

Anlage 2

Subelektronen, Vorausannahmen und die Debatte

Millikan – Ehrenhaft

Peter Medawar ist einer der wenigen Forscher ersten Ranges, die noch ernsthaft mit dem Problem der Erkenntnis befaßt sind – mit den Quellen, der Beweiskraft und den Gewichtsgraden wissenschaftlicher Erkenntnisse, dem Wechselspiel von Faktizität und Glauben sowie von Wahrnehmung und Einsicht. In *The Art of the Soluble* fragt er: »Was für eine Art Mensch ist der Naturwissenschaftler, und welche Art von Denkakten führt zur wissenschaftlichen Entdeckung und der Erweiterung der Erkenntnis?«¹ Er findet die üblichen Ansätze zu eng begrenzt: »Was die Wissenschaftler tun, ist nie zum Gegenstand einer wissenschaftlichen, d. h. ethologischen Untersuchung geworden ... Es nützt nichts, »Forschungspapiere« einzusehen, denn diese verhüllen nicht nur, sie verdrehen bewußt die gedanklichen Vorgänge, die sich in der beschriebenen wissenschaftlichen Tätigkeit niederschlagen ... Nur absichtslos hervorgebrachte Belege sind brauchbar – und das bedeutet, daß man die Wissenschaft durchs Schlüsselloch belauscht.«²

Medawar schlägt vor, um wissenschaftliche Tätigkeit zu studieren, solle man im Laboratorium oder im Arbeitszimmer des Theoretikers Wohnung beziehen und die Arbeit in ihrem Vollzug beobachten. Um dieser Zielvorstellung Medawars näherzukommen, haben es sich die Historiker und Soziologen zur Gewohnheit gemacht, absichtslos erzeugtes Material zu benutzen, wie etwa Briefe, an anderen Unterlagen geprüfte autobiographische Berichte, durch ausgebildete Historiker aufgenommene Interviews und Nachschriften von Gesprächen, die bei wissenschaftlichen Tagungen in der Hitze des Gefechts sich abspielten, und vor allem Laborprotokolle – Zeugnisse aus erster Hand, die direkt der Praxis des wissenschaftlichen Tuns entstammen, mit allen Klecksen, Fingerabdrücken und den Blutflecken des persönlichen Ringens des Gedankens.

Diese Quellen können uns dabei helfen, die Gedankensysteme und die Tätigkeit bestimmter Wissenschaftler zu verstehen sowie

ihre Auseinandersetzung mit neuen Vorstellungen, für die systematische Tests, soweit sie überhaupt vorlagen, nur mit Mühe glaubhaft oder applikabel waren. In dieser Untersuchung behandle ich die Zeit nach der frühesten Phase von Entdeckungen, in der die ersten Regungen einer neuen Konzeption noch schwer belegbar sind, aber noch vor der Phase, in der die neueren Arbeiten mittels der anerkannten Begründungsverfahren in den Hauptstrom der zünftigen Wissenschaft eingebracht werden. In dieser Entwicklungsphase darf man hoffen, Belege für den schwer faßbaren und kaum durchsichtigen Vorgang der Wissenschaftswendung zu finden, dem Reichenbach³ und Popper⁴ und andere geflissentlich aus dem Weg gegangen sind.

1. »Die grundsätzlichsste Frage der modernen Physik«

Diese Untersuchung konzentriert sich auf Ereignisse, die in den Jahren um 1910 zwei Physiker in genau entgegengesetzte Richtungen gehen ließen – den einen zum »Erfolg« (und dem Nobelpreis), den anderen zum »Versagen« (und schließlich zum seelischen Zusammenbruch). Versager werden in der Wissenschaft nicht in der Erinnerung behalten, und selten werden sie in wissenschaftsgeschichtlichen Darstellungen analysiert. Und so ist die hier untersuchte Kontroverse praktisch ganz vergessen.

Zunächst schienen die Protagonisten ziemlich ungleiche Gegner zu sein. Robert A. Millikan war ein praktisch unbekannter Professor an der neugegründeten University of Chicago, über vierzig Jahre alt, hatte nur wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen. Felix Ehrenhaft dagegen, an der ehrwürdigen Universität Wien, galt – zwölf Jahre jünger als Millikan – als ein vollendeter Physiker und hatte ein Dutzend Veröffentlichungen aufzuweisen⁵. Ihre Meinungsdivergenz betraf den Wert der kleinsten in der Natur vorkommenden elektrischen Ladung. Beide waren sich darüber im klaren, daß der Gegenstand ihrer experimentellen Forschungen wie auch der eigentliche Sinn ihrer Kontroverse die Grundlagen der Wissenschaft als solche berührte.

Millikans erste größere Veröffentlichung beginnt wie folgt:

Unter allen physikalischen Konstanten gibt es zwei, deren überragende Bedeutung allgemein anerkannt sein dürfte: die eine ist die Lichtge-

schwindigkeit, die heute in vielen der grundlegenden Gleichungen der theoretischen Physik erscheint, und die andere ist die letzte, die elementare elektrische Ladung, deren Kenntnis die Bestimmung der absoluten Werte aller Atom- und Molekulargewichte ermöglicht, wie auch der absoluten Anzahl der Moleküle in einer gewissen Gewichtsmenge irgendeiner Substanz, der kinetischen Bewegungsenergie eines beliebigen Moleküls bei einer gegebenen Temperatur und einer beträchtlichen Zahl anderer physikalischer Größen.

Während die Lichtgeschwindigkeit jetzt mit einer Genauigkeit von einem Zwanzigtausendstel bekannt ist [weitgehend dank Albert A. Michelson, R. A. Millikans Mentor und Kollegen in Chicago], ist der Wert der elementaren elektrischen Ladung bis vor kurzem noch sehr ungewiß geblieben⁶.

Seit der Zeit Michael Faradays war es bekannt, daß im Verlauf der Elektrolyse 1 Grammatomgewicht univalenten Materials an der Elektrode freigesetzt werden, wenn ca. 10^5 Coulomb Ladung durch den Elektrolyt hindurchgeht. Angenommen, diese Ladungsmenge werde durch N Ionen, von denen jedes die Ladung e besitzt, getragen (wobei N die Avogadro'sche Zahl ist), so ist $Ne \approx 10^5$ Coulomb. Wenn man e nun unabhängig mit hinreichender Genauigkeit mißt, so ist auch N , die Zahl der Atome pro Grammatomgewicht jeder beliebigen Substanz ebenso mit Genauigkeit bekannt, und als Ergebnis können auch viele andere grundlegende Konstanten berechnet werden. Am Anfang des 20. Jahrhunderts wurde e von vielen Physikern mit der Größe der Ladung des Elektrons gleichgesetzt; jedoch stellten unzulängliche Werte für e den Wert von N und alles, was daraus folgte, in Frage.

Die Kontroverse zwischen Ehrenhaft und Millikan, oft als »der Streit um das Elektron« bezeichnet, kam im Frühjahr 1910 zum Ausbruch. Nur ein Jahr zuvor hatte Ehrenhaft Meßergebnisse für den Wert des »elektrischen Elementarquantums«, generell in Übereinstimmung mit Millikan, veröffentlicht. Aber nun machte er plötzlich bekannt, er habe Ladungen von erheblich geringerer Größe als denen des Elektrons festgestellt. Millikan schrieb später, Ehrenhafs neue Behauptung »würfe, mit Fug und Recht gesagt, die grundsätzlichsste Frage der modernen Physik auf.«⁷ In einer Reihe von immer umfangreicheren und detaillierteren Aufsätzen behaupteten Ehrenhaft und seine Schüler die Entdeckung von »Subelektronen«. Das heißt, sie fanden Flüssigkeits-

tröpfchen, Metallteilchen und andere Kleinstobjekte mit Ladungen von einer viel geringeren Größe als der des Elektrons. Im Laufe der Zeit fand Ehrenhaft Ladungen von der Hälfte, einem Fünftel, einem Zehntel, einem Hundertstel, einem Tausendstel von der des Elektrons. Im weiteren Verlauf seiner Forschungen schien kein Grund für die Annahme zu bestehen, daß Ehrenhaft je auf eine untere Grenze für die elektrische Ladung in der Materie stoßen würde. Andererseits wurden aber diese Resultate in kaum einem anderen Laboratorium außer denen der Wiener Gruppe erzielt. Und zur gleichen Zeit waren Millikan und seine Schüler, neben anderen, emsig damit beschäftigt, das Belegmaterial für die Existenz des unitären Elektrons zu verfeinern und zur Veröffentlichung zu bringen.

Die Kontroverse fand noch jahrelang ihren Widerhall in der wissenschaftlichen Welt. Die Zahl der ihr gewidmeten Aufsätze wuchs auf ein Vielfaches. Zu den Diskussteilnehmern auf wissenschaftlichen Tagungen zählten Max Planck, Jean Perrin, Albert Einstein, Arnold Sommerfeld, Max Born und Erwin Schrödinger. In regelmäßigen Abständen wurden die Belege mit Gründlichkeit besprochen⁸. 1927, drei Jahre, nachdem Millikan den Nobelpreis erhalten hatte, zum Teil für seine Arbeit über die Ladung des Elektrons, nannte der geachtete Physiker O. D. Chwolson den Streit immer noch eine »heikle Angelegenheit«, und er führte dazu aus: »Er dauert bereits 17 Jahre und bis jetzt kann nicht behauptet werden, daß er nach der einen oder der anderen Seite endgültig gelöst sei, d. h. daß alle Forscher sich für die eine der beiden möglichen Lösungen dieser Frage entschieden hätten. Die Sachlage ist einigermaßen sonderbar«⁹.

Will man heute noch die Ernsthaftigkeit der Behauptungen Ehrenhafs würdigen, so muß man sich vor ahistorischen Unterstellungen hüten. Erstens könnte, wer mit dem schönen »Millikanschen Öltropfenversuch« vertraut ist, heute eine routinemäßige Übungsaufgabe in Physikvorlesungen für Anfänger, dazu neigen, gegenteilige Ergebnisse rundweg abzulehnen. Solche Schularbeiten sind jedoch nur pädagogische Übungsstücke zur Festigung des Glaubens an das Elektron und nicht etwa ernstgemeinte Versuche, den Glauben daran auf die Probe zu stellen. Gleichwohl ist es ziemlich schwierig, »gute Meßdaten« zu bekommen. Nach der neuerlichen Untersuchung eines Dozenten über seine Unterrichtserfahrungen: »Trotz der Verbesserungen

an dem Millikanschen Öltropfenapparat . . . bleibt dieser Versuch wohl die enttäuschungsreichste Laborübung im physikalischen Grundstudium¹⁰.

Zweitens ist die Existenz einer Art von »subelektronischer« Ladung in neuerer Zeit als Teilaspekt des mit Quarks arbeitenden Modells der Elementarteilchenphysik postuliert worden. In diesem Modell werden Objekte mit Ladungsgrößen von einem oder zwei Dritteln des Elektrons vorausgesetzt; jedoch stimmen Theorie und experimentelle Praxis bis jetzt darin überein, daß solche Bruchteile von Ladungen nur mit großer Unwahrscheinlichkeit außerhalb eines Kernteilchens (auf den Tröpfchen und ähnlichen von Ehrenhaft und Millikan beobachteten Teilchen) auch nur einmal in Erscheinung treten würden, geschweige denn immer wieder. In seiner Veröffentlichung vom Februar 1910 machte Millikan tatsächlich ein passantes eine Bemerkung, die Ehrenhaft später aufgriff: »Ich habe eine unsichere und nie wieder verzeichnete Beobachtung fallen lassen, die offenbar einen einfach geladenen Tropfen betraf und einen Wert für die Ladung auf dem Tropfen ergab, der etwa 30% unter dem endgültigen Wert für e lag.«¹¹ Die Belege deuten in überwältigender Mehrzahl darauf hin, daß diese eine Anomalie in Millikans veröffentlichten Versuchsergebnissen (und in den Publikationen anderer zur gleichen Materie, ausgenommen die Ehrenhaften und seiner Schule) das Resultat eines Meßfehlers war. Dies war die Erklärung, die Millikan vorschlug, und sie hat allgemein Annahme gefunden¹².

Drittens dürfen wir nicht auf die frühen Phasen in der Entwicklung unsere heutigen Auffassungen über die entgegengesetzten Standpunkte übertragen, noch Kriterien auf sie anwenden, die eher für die abschließende Begründung einer Theorie geeignet sind. Man konnte um 1910 nicht wissen, wie anregend die Ergebnisse von Millikans Forschungen über das Elektron schließlich nicht nur in der Physik, sondern auch in der Chemie, Astronomie und der Ingenieurwissenschaft wirken würden. Ebenso wenig konnte man vorhersehen, daß die erstaunlichen Ergebnisse Ehrenhaften überhaupt nichts Brauchbares anregen würden, ganz anders als zum Beispiel die Versuche von Henri Becquerel, der die Erforschung der Radioaktivität mit einem Experiment einleitete, das er selbst völlig fehldeutete. Nur im Rückblick nehmen sich die »Risiken«, die Millikan und Ehren-

haft in der Frühzeit eingingen, sehr unterschiedlich aus.

Viertens war die Kontroverse damals von gesteigertem Interesse, denn sie betraf nicht nur die Natur der elektrischen Ladungen, sondern auch das Verhalten der als Träger der Ladungen wirkenden Kleinteilchen. Neuere Verbesserungen in der Mikroskopie, wie auch die grundlegenden Arbeiten von Einstein, Marian von Smoluchowski und Perrin, hatten die von Wolfgang Ostwald so genannte »Welt der vernachlässigten Dimensionen« zugänglicher gemacht. Man war weithin der Ansicht, daß Forschungen über den Kolloid-Zustand (den Zerstreuungszustand der Materie, mit Teilchengrößen zwischen 10^{-4} und 10^{-7} cm) großartiges Grenzland war sowohl für die reine als auch die angewandte Wissenschaft, worin die Kluft zwischen organischer und anorganischer Materie überbrückt werden könnte. Dies Gebiet schien äußerst vielversprechend für die medizinisch-biologische Forschung wie auch für industrielle Anwendungen.¹³ Vor diesem Hintergrund gewannen die Diskussionen um die auf Kleinteilchen getragenen Ladungen weiter an Bedeutung.

5. Auf dem Weg zur Elektronenladung Methode I

In aller Offenheit hat Millikan die Reihe von Zufällen beschrieben, die ihn auf die rechte Bahn brachten. Bei einem der wöchentlichen physikalischen Seminare in Chicago gab er eine Besprechung von J. J. Thomsons großem Aufsatz aus dem Jahre 1897 über die Kathodenstrahlung. Später schrieb er darüber:

[Der Aufsatz] brachte auf eine unerreichte Weise die Belege für die Ansicht zusammen, daß die »Kathodenstrahlung« nicht, wie Lenard und die Deutschen behaupteten, aus Ätherwellen bestehe, sondern vielmehr aus Materieteilchen, die elektrische Ladungen tragen, wobei jedes Teilchen die Masse von etwa einem Tausendstel von der des leichtesten bekannten Atoms besitzt, und die somit die winzigsten aller bekannten Massen darstellen, die es gibt. Er nannte diese Teilchen »Korpuskeln« . . . [Diese Arbeit] machte einen großen Eindruck auf mich, und gab mir den Start in der Forschungstätigkeit, die meine Lebensarbeit geworden ist.¹⁴

Doch in den nächsten zehn Jahren gingen Millikans Forschungen nicht gut vonstatten. Bis 1907 hatte er nur einen Artikel über seine Dissertation von 1895 veröffentlicht, zwei kurze Mitteilungen 1897 und eine 1906, eine Übersetzung von Paul Drudes *Optik* und fünf einführende Lehrbücher. 1907 veröffentlichte er mit George Winchester zwei Aufsätze über die Photoelektrizität, die eine gewisse Beachtung fanden⁴³. In seiner Autobiographie deutet Millikan an, er sei damals mit sich ziemlich unzufrieden gewesen. Er gebraucht Ausdrücke wie »diese anscheinend fruchtlose Bemühung«⁴⁴ und »meine eigenen Mißerfolge in der Forschung«⁴⁵ zur Kennzeichnung seiner wissenschaftlichen Arbeit. Er mag durchaus besorgt gewesen sein über seine Aussichten als wissenschaftlicher Forscher. Im Jahre 1908 – über seinen Grund würde man nur zu gern Näheres wissen – »gab er dem Lehrbuchschreiber den Abschiedskuß ... und [durchaus im Bewußtsein, weitere Mißerfolge zu riskieren] begann er mit Intensität an dem neuen Forschungsproblem zu arbeiten«⁴⁶ – nämlich, die Größe der Elementarladung e zu bestimmen.

Vier offensichtliche Pluspunkte sprachen für Millikans Wahl dieses Forschungsgegenstands. Zum ersten »waren alle an der Größe der Ladung des Elektrons interessiert«⁴⁷, die bis dahin mit geringer Genauigkeit und sehr unterschiedlichen, von der jeweils benutzten Methode abhängigen Resultaten bestimmt worden war. Ein weiterer Vorteil war darin zu sehen, daß Millikan die beste experimentelle Methode dafür ganz selbstverständlich und ziemlich einfach schien, wiewohl sich dies als unzutreffend erwies. Drittens paßte die Messung einer grundlegenden Konstante mit erhöhter Genauigkeit (statt der Suche nach kühnen Neuerungen in der Physik, wie sie Ehrenhaft unternehmen sollte) viel mehr zu Millikans Begabung und Temperament und ebenso zu der Tradition, die Michelson vorgegeben hatte. Und viertens erschien Millikan die für das Arbeitsvorhaben erforderte theoretische Grundlage bzw. ihre epistemologischen Voraussetzungen ganz durchsichtig: »In der sicheren Überzeugung, daß das Problem des Werts der elektrischen Ladung (Franklins grundlegendes Elektrizitätsatom – dem Anschein nach unveränderlich und unteilbar – der vorausgesetzte Einheitsbaustein des elektrischen Universums) von grundlegender Wichtigkeit war, machte ich mich an die Arbeit.«⁴⁸

Er hatte nichts zu schaffen mit all dem Aufruhr und der bitteren

Auseinandersetzung, die in Europa um die »Wirklichkeit« der Moleküle, der Atome und der Elektronen oder auch um die Zulässigkeit diskreter statt kontinuierlicher Größen tobten. Die Elektronenladung existierte, und es war von »grundlegender Wichtigkeit«, den Wert der Ladung zu ermitteln. Brauchte Millikan philosophische Absicherungen für seine Tätigkeit, so fand er sie passenderweise in der Arbeit des großen amerikanischen Volkshelden, Staatsmanns und Forschers, des vernünftigen Benjamin Franklin.

Millikan verweist beständig auf Franklin als den ersten, »der eine körnige Struktur und materielle Wirklichkeit als Kennzeichnung für »das elektrische Teilchen oder Atom«⁴⁹ formulierte, und zitiert häufig einen Satz, den er Franklin zuschrieb: »Die elektrische Materie besteht aus äußerst feinen Teilchen, denn sie vermag die gewöhnliche Materie zu durchdringen, sogar die dichteste, und dies mit derartiger Freiheit und Leichtigkeit, daß sie keinerlei nennenswerten Widerstand erfährt.«⁵⁰ Franklin ist der Ahnherr dieser Forschungsrichtung, »denn es gibt keinerlei elektrische Theorien, die weiter zurückgingen als die unseres eigenen Benjamin Franklin«⁵¹. Das Ergebnis aller neueren Forschung sei es lediglich, »uns ganz nahe dorthin zurückzubringen, wo Franklin 1750 war, mit dem einzigen Unterschied, daß unsere moderne Elektronentheorie auf einer Fülle sehr direkten und überzeugenden Beweismaterials beruht.«⁵² 1948, im Rückblick auf die Feier des fünfzigjährigen Jubiläums von J. J. Thomsons »unzweideutiger Aufstellung der Elektronentheorie der Materie«, bemerkte Millikan, da Franklin seine Versuche im Jahre 1747 begonnen habe, hätte man ebenso das zweihundertjährige Jubiläum von »Franklins Entdeckung des Elektrons« feiern sollen⁵³. Noch bevor Millikan sich ernsthaft seiner Arbeit über die Elektronenladung zuwandte, war eine Darstellung von Franklins Leistungen (nebst einem ganzseitigen Porträt) in einigen der frühen Schullehrbücher veröffentlicht worden, an denen Millikan als Co-Autor beteiligt war. Ein 1908 veröffentlichtes Werk beschreibt Franklins »sogenannte Einflüssigkeitstheorie« und fügt hinzu: »Eine neuerliche Variante ... hat in letzter Zeit Prominenz gewonnen durch ... Lord Kelvin und J. J. Thomson«, die »sehr kleine negativ geladene Korpuskeln, oder Elektronen« besonders hervorhebe⁵⁴.

Millikan war nicht der einzige, der eine Verbindung zwischen

Franklins Vorstellungen und der modernen Elektrizitätstheorie sah. Um nur zwei Beispiele zu nennen: Rutherford hatte 1906 in Philadelphia in einer Ansprache anlässlich der Zweihundertjahrfeier von Franklins Geburtstag darauf hingewiesen⁵⁵, und einige Jahre zuvor hatte Lord Kelvin den Gedanken in einer Arbeit weiter ausgeführt, die sich auf die Ausarbeitung von Franklins Theorie durch Aepinus konzentrierte⁵⁶. Doch als Millikan im ersten Jahrzehnt des neuen Jahrhunderts mit seiner Arbeit begann, bestand keine Notwendigkeit, die atomistische Auffassung der Elektrizität zu akzeptieren, geschweige denn eine mit Franklin verknüpfte Theorie zu untersuchen. Wäre Millikan Pupins Beispiel gefolgt, so hätte er eine konkurrierende Theorie der Elektrizität unterstützen können, die auf dem thematischen Konzept des Kontinuums basierte, und nicht auf dem thematischen Konzept des Atomismus. Obwohl Maxwells Theorie der Elektrizität sich, äußerlich gesehen, dem Wesen der Elektrizität gegenüber agnostizistisch gab, ließ sie es zu, daß man sich die Elektrizität eher in der Form einer kontinuierlichen Ortsveränderung vorstellte, einer Bewegung innerhalb des elektromagnetischen Äthers, als im Sinne einer atomaren Struktur.⁵⁷ 1873 bemerkte Maxwell in seinem Werk *Electricity and Magnetism*, die Elektrolyse lege die Vorstellung einer bestimmten Größe für die elektrische Ladung nahe: »Der Bequemlichkeit in der Beschreibung halber könnten wir diese konstante Molekülladung (die durch Faradays Versuche zum Vorschein kam) ein Elektrizitäts-Molekül nennen«.⁵⁸ Er fügte jedoch hinzu, diese handliche Terminologie, »grob wie sie ist und nicht im Einklang mit dem Rest dieser Abhandlung«, solle uns nicht dazu verleiten, den Elektrizitätskörnern Realität zuzuschreiben:

[...] die Theorie der Molekül-Ladungen mag als eine Methode dienen, uns an eine beträchtliche Menge Tatsachen über die Elektrolyse zu erinnern. Äußerst unwahrscheinlich ist es jedoch, daß wir, wenn wir einst die wahre Natur der Elektrolyse verstehen, in irgendeiner Form die Theorie der Molekül-Ladungen beibehalten werden, denn zu der Zeit werden wir eine sichere Basis gewonnen haben, auf der wir eine wahre Theorie des elektrischen Stroms ausbilden und dadurch von diesen vorläufigen Hypothesen unabhängig werden können.

Die Ansicht, nach der der Atomcharakter der Elektrizität nur eine heuristische Hilfsvorstellung sei, war in England und auf

dem europäischen Kontinent weit verbreitet, bevor die korpuskulare Auffassung durch die Arbeit von Pieter Zeeman, H. A. Lorentz und J. J. Thomson Erfolge zu verzeichnen hatte. Arthur Schuster schrieb über die frühen achtziger Jahre des 19. Jahrhunderts: »Die separate Existenz eines vereinzelten Elektrizitätsatoms kam mir nie als Möglichkeit in den Sinn, und wäre sie dies und hätte ich je derart heterodoxen Meinungen offen Ausdruck gegeben, so hätte ich schwerlich als ernsthafter Physiker gelten können, denn die Grenzen der in der Wissenschaft zulässigen Heterodoxie sind schnell erreicht.«⁵⁸ Im Jahre 1897 glaubte Lord Kelvin noch, man solle den Gedanken sorgfältig erwägen, daß »die Elektrizität eine kontinuierliche, homogene Flüssigkeit« sei.⁵⁹ Max Planck hat bekannt, daß er selbst noch im Jahre 1900 nicht völlig an die Elektronenhypothese geglaubt habe.⁶⁰ Und selbst soweit eine atomistische Theorie der Elektrizität überzeugend schien, mußte sie nicht unbedingt eine unitäre Ladung für das Elektron implizieren. Millikan stellte später fest, die Möglichkeit, daß die Elektronenladung lediglich ein »statistischer Mittelwert« sei, habe damals bei einigen Physikern Unterstützung gefunden⁶¹. Nach allen verfügbaren Unterlagen zu schließen, hat Millikan jedoch weder zu Beginn seiner Arbeit am Elektron noch etwa später diese Möglichkeit einer ins einzelne gehenden Prüfung unterzogen.

Im nachhinein ist es leicht, Belege zu erkennen, die für alle die Debatte zugunsten der Teilchentheorie der unitären elektrischen Ladung endgültig hätten entscheiden sollen, und dies noch vor Millikans Arbeiten: J. J. Thomsons Messung des konstanten Verhältnisses von Ladung und Masse bei Kathodenstrahlen; Rutherfords Messung der Ladung auf α -Teilchen; die Ladung auf Nebeltröpfchen verschiedener Flüssigkeiten, die J. J. Thomson, sein Schüler Townsend und H. A. Wilson bestimmt hatten⁶². Aber selbst wo die Fehlergrenze keineswegs außerordentlich groß war, hatten alle benutzten Methoden einen vernichtenden Fehler gemeinsam mit der Berechnung der in der Elektrolyse ausgetauschten Ladungseinheit: Sie stellten die Bestimmung einer *durchschnittlichen* Ladung aufgrund der Beobachtung von sehr vielen hypothetischen Einzelladungen zu ein und derselben Zeit dar. Selbst im besten Fall waren das indirekte Messungen der Ladung e ; zumindest aber wäre e der statistische Mittelwert bei einer Streuung von unbestimmter Form. Niemand vor Millikan

63) Millikans Bestimmung von e anhand der Beobachtung geladener Wolken (die wir seine Methode I nennen) gründete auf folgenden Arbeiten: J. J. Thomson, »On the Charge of Electricity Carried by a Gaseous Ion«, *Philosophical Magazine* 5 (1903), 346-355; J. J.

Thomson, »On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures«, *Philosophical Magazine* 48 (1899), 547-567; and H. A. Wilson, »Determination of the Charge on the Ions Produced in Air by Röntgen Rays«, *Philosophical Magazine* 5 (1903), 429-440. Zuerst beobachtet man eine Schicht von Nebeltropfen, alle vermutlich von der Masse m , dem Radius a und der Dichte mit einer Fallgeschwindigkeit von v_1 in einem überlagerten elektrischen Feld E , das nun auf die Ladung q jedes einzelnen Tropfen einwirkt.

Danach gilt

$$\frac{mg}{mg + Eq} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

Unter der Annahme, daß das Gesetz von Stokes für in Luft (mit der Viskosität μ) fallende Tropfenchen unverändert gültig ist, so ist

$$F_{\text{net}} = 6\pi\eta av_1 = mg \quad (\text{im Gleichgewicht}) = \left(\frac{4}{3}\pi a^3 \rho\right)g \quad (2)$$

Deshalb,

$$v_1 = \frac{2}{9} \cdot \frac{ga^2 \rho}{\mu} \quad (3)$$

Oder

$$a^3 = \left(\frac{9\mu v_1}{2g\rho}\right)^{3/2} \quad (4)$$

Aufgelöst nach q :

$$q = \frac{mg}{E} \cdot \frac{v_2 - v_1}{v_1} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{9\mu}{2g}\right)^{3/2} \cdot \frac{g}{E\delta^{1/2}} \cdot (v_2 - v_1) \cdot v_1^{1/2}$$

Angenommen, q ist ein ganzzahliges Vielfaches der Ladungseinheit e ,

$$e = \frac{q}{n} \quad (\text{wobei } n = 1, 2, 3, \dots)$$

hatte die Ladung eines einzelnen Objekts gemessen und gefunden, daß sie gleich einer Elektrizitätseinheit sei, bzw. gleich einem beliebig kleinem Vielfachen dieser; und noch weniger ein geladenes Objekt beobachtet, das seine Ladung un stetig um ein, zwei, drei ... Ladungseinheiten änderte.

Aber auch Millikan hatte nicht die geringste Hoffnung, solches zu tun, als er sich daran machte, den Wert der Elektronenladung zu messen. Als Millikan die Arbeit mit seinem Schüler L. Begeman aufnahm, benutzte er die Methode von H. A. Wilson im wesentlichen unverändert. Wolken von Tropfenchen wurden in einer Expansions-Nebellkammer zwischen den horizontalen Parallelplatten eines geladenen Schwebekondensators erzeugt. Sie beobachteten die langsam sinkenden oberen Schichten der Wolken, welche die kleinsten Tropfen enthielten. Eine Teilmenge fiel unter dem Einfluß der Schwerkraft (mit der Geschwindigkeit v_1), eine andere fiel mit der zusätzlichen Hilfe eines im Kondensator aufgebauten elektrischen Felds schneller (mit der Geschwindigkeit v_2). Angenommen, erstens, daß das Gesetz von Stokes für die Tropfenchen Gültigkeit hatte, zweitens, daß jede der Tropfenchen sich an einem einfach geladenen Ion bildete und nicht aufgrund von Verdunstung merklich schrumpfte, und drittens, daß die verschiedenen, aufeinander folgenden Wolken alle ähnlich gebildet waren, so konnte man rasch die Ladung der hypothetischen Elektrizitätseinheit aus den beobachtbaren Größen erhalten (Fallgeschwindigkeiten v_1 und v_2 ; elektrische Feldstärke E , Tropfendichte δ ; und Viskosität des Gases μ). Die durchschnittliche Ladung pro Tropfenchen würde sich so ergeben aus

$$q = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{9\mu}{2g}\right)^{3/2} \cdot \frac{g}{E\delta^{1/2}} (v_2 - v_1) v_1^{1/2}$$

Diese Methode (im folgenden Methode I genannt) hatte eine Fülle von unbefriedigender Eigenschaften, sowohl in theoretischer als auch in praktischer Hinsicht. Wilsons veröffentlichte Messungen hatten eine Wertverteilung für die Bestimmung von e gezeigt, die von $2,0 \times 10^{-10}$ esE bis $4,4 \times 10^{-10}$ esE, mit einem Mittelwert von $3,1 \times 10^{-10}$ esE, streute. (Vorher, im Jahre 1903, hatte J. J. Thomson mit einer ähnlichen Methode $e = 3,4 \times 10^{-10}$ esE ermittelt.) Jedoch in den Jahren 1907/08 war es

70

Millikans Plan, zum Zweck der Erhöhung der Genauigkeit nur geringfügige Änderungen am Verfahren vorzunehmen. So verwendeten Millikan und Begeman Radium statt Röntgenstrahlen zur Ionisation des feuchten Gases vor der Expansion, durch die die Wolke gebildet wurde. Die Ergebnisse von zehn Beobachtungsreihen zur Bestimmung von e hatten eine Verteilung von $3,66 \times 10^{-10}$ esE bis $4,37 \times 10^{-10}$ esE, mit dem Mittelwert von $4,03 \times 10^{-10}$ esE. Offensichtlich war dies eine Verbesserung gegenüber Wilsons Ergebnissen – obwohl es mit ihnen die implizite Voraussetzung teilte, die das Vorkommen einer statistischen Verteilung von abweichenden Werten der elektrischen Ladungen in der Natur ausschloß.

6. Die zufällige Entdeckung eines Experiments Methode II

Anfang Januar 1908 wurde die gemeinsame Arbeit von Millikan und Begeman auf der Tagung der American Physical Society in Chicago vorgetragen. Eine Zusammenfassung von einer Seite erschien im Februar des Jahres⁶⁴. Fast unmittelbar wurde von prominenter Seite Aufmerksamkeit auf dieses Erstlingswerk gelenkt – durch niemand anderen als Ernest Rutherford⁶⁵. Millikans Resultat war gerade zur rechten Zeit gekommen, um Rutherford und Geiger für ihre größere neue Forschungsarbeit Hilfestellung zu leisten: Sie hatten die Größe der Ladung des α -Teilchens mit $9,3 \times 10^{-10}$ esE gemessen und machten die Annahme, dies müsse gleich $12e$ sein. Dementsprechend müsse e gleich $4,65 \times 10^{-10}$ esE sein. Die früher von Thomson und Wilson ermittelten Werte waren um 30% niedriger gewesen, aber die neuen Werte von Millikan und Begeman waren nur um 15% niedriger. Obwohl die Arbeit von Millikan und Begeman als die beste erschien, deutete Rutherford doch an, daß auch sie verbessert und die Lücke geschlossen werden könne. Er äußerte die Vermutung, die geschätzte Zahl der vorfindlichen Ionen (Tropfenchen) sei zu hoch und der Wert für e zu niedrig ausgefallen, weil man die Verdunstung der Tropfenchen bei diesen Methoden nicht hinreichend berücksichtigt habe. In Erwartung entsprechender Korrekturen an den Methoden der anderen Forscher

71

benutzte die Manchester-Gruppe um Rutherford weiterhin mit Zuversicht dessen Wert $e = 4,65 \times 10^{-10}$ esE, bis 1912 Bohrs frühe Arbeiten erschienen; »seit der Messung durch Rutherford und Geiger im Jahre 1908 war er in Manchester das Evangelium gewesen«⁶⁶.

Durch Rutherfords Anregung ermuntert, wenn solches überhaupt notwendig war, hatte Millikan seine Strategie nun klar vor Augen: Die Fehlerquelle der Verdunstung mußte ausgeschaltet werden⁶⁷. Millikan hatte vor, auf seine übliche schrittweise Art zu arbeiten, indem er das elektrische Feld so anordnete, daß die obere Außenfläche der geladenen Wolke stabil gehalten wurde, um es so, während sie im Schwebezustand gehalten wurde, zu ermöglichen, die Verdunstungsrate zu studieren. Diese Arbeit wurde anscheinend im Frühjahr und Sommer 1909 durchgeführt⁶⁸ und schien zunächst nur kleinere Abänderungen der bisherigen Verfahren zu erfordern. Vor allem wollte man eine außergewöhnlich große Batterie (10 000 Volt) benutzen, um ein stärkeres elektrisches Feld aufzubauen, das im Unterschied zu früher der Wirkung der Schwerkraft entgegenwirkte.

Als Millikan dieses elektrische Feld einschaltete, ereignete sich ein Vorfall, der ihm nach all der Zeit die Möglichkeit einer zielbewußten Ausrichtung gab, einer Zusammenfassung seiner Talente, seiner ungeheuren Energie, seiner Begabung als Beobachter und Forscher, seines Geschicks, Studenten nutzbringend einzusetzen, seiner instinktiven Fähigkeit, bedeutende und grundlegende Probleme zu erkennen, und seines ausgezeichneten Blicks für den Zufall, der einen unerwarteten neuen Zugang eröffnet. Er stieß von ungefähr auf eine Reihe von Zufälligkeiten, die er in den aus seiner Arbeit hervorgehenden Veröffentlichungen von 1910, im Entwurf der Autobiographie und in der veröffentlichten Autobiographie konsequent und in aller Offenheit beschrieben hat. Wie er es ausdrückt: der Zufall »ermöglichte es zum ersten Mal, alle Messungen an einem und denselben einzelnen Tröpfchen vorzunehmen . . . und gestattete es, die Anziehung und Abstoßung von Eigenschaften eines einzelnen isolierten Elektron zu untersuchen . . .«⁶⁹.

Als er nämlich den Hebel umlegte, wurde die Wolke nicht etwa stationär festgehalten, sondern ganz plötzlich und vollständig zerstäubt. Das starke Feld übte seine Wirkung auf die verschiedenen (und nicht etwa, wie man immer angenommen hatte,

gleichartig) geladenen Tröpfchen aus und fegte sie hinweg; so war da gar keine obere Außenfläche einer Wolke übrig, an der man hätte Messungen anstellen können. In der Tat fand so die das Jahrzehnt hindurch geübte Technik der Messung von e aufgrund der Wolkenbeobachtung ein plötzliches Ende; ich habe keine Anhaltspunkte, daß sie je wieder jemand benutzt hat. Millikan schrieb dazu, die Zerstäubung »schien zunächst mein Experiment zu ruinieren. Aber als ich den Versuch wiederholte, sah ich sofort, daß ich etwas von weit größerer Wichtigkeit vor mir hatte als die obere Außenfläche . . . Denn wiederholte Tests zeigten, daß, immer wenn eine Wolke so durch mein starkes Feld zerstäubt wurde, einige wenige vereinzelte Tröpfchen im Blickfeld verblieben«⁷⁰, und zwar gerade die mit der richtigen Ladung im Verhältnis zu ihrer Masse, wodurch eben ihr Gewicht im elektrischen Feld in der Schwebe gehalten werden konnte⁷¹.

Es war dies das erste Mal, daß einer der Wolken-Experimentatoren sich auf das einzelne geladene Tröpfchen konzentrierte statt auf die ganze Wolke. Tatsächlich war Millikan nur aus Versetzen auf einen neuen Apparat gestoßen, eine Art hochempfindliche Waage, die ein Objekt von der Größenordnung von 10^{-13} bis 10^{-19} g im Sichtfeld halten konnte. Es bezeichnete diesen Übergang von der Methode I (sinkende Wolke von Wassertöpfchen) zur Methode II (in der Schwebe gehaltene Wassertöpfchen, später Alkoholtöpfchen). War dies auch nur ein Übergangszustand, bevor er zur Methode III kam (nicht in der Schwebe gehaltene Öltropfen), so hatte Millikans Scharfblick ihn doch zu einem Instrument hingeführt, das ein neues experimentelles Arbeitsgebiet erschließen sollte, um so mehr als das Glück der Prinzen von Serendip noch einmal bei ihm einschlug:

Ganz von ungefähr bemerkte ich . . . bei mehreren Gelegenheiten, als ich es versäumt hatte, die Strahlen vom Radium [für die Ionisation der Luft vor der Wolkenerzeugung] abzuschirmen, daß dann und wann einer der [schwebenden Tropfen] plötzlich seine Ladung wechselte und sich im Feld aufwärts oder abwärts zu bewegen begann . . . Dies eröffnete die Möglichkeit, [später] nicht nur die Ladungen auf einzelnen Tropfen exakt zu messen, wie ich es bisher schon getan hatte, sondern auch die Ladung, die von einem einzelnen atmosphärischen Ion getragen wurde, und zwar durch einen Vergleich der Geschwindigkeiten, mit dem ein Tropfen sich durch das elektrische Feld bewegte, bevor und nachdem er von ungefähr ein Ion einfing⁷².

Die Beobachtung eines im Feld schwebenden Wassertropfchens erleichterte die Berücksichtigung der Verdunstung und erhöhte so die Präzision der Messungen⁷³. Diese Sachlage stand demnach in direkter Entsprechung zu Rutherfords Herausforderung. Und der weitere Verlauf von Millikans Arbeit ergab sich ganz natürlich – von der Vertauschung des Wassers mit einer Flüssigkeit mit einem weit geringeren Verdunstungsdruck bis zu den langwierigen Mühen, die Unsicherheitsquellen zu eliminieren oder einzuzengen, zum Beispiel durch eine Modifikation des Gesetzes von Stokes für kleine Tropfchen. Selbst in den ersten Monaten, im Sommer des Jahres 1909, behauptete Millikan, die »Ladungen gingen tatsächlich immer ohne weiteres innerhalb der Fehlergrenzen meiner Stoppuhrablesungen auf, 1, 2, 3, 4 oder sonst ein genaues Vielfaches der kleinsten Ladung auf einem [Wasser]-Tropfchen, die ich je erzielt habe. Hier also war der erste entschiedene, scharfe, unzweideutige Beweis, daß die Elektrizität entschieden unitär in ihrer Struktur ist ...«⁷⁴.

Die Wichtigkeit dieser Entdeckung sollte nicht die Aufmerksamkeit von der Tatsache ablenken, daß Millikan das Experiment, das die Quelle seines frühen Ruhms war, weder entworfen noch erdacht hatte; vielmehr entdeckte er das Experiment⁷⁵. Das Wesen dieser Entdeckung unterscheidet sich in gewisser Weise von der Entdeckung des Uranus oder Amerikas. Niemand hatte die Existenz einzelner Tropfchen bezweifelt. Irgendein beliebiger hätte, ein gutes Jahrzehnt oder mehr zuvor, vorhandene Instrumente zusammenstellen können, wenn ihm nur der Gedanke gekommen wäre, einen Tropfen zu beobachten statt einer Wolke. Der von Millikan 1909 benutzte Apparat war ein einfaches Gebilde aus verfügbaren Bestandteilen; selbst die Herstellung einer Batterie von hinreichender Größe war seit langem keine besondere Herausforderung mehr gewesen. Es ist überhaupt unklar, warum Thomson, Townsend und Wilson, unter vielen anderen, nicht von vorneherein daran gedacht hatten, die elektrische Ladung mit der weit einfacheren Methode der einzelnen Tropfchen zu bestimmen statt durch die ziemlich komplexen Wolkenexperimente. Der Würgegriff, in dem eine Tradition der Arbeit an Wolken die wissenschaftliche Einbildungskraft hielt, scheint sich erst durch Millikans »Unfall« gelöst zu haben.

15. Zum Verständnis von Ehrenhafs Vorausannahmen

Die Fähigkeit, die eigenen Vorausannahmen nutzbar zu machen und sie, falls nötig, zu transzendieren, bezeichnet den Hauptunterschied zwischen Millikan und Ehrenhaft in der Zeit um 1910.

Ich wende mich hier noch einmal Ehrenhaft zu, um den Versuch zu machen, seine Vorausannahmen und Beweggründe zu verstehen. Daß die Notizbücher seiner Laborgruppe nicht auf uns gekommen sind, behindert die gründlichere Untersuchung, die er verdient, aber vieles läßt sich doch aus den veröffentlichten Materialien erschließen. Aus der Fülle der Publikationen, die aus den Wiener Laboratorien hervorgingen, bringt eine von Ehrenhaft 1910 in der *Physikalischen Zeitschrift* publizierte Arbeit

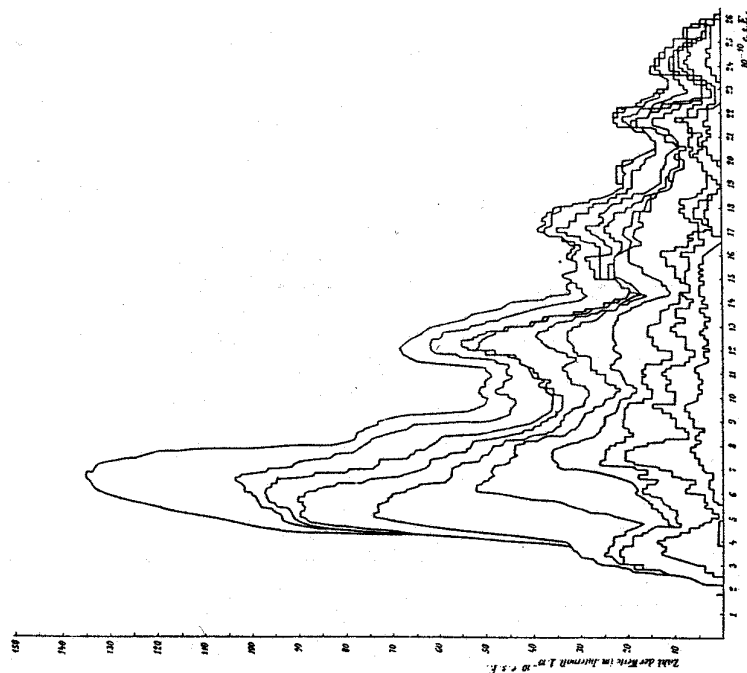


Fig. 5.

besonders wichtige Aufschlüsse¹³⁴. Auch in diesem Fall unterstützen seine entscheidenden Meßwerte die Behauptung, »daß, wenn ein unteilbares Elektrizitätsatom vorhanden ist, dieses scheinbar kleiner als $1 \cdot 10^{-10}$ absolute elektrostatische Einheiten sein müßte, [wenn] überhaupt ein solches existieren kann«. Ehrenhaft legt eine Serie von 1000 Einzelmessungen an Nebeltröpfchen vor, die hervorgebracht wurden, indem man feuchte Luft über Phosphor blies. Die Messungen wurden aus der früheren Publikation von Karl Przibram übernommen, der sie anscheinend auf Ersuchen Ehrenhafts unter Verwendung einer ihm von Ehrenhaft vorgeschlagenen Methode angestellt hatte. Fig. 5 stellt die Resultate vor. An der Abszisse sind die beobachteten Ladungen aufgetragen, in Einheiten von 10^{-10} esE; auf der Ordinate die Zahl der Beobachtungen.

Die graphische Darstellung zeigt die ersten hundert Meßwerte als das Kurvenbild mit dem niedrigsten Profil. Dem hinzugefügt sind die nächsten hundert Meßwerte als das nächsthöhere Profil und so weiter. Die erstaunliche Fluktuation der täglichen Maximalwerte war, wie offen zugegeben wird, ein Rätsel, sie berührte aber nicht das Wesentliche: Es war eindeutig, daß die Gipfelpunkte nicht in ganzahligen Verhältnissen zueinander standen, noch sei ein Grund vorhanden, warum eine Fortführung dieses Prozesses nicht Ladungen ergeben sollte, die noch kleiner waren als die vorgefundenen. Die Behauptung im Titel des Aufsatzes wird also sicherlich durch die dargestellten Ergebnisse bestätigt¹³⁵.

Noch viele Jahre lang waren die Zuhörer, die herbeikamen, um von Ehrenhafts Werk zu hören und es zu diskutieren, eminent qualifiziert, völlig verwundert und außerstande, für die offensichtlichen Mängel eindeutige Abhilfen vorzuschlagen. In der Rückschau ist klar, daß sich zumindest eine methodologische Schwierigkeit in das Experiment eingeschlichen hatte, und es ist bedeutsam, daß die geeignete Abhilfe dafür nicht etwa im normalen Gang der Dinge auf einer öffentlichen wissenschaftlichen Tagung vorgeschlagen werden sollte. Ehrenhaft und seine Mitarbeiter scheinen nämlich alle ihre emsig zusammengetragenen Ablesungen benutzt zu haben, seien sie nun gut, schlecht oder mittelmäßig gewesen. Die Art von Unterscheidungsfähigkeit, die wir bei Millikans privater Analyse der Meßwerte am Werk gesehen haben, fehlte hier. Im Gegenteil, die Tendenz ging

in die entgegengesetzte Richtung. Das »Fenster« war geöffnet, und allen »Messungen« wurde Einlaß gewährt. Ehrenhafts Methode unterschied sich in nichts von dem, was Studenten bis heute noch tun, wenn sie ein altbewährtes Experiment wiederholen.

Fig. 6 (a) und (b) veranschaulichen dies durch die Darstellung der weitgestreuten Ergebnisse einiger neuerer Veröffentlichungen von Studentenversuchen über die Elektronenladung an Öltröpfchen.

Eine weitere – ironische – Möglichkeit, Ehrenhafte Ergebnisse zu erklären, liegt darin, daß die Versuchsausrüstung in Wien von viel größerer Feinheit war als notwendig. Millikans Ausrüstung und sein Verfahren waren zumindest in der entscheidenden frühen Phase anscheinend viel primitiver gewesen als Ehrenhafts. Millikans einfacher Apparat war auf eine eher hausgemachte Art zusammengestellt. Der Zerstäuber war ursprünglich ein Parfümsprüher aus einem Drogeriegeschäft, und das Tele-

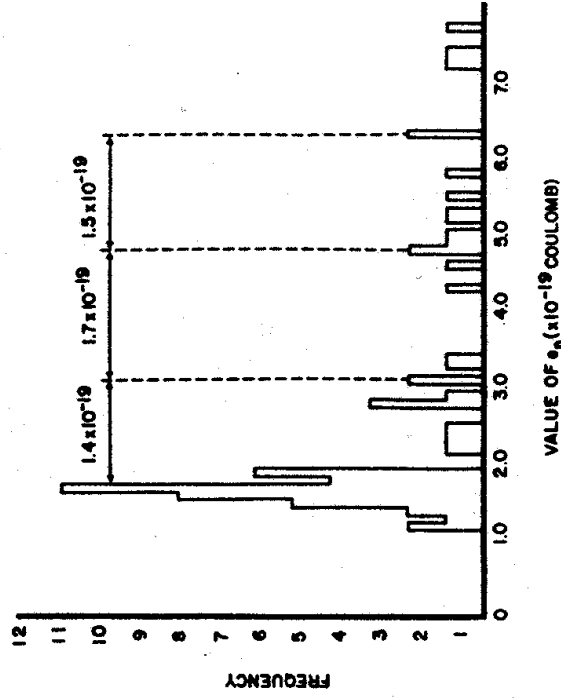


Fig. 6a. »Histogramm von 74 Tropfenladungen bestimmt von 7 Gruppen von je 2 Studenten. Nachzeichnung nach dem Original von R. Williams, Studierender der Western Michigan University, Herbst 1969«; aus Haym Kruglak, »Another look at the Pasco-Millikan Oil-Drop Apparatus«, *American Journal of Physics* 40 (1972), 769.

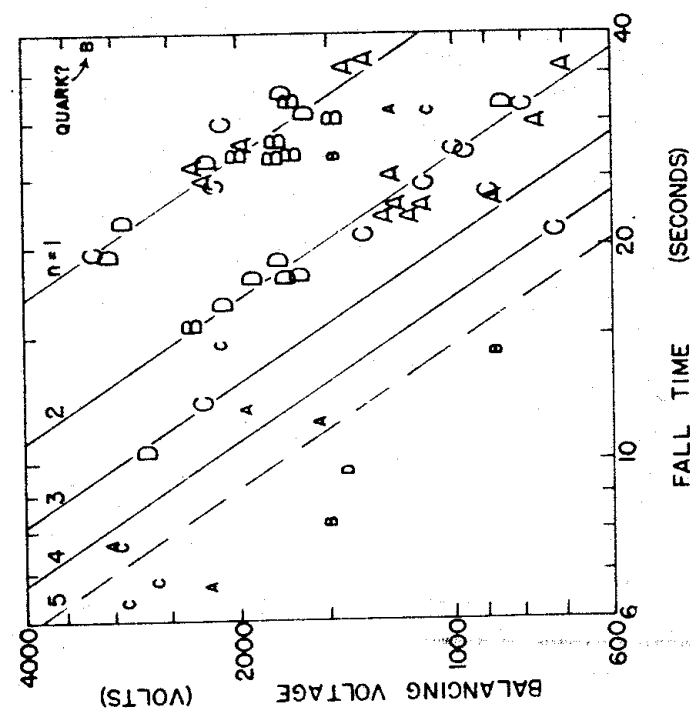


Fig 6 b. » Rohdaten der Schwebespannung in Volt und der Fallzeit, erzielt von Studenten des Jahrgangs 1971 (vier Laborguppen jeweils von annähernd 15 Studenten sind durch Großbuchstaben gekennzeichnet). Meßdaten von $n > 4$ wurden beiseite gelassen, wie auch einige augenfällige Schnitzer (bezeichnet durch Kapitälchen)«; aus Mark A. Heald, »Millikan Oil-Drop Experiment in the Introductory Laboratory«, *American Journal of Physics* 42 (1974), 244.

skop war ein kurzes einstellbares Röhrenokular, das zwei Fuß von dem 1,6-cm-Spalt des horizontalen Luftkondensators (Durchmesser 22 cm) entfernt aufgestellt war¹³⁶. Ehrenhafts Ausrüstung war viel raffinierter; sie umfaßte das Ultramikroskop (mit dem Siedentopf und Zsigmondy 1902 eine Sensation hervorgerufen hatten), das die Beobachtung von Objekten bis zu einer unteren Grenze von etwa der fünfhundertfachen Auflösung gewöhnlicher Mikroskope erlaubte. Ehrenhaft selbst hatte seine Anwendung für die Beobachtung der Brownschen Molekularbewegung vervollkommen. Das Kondensatorsystem war in allen Dimensionen um etwa eine Größenordnung kleiner als das

Millikans, und der Größenbereich der geladenen Objekte, die er verfolgen konnte, war weit größer. Es erlaubte also Messungen an viel kleineren Objekten, was zu Ehrenhafts Auffassung paßte, daß man, um nach den kleinsten Ladungen zu forschen, die kleinsten verfügbaren Objekte betrachten solle. Für die Befürchtungen, das Gesetz von Stokes könne in diesem Größenbereich versagen, hatte er zwei Antworten parat. Sofern eine Korrektur notwendig wäre, sollte sie aus empirischen Methoden hervorgehen, statt daß man sie, wie es seiner Auffassung nach Millikan tat, dadurch erhielt, daß man die Vorstellung des unteilbaren Elektrons in die Korrekturmethode mit einbaute. Auf jeden Fall würden Berichtigungen an dem Gesetz von Stokes dazu tendieren, die von Ehrenhaft gefundenen kleinen Ladungen noch kleiner zu machen.

Schien Millikan also die Welt der geladenen Teilchen durch ein merkwürdig primitives Gerät zu betrachten, so war das gerade eine seiner Stärken. Die besonderen Dimensionen des Apparats, den er anfänglich wählte, und die Spannung der verfügbaren Batterie waren

der springende Punkt, der mögliches Mißlingen zum Erfolg wendete. In der Tat war die Natur hier sehr freundlich. Sie beließ nur einen kleinen Spielraum von Feldstärken, innerhalb dessen Versuche wie diese überhaupt möglich waren. Sie erfordern, daß die Tröpfchen groß genug waren, damit die Brownsche Bewegung beinahe vernachlässigt werden konnte; daß sie rund und homogen waren, leicht und nicht zu verdunsten; daß der Abstand groß genug war, um die Zeitmessung genau zu gestalten; und daß das Feld stark genug war, die Schwerkraft mehr als aufzuheben durch seine Wirkung auf einen Tropfen, der nur ein oder zwei Elektronen trug. Kaum eine andere Kombination von Dimensionen, Feldstärken und Materialien hätte die hier erzielten Ergebnisse hervorbringen können¹³⁷.

Nicht jedem ist die Natur freundlich gesonnen. Vergleichsweise wenige Wissenschaftler verstehen sich darauf, das »Gerät der ersten Wahl« zu finden oder zu ergreifen, das zum Werkzeug für die Erschließung eines Forschungsgebiets wird. Galilei verfiel auf das Pendel und die rollende Kugel als Schlüssel zur Dynamik starrer Körper. Fermi benutzte das langsame Neutron, und Einstein das Gedankenexperiment eines im freien Fall befindlichen Experimentators, der die scheinbare Abwesenheit der Schwerkraft wahrnimmt. Ehrenhaft weigerte sich, irgend-

welche Ähnlichkeiten zwischen solchen Fällen und Millikans Versuchsgerät zu erkennen. Im Gegenteil schien ihm Millikans Forschung aus erkenntnistheoretischen Gründen untragbar; daß Millikans Messungen auf einen kleineren Massenbereich beschränkt waren, nämlich auf verhältnismäßig große Tropfen, statt vielmehr die Verwendung willkürlich großer und kleiner Tröpfchen zuzulassen, war ein dem Zweck der Sache sehr abträgliches Merkmal. Gültige Befunde sollten sich über einen großen Bereich ausweisen, und nicht nur innerhalb eines verhältnismäßig kleinen Schonbezirks.

16. Die Preisgabe des Elektrons

Ehrenhafts Abkehr von seinem ursprünglichen ausdrücklichen Glauben an das Elementarquantum der Elektrizität war so abrupt und leidenschaftlich, daß wir die Zeit, in der dies geschah, genau angeben können. Seine letzte Veröffentlichung in der Tradition der Suche nach dem Wert der Elektronenladung wurde von der *Physikalischen Zeitschrift* zur Publikation am 10. April 1909 entgegengenommen¹³⁸. Nur wenig mehr als ein Jahr darauf, am 21. April 1910, dem Datum der kurzen Mitteilung im *Anzeiger*¹³⁹, hatte er begonnen, seine Meinung zu ändern: »Ein derartiges, von der Theorie als existierend vorausgesetztes, nicht mehr unterteilbares Elektrizitätsquantum müßte sohin den bisher angenommenen Wert erheblich unterschreiten«. Bis zum 12. Mai 1910¹⁴⁰ war das Elektrizitätsatom auf unter 1×10^{-10} esE geschrumpft, und die Frage, »ob es überhaupt existieren kann«, wurde als ein Gegenstand künftiger Forschung vorge schlagen. Als die erste großangelegte Veröffentlichung im Mai 1910 erschien¹⁴¹, waren die Worte »elektrisches Elementarquantum«, die in den Titeln der Arbeiten von 1909 erschienen waren und in den Kurzmittellungen vom 21. April und 12. Mai 1910 in die Untertitel abgeglitten waren, nun schließlich ganz aus dem Titel verschwunden.

Obwohl Ehrenhaft durch einige Gesten eine Verbindung der neuen Forschungen mit denen von 1909 (die eine ähnliche Experimentalausrüstung verwendet hatten) andeutete, ist es eindeutig, daß er um die dritte Aprilwoche im Jahre 1910

zumindest sehr ernste Zweifel über das Elektron hatte, auf die 1909 noch nichts hindeutete. Etwa Mitte Mai 1910 war er sich ziemlich sicher über die Notwendigkeit einer Annahme von Subelektronen, deren Ladung im Prinzip wohl überhaupt keine untere Grenze haben würde. Er lenkte die Aufmerksamkeit auf die weite Streuung oder Variation unter den in der Literatur mitgeteilten Werten von e (von 1 bis 6×10^{-10} esE), die sowohl nach verschiedenen Methoden als auch von verschiedenen Beobachtern mit derselben Methode gewonnen worden waren. Wollte man einen Wissenschaftsstil vermeiden, der nur immer »Hypothesen und Korrekturen« aufeinanderhäuft, so sei man zu der Einsicht geführt, daß die offensichtliche Abweichungen der Ladung in der Natur gegründet seien¹⁴². Die Deutung der Experimente sei dementsprechend zu verändern. Einige Monate später¹⁴³ waren diese Ergebnisse für Ehrenhaft schon »über allen Zweifel hinaus sicher« geworden; man bräuchte eben nur betrachten, was die Natur selbst der Sinneswahrnehmung des beflissenen Forschers zugänglich gemacht habe, wie aus den Meßwerten (in Fig. 5) zu ersehen war.

Während Ehrenhaft seine Veröffentlichungen fortsetzte, machte sich zunehmend eine epistemologische Komponente seiner Forschung bemerkbar, nämlich die der Nutzbarmachung der Experimente für einen Angriff auf die Glaubwürdigkeit oder die theoretische Notwendigkeit des Atomismus selbst. In einer langen Studie aus dem Jahre 1914¹⁴⁴, die seine Forschungen zusammenfaßte und gegen ihre Kritiker verteidigte, benutzte Ehrenhaft noch einige seiner älteren Argumente. Er glaubte jetzt, daß Quanta der Elektrizität, falls sie existierten, höchstens eine Größenordnung von 10^{-11} esE haben könnten. Damit kehrte er Millikan gegenüber den Spieß um, denn nun bestand das erklärungsbedürftige Rätsel darin, warum in den Versuchen von Millikan und anderen immer wieder ein spezifischer Wert für e gefunden wurde. Ehrenhaft machte die Andeutung einer Theorie, die erklären könnte, warum seine kleinsten Teilchen die kleinsten Ladungen aufwiesen; dies war zu erwarten, erläuterte er, da die kleinsten Elektrizitätsmengen auf den Körpern mit der kleinsten Kapazität zu finden sein sollten.

Aber Ehrenhafts Aufmerksamkeit galt nicht hauptsächlich physikalischen Argumenten. Er bedauerte die Tatsache, daß, obwohl Ludwig Boltzmann einige Jahre vorher immer noch für

die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaft habe argumentieren müssen, in den gängigen Anschauungen jene Vorstellung jedoch gebilligt würde: »Mehr denn je haben sich in den letzten Jahren die atomistischen Theorien der Materie, der Elektrizität und der Strahlung in der Physik Bahn gebrochen«¹⁴⁵. Jedermann in der Physik war überzeugt von dem heuristischen Wert dieser Theorien, aber wenn solch eine Theorie mehr war als reine Spekulation, mußte sie fest auf Experimenten gegründet sein, die einer kritischen Prüfung standhalten konnten. Ehrenhaft stellte fest, daß seine Untersuchung eine solche Prüfung der Grundlagen eines Teils dieser Hypothesen (der Atomtheorie von der Elektrizität) vorlege und daß es sein Forschungsstil sei, »von den unmittelbaren Tatsachen« auszugehen.

Natürlich hat es nie eine direkte experimentelle Widerlegung der Behauptungen Ehrenhafts gegeben. Noch in der 1916 erschienenen Auflage seines Buchs *The Theory of Electrons* sah sich H. A. Lorentz noch zu der Bemerkung veranlaßt: »Die Frage kann nicht als völlig geklärt gelten«. In seiner Besprechung dieses Falles stellte R. Bär 1922 fest: »[...] die Versuche [Ehrenhafts] hinterließen doch zum mindesten ein unbezagliches Gefühl«¹⁴⁶. Wie die meisten Kontroversen dieser Art versank auch diese im Dunkel, ohne daß es je zu etwas so Dramatischem wie einer spezifischen, allgemein anerkannten Falsifikation gekommen wäre. Tatsächlich fuhr Ehrenhaft bis in die vierziger Jahre fort, über Subelektronen zu publizieren, selbst nachdem alle anderen schon das Interesse daran verloren hatten.

17. »Ein Kampf zweier Welten«

In seiner Nobelpreisrede hatte Millikan der Debatte, was seine Seite betraf, durch eine gewissenhafte Übersicht seiner Forschungen ein Ende gemacht. Ein Jahr nach ihrem Erscheinen im Jahre 1925 hielt Ehrenhaft seinerseits eine öffentliche Ansprache, in der er die Öffentlichkeit mit seiner Einsicht darüber bekannt machte, daß die Kontroverse praktisch zu Ende war. Wie es sich trifft, war diese Ansprache Teil einer feierlichen Veranstaltung, die an einem Samstag in einer Wiener Parkanlage

abgehalten wurde. Der Anlaß war die Enthüllung einer Büste Ernst Machs zu seinem Ehrengedächtnis am zehnten Jahrestag seines Todes. Moritz Schlick hielt eine Eulogie¹⁴⁷. Einen weiteren Beitrag bot Einstein, der ein Bewunderer Machs gewesen war und ihn während eines Wiener Besuchs 1911 eigens aufgesucht hatte, wahrscheinlich durch Vermittlung Ehrenhafts. Ehrenhaft eigene Ausführungen¹⁴⁸ waren kurz, aber vielsagend. Wohl zum ersten Male kamen hier, in ihren Hauptbestandteilen, die Motive seines langen Kampfes gegen das Elektrizitätsatom an das Licht der Öffentlichkeit.

Ehrenhaft sah Mach als einsamen Vorkämpfer der Wahrheit. Selbst die Büste Machs, welche die maßgeblichen Stellen nicht im Arkadenhof des Universitätsgebäudes haben wollten, stand »allein und isoliert« da. Ganz Machs eigener Gewohnheit der Selbstunterschätzung folgend, meinte Ehrenhaft: »Mach blieb in seiner Zeit unverstanden und hat nur so wenige Anhänger gehabt, und diese nicht in physikalischen Kreisen [...]«:

[...] Ich will bloß darauf hinweisen, daß der große Gegensatz zwischen Mach und den meisten Physikern dadurch bedingt ist, daß sich da zwei Ansichten gegenüberstehen, die sich beide durch die weitere Entwicklung der Physik immer mehr als grundlegend erweisen, immer weiter auseinandergehen und unüberbrückbar sind wie zwei Glaubensbekenntnisse. Mach als Vertreter der viel bescheideneren phänomenologischen Grundanschauungen, welche sich bloß mit der Beschreibung der Erscheinungen zufriedengibt und an anderen Möglichkeiten verzweifelt, und die anderen als Vertreter der Betrachtungen, die in den statistischen Methoden und in den spekulativen Erörterungen über die Konstitution der Materie sich in der Atomistik widerspiegeln und das wahre Wesen der Dinge ergründen zu können glauben.

Ehrenhafts Rede schloß dann mit einem wahrhaft Wagnerischen Crescendo:

Mach hatte den Mut, sich dem fast alle fortreißenden Strom der atomistischen Weltanschauung mit gewaltigen Argumenten entgegenzustellen – jener Atomistik, welche in den kleinsten angeblich nicht mehr teilbaren Konstituenten der Materie und neuerdings auch der Elektrizität den Zauberschlüssel zu besitzen glaubt, mit dem sich alle Pforten der naturwissenschaftlichen Erkenntnis schließlich öffnen sollen.

Die Welt geht eine merkwürdige Entwicklung. Einerseits stürmen kühne Forscher auf dem Gebiet der Atomistik weiter, unbeirrt durch solch gewaltige Denker, wie es Mach war, andererseits muß man