ehrenhaft* dagegen arbeitet mit Teilchen, die fast immer unterhalb dieser Grenze liegen; außerdem findet er an den größeren seiner Teilchen, etwa zwischen 2,5 und $1,0 \cdot 10^{-5}$ cm; im allgemeinen Ladungen, die sich nicht in so auffälliger Weise von den *Millikanschen* Werten unterscheiden; erst bei noch kleineren Teilchen treten die merkwürdigen Unterschreitungen des Elementarquantums ganz regelmäßig auf. Man könnte nun denken, daß *Ehrenhaft* auf Grund seiner Anschauung von der Abhängigkeit der Ladung von der Teilchengröße notwendig den atomistischen Bau der Elektrizität überhaupt leugnen müßte. Allein auch er hat im weiteren Verlaufe seiner Untersuchungen die Umladungen seiner Teilchen in einem ionisierten Gase beobachtet und gemessen, und hier muß er zugeben, daß diese Umladungen entschieden quantenhaft verlaufen. Auch er findet, daß sich die verschiedenen Ladungen eines und desselben Teilchens als ganze Vielfache einer Grundladung ansprechen lassen. Also geht der Streit nicht um die Behauptung des atomistischen Baues der Elektrizität überhaupt, sondern um die Frage nach der Größe des elektrischen Atoms. Diese glaubt *Ehrenhaft* auf

Grund seiner Messungen wesentlich tiefer ansetzen zu müssen, als der Vorstellung entspricht, die das elektrische Atom der Valenzladung des materiellen Atomes gleich setzt; er vermutet in seiner letzten Arbeit, daß sie höchstens in der Ordnung $0,1 \times 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten zu suchen sei. Er bekämpft damit die landläufige Vorstellung als ein Dogma, an das man glaubt, weil es sich so bequem in das bestehende Lehrgebäude der Elektrizität hineinfügt, ohne daß es jedoch experimentell mit der erforderlichen Sicherheit begründet wäre. Denn gegen die *Millikanschen* Arbeiten erhebt er den Einwand, daß sie das Elektron nicht vorurteilslos berechneten, sondern den gewünschten Wert schon voraussetzten und die den Rechnungen zugrunde gelegten Annahmen, z. B. über die Korrektur des Stokesschen Gesetzes, so wählten, daß der angenommene Wert heraus käme; und den weiteren Einwand, daß sich auch aus *Millikans* Werten Unterschreitungen des Elektronwertes ableiten ließen. *Millikan* dagegen erklärt es geradezu für falsch, diese ganze Untersuchungsmethode auf so kleine Teilchen auszudehnen, wie sie *Ehrenhaft* benutzt habe; je kleiner die Teilchen sind, um so größer und um so unsicherer werden die am Stokesschen Widerstandsgesetz anzubringenden Korrekturen und um so stärker macht sich zugleich die Brownsche Bewegung als Störung der einfachen Fallbewegung geltend. Aus diesen Gründen lehnt *Millikan* die Schlüsse, die aus der Beobachtung wesentlich kleinerer Teilchen, als er sie angewandt hat, gezogen werden, grundsätzlich als unzuverlässig ab. In bezug auf die Einwände *Ehrenhafts* wird man zugeben müssen, daß Schwankungen und Unterschreitungen des Elektronwertes sich auch bei *Millikan* gelegentlich finden; aber den Vorwurf der gekünstelten Bearbeitung seiner Beobachtungen wird man entschieden ablehnen müssen. Wenn die Beobachtungen eine Abhängigkeit der errechneten Ladungen von der Teilchengröße ergeben, so ist der Versuch, diese Abhängigkeit zu erklären und zu beseitigen, doch einfach eine Notwendigkeit im Sinne der ganzen Problemstellung, und wenn dieser Versuch gelingt durch Anwendung einer theoretisch begründeten Korrektur ohne wesentliche Überschreitung des Spielraums, den die Theorie für die Wahl der Konstanten in dieser Formel übrig läßt, so verstehe ich nicht, warum man ein solches Verfahren als eine absichtliche Verdrehung der Versuchsergebnisse verwerfen sollte; im Gegenteil, es erscheint mir als die durchaus zweckvolle und sinngemäße Bearbeitung des Beobachtungsmaterials. Aber es würde zu weit führen, auf Rede und Gegengrede der beiden Forscher im einzelnen einzugehen. Ich will mich vielmehr der Frage zuwenden, welche Bestätigung die Ergebnisse *Millikans* und *Ehrenhafts* in den Arbeiten anderer Forscher gefunden haben, die der Streit um das wichtige Problem auf den Kampfplatz gelockt hat.

5. Die Arbeiten anderer Forscher. Zunächst

liegen Arbeiten von Schülern der beiden Forscher vor, von denen natürlich jede Gruppe die Methoden ihres Meisters anwendet und seine Ergebnisse bestätigt und erweitert. So hat in Amerika *J. V. Lee Millikans* Versuche mit festen Kügelchen aus Schellack wiederholt und $e = 4,764 \times 10^{-10}$ gefunden. In Wien dagegen hat *D. Konstantinowsky* die Messungen *Ehrenhafts* auf noch kleinere Teilchen ausgedehnt ($0,2 \times 10^{-5}$ cm) und noch kleinere Ladungen gefunden, bis herunter zu dem 200. Teil des Elementarquantums, so daß er die Vorstellung von der atomistischen Struktur der Elektrizität sogar überhaupt in Frage stellen zu müssen glaubt. Aber wichtiger als diese Arbeiten aus den streitenden Lagern selbst sind diejenigen unabhängiger Forscher. *Regener* (Berlin) hat Messungen mit der ultramikroskopischen Methode *Ehrenhafts*, aber an Tröpfchen von Öl und Kalilauge ausgeführt und die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie *Millikan* gefunden, Ladungen, die das Ein- bis Vierfache einer Grundladung von dem mittleren Werte $e = 4,86 \times 10^{-10}$ waren. Aber an *Ehrenhafts*chen Silberpartikeln konnte er diese Gesetzmäßigkeiten nicht finden. *Przibram* hat Messungen an Phosphornebelteilchen ausgeführt und nach anfänglichen Abweichungen die *Millikan*-sche Auffassung bestätigt gefunden. Dasselbe gilt von den Untersuchungen von *E. Weiß* in Prag an Silberpartikeln. In ausgezeichneter Weise hat *Joffé* in Petersburg die sprungweise Ladungsänderung und damit den atomistischen Bau der Elektrizität beim photoelektrischen Effekte an Kupfer- und Zinkteilchen bis zu hohen Ladungen hinauf verfolgen können, während ähnliche Messungen von *E. Meyer* und *W. Gerlach* zwar auch die sprungweisen Ladungsänderungen, aber nicht mit gleich guter Konstanz bei verschiedenen Teilchen und auch nicht mit dem *Millikans*chen Zahlenwerte, sondern mit etwas kleineren Werten ergeben haben.

Faßt man alle die verschiedenen Arbeiten zusammen, so kann man nur sagen, daß das Tatsächliche der Beobachtungen beider Forscher von anderen im wesentlichen bestätigt worden ist. Es handelt sich also bei dem Streitfall nicht etwa darum, daß einer der Forscher falsch beobachtet hätte. Auch *Ehrenhafts* Messungen sind sicherlich richtig. Also dreht sich der Streit nur um die Deutung der Messungen. Fragen wir aber nun, wie sich die Physiker in diesem Streit der Meinungen verhalten, so müssen wir feststellen, daß sie sich in überwiegender Mehrzahl auf die Seite *Millikans* stellen; und das ist durchaus verständlich; denn die *Millikans*chen Arbeiten sind in der Behandlung des Problems von einer so schlagenden Klarheit und Einfachheit, daß man sich ihrer Beweiskraft nicht entziehen kann. Dazu kommt, daß ihr zahlenmäßiges Ergebnis mit den auf verschiedenen, ganz anderen Wegen ermittelten Werten der Elementarladung ($4,75 \times 10^{-10}$ aus der Elektrolyse, $4,69 \times 10^{-10}$ aus der Planckschen Strahlungstheorie, 4,65 bis

$4,79 \times 10^{-10}$ aus der Zählung der α -Teilchen eines radioaktiven Stoffes nach *Rutherford*, *Geiger* und *Regener*) doch in ganz überraschender Weise übereinstimmt. Wenn *Ehrenhaft* statt dessen behauptet, daß die Ladungen immer kleiner würden, je kleiner die Teilchen werden, so ist es eine sehr treffende Entgegnung darauf, wenn *Millikan* in seiner letzten Arbeit darauf hinweist, daß die α -Teilchen, die doch noch viel kleiner als *Ehrenhafts* kleinste Teilchen sind, doch das Doppelte der Ladung trügen, die als kleinste Ladung bei *Millikans* Messungen aufträte. Und ebenso können wir uns die elektrolytischen Ionen, die doch ebenfalls nur die Größe von Atomen oder Atomkomplexen haben, gar nicht anders als mit der ein- oder mehrfachen Elementarladung behaftet denken, und der Wert dieser Ladung ist wirklich innerhalb sehr enger Grenzen gleich dem oben angegebenen Werte anzunehmen, da die Zahl *N* heute in Übereinstimmung sehr verschiedener Methoden mit einem beträchtlichen Grade von Sicherheit bekannt ist. Es kann also wohl kein Zweifel darüber bestehen, daß der elektrischen Ladung von der Größe $4,8 \times 10^{-10}$ eine ganz bestimmte Rolle in der Natur zukommt; sie ist eben „das Elektron“. Natürlich können wir uns denken, daß dieses Elektron noch einen komplizierten inneren Bau besitzt, und daß wir vielleicht einmal dahinter kommen werden, gerade so gut, wie wir heute auf dem besten Wege sind, hinter den komplizierten Aufbau unserer materiellen Atome zu kommen. Aber irgendeine Notwendigkeit zu einer solchen Vorstellung in bezug auf das Elektron liegt doch offenbar bis jetzt gar nicht vor, und der Gedanke, daß die Aufspaltung des Elektrons in kleinere Bestandteile sich so einfach vollziehen könnte, wie es bei *Ehrenhafts* Beobachtungen der Fall sein müßte, ist wohl wenig wahrscheinlich. Treten wir aber dem *Millikan*-schen Standpunkte bei, so müssen die Messungen *Ehrenhafts* notwendig anders gedeutet werden. Es fragt sich schließlich, wie.

6. *Die Einwände gegen Ehrenhafts Berechnungen.* Von der ersten Veröffentlichung an, in der *Ehrenhaft* behauptete, Unterschreitungen der Elementarladung nachgewiesen zu haben, sind die mannigfachsten Bedenken gegen seine Methode erhoben worden. Er hat mit Zähigkeit und unleugbarem Geschick seine Ansicht verteidigt, indem er seine Methode und seine Apparatur im Sinne der Beseitigung der erhobenen Einwände umzugestalten und zu verbessern bemüht war. Die ersten Einwände richteten sich gegen seine Annahme, daß die Teilchen, die er aus seinem Lichtbogen herauszog, metallische Kügelchen wären; die Schwierigkeiten würden verschwinden, wenn man ihnen eine wesentlich kleinere Dichte zuschreiben, sie etwa als Oxydationsprodukte von schwammiger Struktur ansehen dürfte, oder auch, wenn man eine von der Kugelform wesentlich abweichende Gestalt der Teilchen annehmen könnte, oder schließlich beides. Da im letzteren Falle

die Teilchen sich im elektrischen Felde orientieren würden, könnte ihre Beweglichkeit, d. h. die Größe b unserer obigen Gleichungen, im elektrischen Felde eine andere als im Schwerfeld sein, wie es *Marg. Vogl* tatsächlich beobachtete. *Ehrenhaft* begegnet dem Einwand der Oxydation, indem er seine Lichtbogen in gut gereinigtem, vollkommen getrocknetem Stickstoff brennen läßt und Edelmetalle zum Zerstäuben verwendet. Vor allem aber hat er ausgedehnte Messungen an zerstäubtem Quecksilber gemacht; hier lassen die größeren Teilchen noch deutlich den metallischen Charakter und die Kugelform erkennen, und es scheint wohl ausgeschlossen zu sein, die gleiche Annahme nicht auch für die kleineren Teilchen machen zu dürfen. Andere Einwände beziehen sich auf das elektrische Feld; bei den kleinen Maßen des Kondensators könnten die Randwirkungen störend in Betracht kommen (*Regener*), oder das Feld könnte durch Ansammlung sehr kleiner unsichtbarer Ionen in der Nähe der Platten abgeschwächt sein (*Joffé*). Auch diese Einwände scheint mir *Ehrenhaft* im wesentlichen widerlegt zu haben; denn die Ionen werden durch das Feld selber schon nach kurzer Zeit entfernt bis auf diejenigen Teilchen, für die die Spannung annähernd gleich der Schwebespannung ist, und die Abweichungen werden auch dort gefunden, wo die Randwirkung durch andere Bemessung des Apparates sicher vermieden ist.

Betrachtet man die genannten Einwände als ausgeschlossen, so bleibt das Problem schließlich an der Frage hängen, ob die Bewegungen der Teilchen richtig gemessen und die richtigen Schlüsse aus ihnen gezogen sind. Die genaue Messung der Steig- und Fallzeiten der Teilchen, zumal bei der sehr geringen Länge der von *Ehrenhaft* benutzten Strecken, ist bei so kleinen Teilchen durch die Brownsche Bewegung sehr beeinträchtigt. Aber die zufälligen Störungen durch die Brownsche Bewegung können wohl die Messungen unsicher machen, doch ist nicht abzusehen, daß sie die Ergebnisse alle nach einer Richtung verschieben könnten. Zur Erklärung dieser Tatsache müßte man vielmehr annehmen, daß die für größere Teilchen gültigen Bewegungsgesetze auf so kleine Teilchen nicht mehr übertragen werden dürften, daß also die Berechnung der Beweglichkeit b aus der Stokesschen Widerstandsformel auch unter Benutzung der verschiedenen Formen des anzufügenden Korrektionsgliedes nicht mehr zulässig ist. Die Ungewißheit in dieser Beziehung ist Veranlassung gewesen, daß man die Berechnung von b auf einem anderen Wege versucht hat. Als solcher bot sich die genaue Untersuchung der Brownschen Bewegung dar. Die von *Einstein* entwickelte Theorie der Brownschen Bewegung führt nämlich zu einer Formel, die gestattet, die Beweglichkeit b eines Teilchens aus der Brownschen Bewegung, d. h. aus dem Mittelwert des Quadrates der Verschiebungen zu berechnen, die das Teilchen in gleichen Zeitintervallen erfährt.

In dieser Gleichung kommt weder die Masse noch die Größe des Teilchens vor, sondern außer b nur die allgemeine Gaskonstante, die absolute Temperatur und die Loschmidtsche Zahl. Setzt man daher den so berechneten Wert von b in die obige Gleichung für e ein, so ist man von allen Annahmen über Dichtigkeit und Größe der Teilchen unabhängig; allerdings ist diese Berechnung nur zulässig unter der Voraussetzung, daß die Beweglichkeit der Teilchen unter dem Einfluß der allseitigen molekularen Stöße die gleiche ist, wie diejenige unter dem Einfluß einer einseitig gerichteten Kraft. Auch die nach dieser Methode ausgeführten Beobachtungen von *Millikan*, *Fletcher* und *Eyring* an Öltröpfchen haben keine systematischen Abweichungen vom Millikanschen Werte des Elementarquantums ergeben. Messungen von *E. Weiß* an Silberpartikeln, die nach der Stokesschen Widerstandsformel zu kleine Werte der Elementarladung ergaben, führten, nach der Methode der Brownschen Bewegung berechnet, zu Zahlen, die um den Millikanschen Wert herum schwanken. Dies gilt allgemein. Die Berechnungen aus der Brownschen Bewegung ergaben auch bei den Messungen *Ehrenhafts* und *Konstantinowskys* an ihren kleinen Teilchen stets größere Werte für den Radius und die Ladung der Teilchen, als die Stokessche Widerstandsformel, und die Abweichung zwischen beiden Arten der Berechnung wird um so größer, je kleiner die Teilchen sind. Aber diese Vergrößerung des Ladungswertes nach der Berechnung aus der Brownschen Bewegung ist doch nicht ausreichend, um die Unterschreitungen des Elementarquantums jederzeit aufzuheben. Im Gegenteil, bei den ganz kleinen Teilchen, mit denen *Konstantinowsky* arbeitet, findet er auch aus der Brownschen Bewegung Ladungswerte, die bis auf ein Zehntel des Millikanschen Wertes heruntergehen, und beide, *Ehrenhaft* sowohl wie sein Schüler, sind der Ansicht, daß die Brownsche Bewegung Radius und Ladung der Teilchen zu hoch ergibt; denn sie glauben fest, daß ihre Teilchen kugelförmig sind und daß darum das Stokessche Gesetz die richtigeren Werte der gesuchten Größen ergebe. Es ist nicht uninteressant, daß *Ehrenhaft* diese Ansicht noch durch eine dritte Methode der Größenbestimmung zu stützen versucht hat. Er hat die Größe von Goldteilchen geschätzt aus der Farbe des von ihnen zerstreuten Lichts auf Grund einer von *G. Mie* entwickelten Theorie, und findet die so gewonnenen Werte in Übereinstimmung mit den aus der Stokesschen Widerstandsformel bei Annahme einer bestimmten Form des Korrektionsgliedes berechneten Größen, während die Brownsche Bewegung wesentlich größere Werte ergab.

So steht heute der Streit. Auf der einen Seite die Untersuchungen *Millikans* an größeren Tröpfchen, mit ihren klaren, auch bei den verschiedenen Berechnungsarten übereinstimmenden Ergebnissen; auf der anderen Seite die Messungen *Ehrenhafts* an kleinen und immer kleineren Teilchen, bei