

700

600

500

400

Nutzungsbedingungen

300



Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Terms of use

200



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

100

100

200

300

400

500

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

info@digizeitschriften.de

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

Sechster Jahrgang.

19. Juli 1918.

Heft 29.

Submikroskopische Experimentalphysik.

(Bericht über die Ehrenhaften Arbeiten aus der Physik des Millionstel-Zentimeters¹⁾.)

Von Dr. D. Konstantinowsky, Wien.

I. Einleitung.

§ 1. *Atomistische Struktur der Materie.* — Jeder feste Körper läßt sich bis zu einer gewissen Kleinheit leicht in Stücke teilen; von da ab setzt er seiner weiteren Zerteilung einen immer größer werdenden Widerstand entgegen. Wie weit sich diese Zerbröckelung überhaupt führen läßt, hängt von der Geschicklichkeit des Menschen und vom Werkzeuge, das ihm zur Verfügung steht, ab. Die immer größer werdenden Schwierigkeiten bei der weitergehenden Zerkleinerung der Materie mögen es vielleicht gewesen sein, welche im Menschen die Vorstellung einer Grenze für diese Zerteilbarkeit geschaffen haben: das *Bild des aus kleinsten, nicht mehr teilbaren Stücken zusammengesetzten Körpers*, das Bild der materiellen Atomistik.

Die philosophische Vorstellung selbst ist sehr alt und geht auf den griechischen Denker *Demokrit* zurück; die erste nutzbare Verwertung erfuhr sie jedoch erst in ihrer Anwendung auf die Konstitution der Gase durch die Avogadro'sche Hypothese, welche auf Grund der Gasgesetze die Behauptung aufstellte, daß die gleichen Volumina aller (sogenannten idealen) Gase bei gleichem Druck und gleicher Temperatur aus gleichvielen solcher kleinsten Teilchen zusammengesetzt seien²⁾.

§ 2. *Die chemische Atomistik.* — Fügt die Chemie noch den Zusatz hinzu, daß die kleinsten Teilchen eines und desselben chemisch homogenen Stoffes gleich groß oder im Mittel gleich groß wären, so konnte man merkwürdige Zusammenhänge leicht und einfach erklären, die zwischen den Gewichten der an einer chemischen Verbindung teilnehmenden Stoffe aufgefunden worden waren.

Man stellte sich bekanntlich vor, daß eine chemische Verbindung zweier Körper *A* und *B* zu einem dritten *C* dadurch vor sich geht, daß sich ganz bestimmte Anzahlen ihrer kleinsten Teilchen zu neuen Bausteinen der Materie aneinanderlagern, z. B. daß sich je ein kleinstes Teilchen *A* mit einem kleinsten Teilchen *B* bindet

und diese Verbindung der Bausteine ist, aus welchem der Körper *C* zusammengefügt ist, oder aber, daß sich z. B. an je ein Teilchen *A* zwei oder in einem anderen Falle drei Teilchen *B* anlagern und so einen Stoff *C_I*, *C_{II}* bilden. An den verschiedenen chemischen Verbindungen müßten nach dieser Anschauung ebensoviele (doppelt oder dreimal so viele) kleinste Teilchen des Stoffes *B* als des Stoffes *A* mitwirkend gewesen sein. Die Gewichtsmengen irgendeines Stoffes, welche mit einer gleichen Menge eines anderen Stoffes mehrere verschiedene chemische Verbindungen eingehen, müßten sich wie im angeführten Beispiele die Anzahlen der an der Bildung eines Einzelbausteines *C_I*, *C_{II}* oder *C_{III}* beteiligten Bausteine des Stoffes *B*, d. h. wie einfache ganze Zahlen verhalten. Ein solches Gesetz — das *Gesetz der multiplen Proportionen* — konnte nun tatsächlich in jahrzehntelanger Erfahrung bestätigt werden; es bildet eine der sichersten Stützen der auseinandergesetzten Anschauung vom Aufbau der Materie, der Atomistik.

Die konsequente Fortführung dieses Bildes auf den Vergleich der Verbindungsgewichte verschiedener Körper untereinander führte zu den für die verschiedenen Stoffe charakteristischen *Äquivalentgewichten* und in Anwendung auf die chemisch nicht mehr zerlegbaren Stoffe auf die *Atom- und Molekulargewichte* sowie auf die klassische Lehre von den chemischen *Valenzen*. In komprimierter Form bedient sich der Chemiker in seinen Formeln und Reaktionsgleichungen durch Jahrzehnte täglich dieser Erfahrungstatsache, ohne daß sie ihn je im Stiche gelassen hätte, so daß er niemals Grund hatte, von der ihr zugrundegelegten Anschauung über die Konstitution der Materie abzugehen.

§ 3. *Kinëtische Gastheorie.* — Die Vorstellung von der Existenz kleinster Materieteilchen, die Atomistik der Materie, besitzt weitere Stützen in den einfachen Bildern über die (uns unbekannt) Bewegungszustände der Bausteine, als deren Gesamtwirkung (uns bekannte) beobachtbare Vorgänge (Druck-, Temperatur- und Volumsänderung der Gase, die Reibung, Wärmeleitung, Diffusion derselben, die Löslichkeit, Verdampfung von Körpern usw.) dargestellt werden. Vermag doch ein Großteil der Vorstellungen namentlich jene über die Gase die Zustände der Körper nicht nur qualitativ, sondern auch zahlenmäßig mit dem Experimente in Übereinstimmung wiederzugeben. Die Durchrechnung führte zum Teil zu neuen, in der Physik und vielleicht in den gesamten zahlenmäßig beschreibenden Naturwissenschaften bis dahin unbekanntem Größenordnungsbegriffen, so

¹⁾ Literaturangaben (kapitelweise geordnet) am Schlusse des Berichtes.

²⁾ Die Zahl der in einem cm³ enthaltenen Teilchen wird nach dem Physiker *Loschmidt*, der den ersten Weg zu ihrer Bestimmung wies, *Loschmidtsche Zahl* genannt.

daß es verständlich wird, warum wir gezwungen sind, die Durchschnittseigenschaften der Einzelmoleküle solchen Bildern zu entlehnen. Erscheint doch nach dem heutigen Stande der Mikroskopiertechnik der Gedanke ganz aussichtslos, daß es uns gelingen sollte, diese Materieteilchen von der Größenordnung 10^{-8} cm, die wir etwa noch 10 000 mal kleiner als die roten Blutkörperchen zu erwarten hätten, jemals einzeln und direkt wahrzunehmen. Die Größenordnung der in einem cm^3 herumschwirrenden Anzahl von Bausteinen ist den bis dahin in den Naturwissenschaften vorkommenden Zahlbegriffen derart entzückt, daß es schwer fällt, Vergleiche mit geläufigen Zahlenvorstellungen zu ziehen. Die Gesamtzahl der Menschen, die unsere Erde schätzungsweise bewohnen, ist verschwindend klein dagegen; selbst die Gesamtzahl aller Menschen, die seit den ältesten historischen Zeiten unsere Erde bevölkerten, kann davon noch keinen annähernden Begriff abgeben. Erst wenn wir uns vorstellen, daß jeder der Erdenbewohner seit den ältesten Überlieferungen der Stammvater einer neuen Erde geworden wäre, die das gleiche Werden und Vergehen der Menschheit wie unsere Erde hinter sich hätte, so wird durch die Zahl der — lebenden und gestorbenen — Bewohner all dieser Erden ein mit der Molekülzahl in einem cm^3 eines Gases, der Loschmidtschen Zahl, vergleichbarer Begriff ausgedrückt. Um mit den experimentellen Tatsachen in Einklang zu kommen, müssen wir bekanntlich schließen, daß sich jedes dieser Moleküle bei Zimmertemperatur mit einer in der Mechanik der irdischen Körper selten großen Geschwindigkeit, z. B. ein Sauerstoffmolekül im Mittel mit der eines Infanteriegewehrsgeschosses beim Verlassen des Laufes fortbewegt. Daß das „abgefeuerte“ Molekül in dem Haufen von zahllosen Brüdern trotz seiner Geschwindigkeit nicht weit kommt, entnimmt man daraus, daß es der Rechnung nach in der Sekunde durchschnittlich $4 \cdot 10^9$ Zusammenstöße mitmacht. Auch davon ist es schwer, sich eine Vorstellung zu bilden: man müßte etwa jedem der — bereits gestorbenen oder noch lebenden — Siedler unserer Erde mit einem Maschinengewehr und Molekülmunition aus einer anderen Richtung auf unser Molekül schießend denken, damit ein ähnliches Bombardement von Zusammenstößen hervorgerufen wird. Auf solche Zahlen konnten wir nicht im direkten Experimente, in der messenden Verfolgung des Einzeltteilchens stoßen; wir sind vielmehr gezwungen, die Durchschnittseigenschaften der Moleküle in den erwähnten Bildern einer Extrapolation zu entlehnen, welche im physikalischen Verhalten beobachtbar großer Körper die Gesamtwirkung der angeführten enorm großen Zahl von viel kleineren, bloß vorstellbaren Molekülen sieht. Immerhin werden unsere Schlüsse durch das Experiment um so fester gestützt werden, je weniger das tatsächlich durchführbare Experiment der zu erforschenden molekularen Größenordnung entzückt

wird, d. h. je kleiner der Körper ist, an dem wir unsere Messungen vornehmen. Von diesem Standpunkte aus dürfen Versuche ein besonderes Interesse beanspruchen, welche das physikalische Verhalten einzelner, möglichst kleiner, aber doch noch beobachtbarer Körperchen zu enthüllen vermögen, da sich an ihnen aller Voraussicht nach die ersten Ansätze der typischen Eigenschaften der uns nicht direkt zugänglichen Molekülgröße ausprägen müßten.

Noch interessanter und aussichtsreicher verspricht im Hinblick auf die gegenwärtig geltenden Bilder die Untersuchung der elektrischen Eigenschaften kleiner Körper zu sein.

§ 4. Die Atomistik der Elektrizität. — Die Erfolge der Atomistik der Materie sind an den experimentell beobachtbaren Eigenschaften, den Zuständen der Materie und ihrer bildlichen Darstellung durch die Theorien nicht spurlos vorübergegangen und es wurde bekanntlich des öfteren versucht, den Gedanken der Atomistik auch auf den Magnetismus (*Ampère, P. Weiß, A. Einstein*), die Elektrizität (*G. J. Stoney, Helmholtz, A. H. Lorentz*) und die strahlende Energie (*M. Planck*) zu übertragen. Man glaubte den vorhandenen experimentellen Ergebnissen aus der Beobachtung relativ großer Körper am besten gerecht zu werden, indem man die Elektrizität nicht mehr als eine Zustandsform der Materie auffaßte, also ihre Existenz insbesondere nicht an das Vorhandensein von materiellen Atomen knüpfte, sondern auf alte Vorstellungen zurückgriff und in der negativen Elektrizität einen Stoff von besonders geringer Dichte sah, der nun freilich — und darin besteht der Gegensatz zu älteren Auffassungen — von atomistischer Struktur sein sollte.

Berührt man beispielsweise mit einer isolierten Metallkugel von der Größe eines Billardballes zuerst den positiven und dann den negativen Pol einer Gleichstromlichtleitung, so müßte nach diesen Vorstellungen die kleine Kugel im Augenblicke der Berührung mit dem negativen Pole eine Zahl von Elektronen — so wurden die Atome der Elektrizität benannt — aufgesaugt haben, die etwa wieder mit der der Bewohner unserer Erde in Vergleich gebracht werden könnte. Hätten wir umgekehrt zuerst den negativen und nachher den positiven Pol berührt, so wären ebensoviele Elektronen von der Kugel zur Klemme geströmt und die Kugel wäre dann „positiv geladen“ gewesen. Der positive Ladungszustand soll also gewissermaßen der Zustand eines Mangels an Elektronen sein.

Wenn nun die Kugel bei der Berührung mit dem positiven Pole Elektronen abgeben sollte, so mußten sie auf ihr gewissermaßen bereitgestellt gewesen sein. In der Tat nimmt man an, daß die chemischen Atome, die man bis dahin als die kleinsten Teilehen angesehen hatte, noch weiter teilbar sein sollten; solche Bruchstücke wären die Elektronen, so daß die Materie letzten Endes aus Elektrizität zusammengesetzt sein soll.

Die Ladungen der Körper erklärte man sich, indem man annahm, daß eine gewisse Anzahl dieser „negativ“ geladenen Elektrizitätsatome zum Aufbau, zum Bestand der materiellen Atome eines Körpers gehörten. Vereinigen diese mehr als die ihnen zugehörige Anzahl in sich, dann sprechen wir dem Körper eine negative Ladung zu. Als Bild eines positiv geladenen Körpers hätte man entsprechend Atome oder Atomhaufen zu denken, welchen eines oder mehrere der zu ihrem Bestande gehörigen Elektronen fehlen.

Die Masse eines Elektrizitätsatoms wurde 1800-mal kleiner als die der kleinsten materiellen Atome, der Wasserstoffatome, geschätzt und folglich 10^{10} mal kleiner als der Materiebruchteil, den die feinsten analytischen Wagen noch nachzuweisen gestatten. Unsere empfindlichsten Quadrantenelektrometer sind kaum imstande, das Vorhandensein einer Ladung anzuzeigen, geschweige denn zu messen, wie sie einige Hundert solcher Elektronen tragen.

Auch hier mußten daher zunächst, wie in der Atomistik der Materie, die Eigenschaften der Elektrizitätsatome den bildlichen Beschreibungen von Versuchen entlehnt werden, in denen zugleich mit relativ großen Materiemassen eine ungeheuer große Anzahl von Elektronen in Tätigkeit trat; die Eigenschaften des Einzelatoms konnte man dann unter der Annahme der Gleichheit der Elektronen untereinander aus diesen Bildern herauslesen. Wir werden auf ihre Beweiskraft noch im späteren (§ 21) zu sprechen kommen.

II. Die Welt des Millionstel-Zentimeters.

§ 5. Der Ehrenhafte Leitgedanke. — Ein wichtiges Ziel der Experimentalphysik mußte es auch hier wieder sein, die Beobachtungsobjekte, an denen elektrische Ladungen konstatiert werden, so klein zu wählen und die Meßmethoden so zu verfeinern, als sie die zur Beobachtung zur Verfügung stehenden Instrumente nur zulassen. um aus den elektrischen Eigenschaften solcher kleiner Einzelkörperchen mit um so größerer Sicherheit auf diejenigen der elektrischen Atome der Bilder schließen zu können.

Das Verdienst, dieses Ziel richtig erkannt und mit entschlossener Energie angestrebt zu haben, gebührt dem Wiener Physiker F. Ehrenhaft. Schon seine 1909 veröffentlichte Arbeit¹⁾ über die Konstitution der Elektrizität war von den Grundsätzen geleitet²⁾:

„1. Kleinste Elektrizitätsmengen sind aller Voraussicht nach auf Körperchen kleinster Kapazität zu erwarten“

und „2. Diese Körperchen müssen aber immerhin noch so groß sein, daß man sie optisch einzeln gerade noch wahrnehmen kann, da man sie einzeln der Messung unterziehen muß.“

§ 6. Die Ehrenhaften Probekörper; Dar-

¹⁾ Wien. Akad. Anz. Nr. 7. 4. März 1909.

²⁾ Vgl. F. Ehrenhaft. Wien. Berichte, 1914.

stellung und Sichtbarmachung. — Es sei gleich vorweggenommen, daß die kleinsten, im Mikroskope bei geeigneter Anordnung noch einzeln wahrnehmbaren und gut beobachtbaren Materieteilchen von der Größenordnung eines Millionstel-Zentimeters Halbmesser sind. Um von dieser Kleinheit einen Begriff zu geben, sei erwähnt, daß sie rund 100 mal kleiner als die roten Blutkörperchen oder 80 mal kleiner als die Chlorophyllteilchen und nur mehr 50 bis 500 mal so groß sind als die Materieteilchen, aus denen wir die Stoffe unserer Umwelt aufgebaut zu denken haben¹⁾.

Die zu erforschenden physikalischen Verhältnisse waren aller Voraussicht nach umso deutlicher zu übersehen und die auszuführenden Berechnungen umso richtiger anzupassen, je einfacher die Gestalt der zu beobachtenden Einzelteilchen sein würde. Ehrenhaft war daher bemüht, an Körperchen zu experimentieren, die exakte Kugelform



Fig. 1. Silberkugeln.
1 pars des Maßstabes = $1 \cdot 10^{-8}$ cm.

haben und die andererseits von möglicher chemischer Definiertheit und Stabilität sind. Dadurch war er auf kleinste Partikel von Gold, Platin, Silber oder Quecksilber verwiesen.

Soweit sich derartig kleine Körperchen durch die bestauflösenden Objektivsysteme überhaupt noch formgetreu abbilden lassen, konnte er ihre Kugelgestalt durch Photographien erweisen, von welchen zwei in Fig. 1 (Silberkugeln) und in Fig. 2 (Quecksilberkugeln)²⁾ wiedergegeben

¹⁾ Die kleinsten Teilchen, von denen hier die Rede sein wird, haben also einen Halbmesser von der Größenordnung eines Millionstel-Zentimeters; wenn daher im folgenden kurz vom „Millionstel-Zentimeter“ gesprochen wird, so sind auch in der Nähe gelegene (bis zu höchstens 50 mal größere) mitverstanden.

²⁾ Dieses Bild ist ganz besonders interessant. Die die Mitte durchquerende freie Gasse wurde erhalten, indem man mit einem Frauenhaar über den zur photographischen Aufnahme auf einer Glasplatte hergerich-

sind; zur beiläufigen Orientierung sei erwähnt, daß — wie sich aus der beigegebenen Vergleichsteilung entnehmen läßt — die größten der Silberkügelchen einen Halbmesser von $1,5 \cdot 10^{-5}$ cm haben.

Aber auch vom Standpunkte der Sichtbarmachung schienen ihm „Edelmetallteilchen, insbesondere auch Quecksilber, gewiß die richtigen Objekte, die Frage zu lösen, weil das außerordentlich starke metallische Reflexionsvermögen diese sehr kleinen Metallpartikelchen wegen des optischen Kontrastes in einer Größenordnung noch sichtbar zu machen gestattet, in der andere Substanzen, z. B. Öl, Glycerin oder gar Wasser und andere Kondensationsprodukte optisch überhaupt nicht wahrnehmbar sind“.

Zur Herstellung der Teilchen benützt Ehrenhaft vornehmlich zwei Methoden. Die eine besteht darin, daß er zwischen zwei Stäben des zu zerreißen Metalles einen elektrischen Lichtbogen erzeugt, der von den Metallstäben kleine

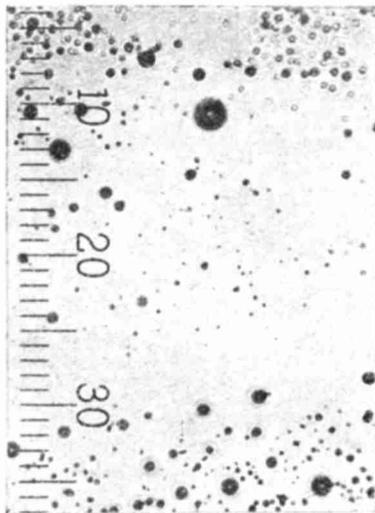


Fig. 2. Quecksilberkügelchen.
1 pars des Maßstabes = $19,4 \cdot 10^{-5}$ cm.

Tröpfchen abschmilzt, zerstäubt, verdampft, die in der kälteren Umgebung zu Kügelchen der gewünschten Größe erstarren. Nach der anderen Methode werden leichter verflüchtbare Körper (Quecksilber, Schwefel, Selen usw.) in ein Siedrohr gebracht; die beim Erhitzen entstehenden Dämpfe kondensieren gleichfalls zu größeren oder kleineren derartigen Kügelchen¹⁾. Infolge ihrer

teten Niederschlag strich; die kleineren Kügelchen konnten dadurch offenbar zum Zusammenfließen zu größeren gebracht werden, die am Rande der Gasse zu sehen sind. Diese charakteristische Eigenschaft bleibt dem Quecksilber also noch bis in diese kleine Größenordnung gewahrt.

¹⁾ Auf die interessanten Details der Versuchsanordnung und der Reinigung der Gase für die Umgebung der Kügelchen kann hier begreiflicherweise nicht eingegangen werden.

außerordentlichen Kleinheit fallen die Partikelchen äußerst langsam herab; sie sind gewissermaßen im umgebenden Gase eingebettet und können mit ihm abgesaugt und transportiert werden. Die optische Anordnung zu ihrer Beobachtung ist im Grunde die gleiche wie diejenige der Astronomen, welche die von der Sonne kommenden und an den Sternen zerstreuten Lichtstrahlen im Refraktor sammelt. Die Partikelchen werden durch eine Bogenlampe von der Seite intensiv beleuchtet und durch ein Mikroskop²⁾ senkrecht zur Richtung der beleuchtenden Strahlen beobachtet. Die sich darbietende Erscheinung ist die eines dunklen Himmels, auf welchem sich die Bilder der einzelnen Kügelchen als verschieden hell glänzende Sterne abheben.

Die Zerteilmaschine, die Kügelchen von der Größe des Millionstel-Zentimeters liefert, wurde im elektrischen Lichtbogen oder im Siedgefäße gefunden; als Pinzette, mit der sie angefaßt und vor das Beobachtungsinstrument gebracht werden können, läßt sich der Gasstrom verwenden, in dem sie eingebettet sind, als Lupe, durch welche sie sichtbar gemacht werden, das Mikroskop mit seitlicher Beleuchtungsanordnung. Welcher Art ist nun das Instrument, mit dessen Hilfe die Messung der an das Kügelchen angreifenden Kräfte gelingen wird? Denn kennt man einmal die Mechanik des Kügelchens, so kann es nicht schwer sein, mit ihrer Hilfe aus den Beobachtungen wichtige Grundlagen der Physik dieser Größenordnung herauszulesen.

III. Die Mechanik der Größenordnung des Millionstel-Zentimeters; das Ehrenhafte Meßinstrument.

§ 7. Dynamische Kräftemessung an Millionstel-Zentimeter Materie. — Ganz ebenso wie in der Mechanik der großen (makroskopischen) Körper konnte Ehrenhaft 2 Arten der Kräftemessung, die dynamische und die statische, für die Mechanik des Millionstel-Zentimeters entwickeln.

Wir wollen uns zunächst mit der auf der Messung eines Bewegungszustandes beruhenden dynamischen Kräftemessung befassen. Wenn eine makroskopisch große Kugel in einem luftgefüllten Raume herabfällt, so steigert sich ihre Geschwindigkeit unter dem Einflusse der Schwere nicht unbegrenzt, da die beim Durchschneiden der Luft hemmenden Reibungskräfte umso größer werden, in je rascherer Fallbewegung sie gerät. Nach einiger Zeit wird die Geschwindigkeit der Kugel so groß geworden sein, daß die nach abwärts ziehende Schwere und die der Bewegung entgegenwirkende Reibung einander das Gleichgewicht halten; die Kugel fällt alsdann mit konstanter Geschwindigkeit. Je kleiner die Kugel ist, desto rascher stellt sich unter sonst gleichen Umständen der Zustand

²⁾ Selbstverständlich genügen zur bloßen Sichtbarmachung viel schwächere Objektive als die zur formgetreuen Wiedergabe bei den Bildern 1 und 2 verwendeten.

der gleichförmigen Endgeschwindigkeit ein. Die Kügelchen, welche *Ehrenhaft* untersucht, sind nun bereits von einer derartigen Kleinheit, daß sie sich unter dem Einflusse irgendwelcher Kräfte in unmeßbar kurzer Zeit, d. h. praktisch genommen sofort mit gleichförmiger Geschwindigkeit in der Richtung der Kräfte bewegen.

Die theoretische Berechnung zeigt, daß die von ein und demselben Partikelchen unter gleichen Verhältnissen erreichte Geschwindigkeit v der angreifenden Kraft K proportional ist

$$v = B \cdot K.$$

Die Proportionalitätskonstante B , welche die Abhängigkeit der Reibung vom Halbmesser des Kügelchens, vom Reibungskoeffizienten und vom Drucke des Gases in sich birgt¹⁾, ist der Definitionsgleichung nach umso größer, in je größere Geschwindigkeit das Teilchen unter dem Einflusse der gleichen Kraft K gerät, je leichter es vom Platze gedrängt werden kann; sie wird die „Beweglichkeit“ des Kügelchens genannt. Die Richtigkeit der theoretischen Formel konnte an relativ größeren Kugeln und bei geringen Gasdrücken experimentell erwiesen werden; wir werden im folgenden Gelegenheit haben, zwei der Wege kennen zu lernen, auf welchen *Ehrenhaft* ihre Gültigkeit noch speziell für die von ihm untersuchte Größenordnung verifizieren konnte.

Für den Augenblick wollen wir annehmen, daß der Radius eines herausgegriffenen Probekörperchens schon bekannt sei. Dann läßt sich die Größe einer angreifenden Kraft, wie erwähnt, aus dem (bekannten) Reibungskoeffizienten des Gases und dem an einem Barometer ablesbaren Drucke angeben, wenn die gleichförmige Bewegungsgeschwindigkeit des Teilchens unter dem Einflusse der Kraft gemessen werden kann.

Die Festlegung von Kräften nach der dynamischen Methode ist daher sehr einfach, denn sie läuft auf die Bestimmung der Zeit hinaus, welche der Probekörper zum Durchlaufen einer gemessenen Strecke benötigt.

§ 8. *Die statische Kräftemessung an Millionstel-Zentimeter Materie.* — Wo die zu messende Kraft derart abgestuft werden kann, daß sie mit einer bekannten, auf den Probekörper angreifenden entgegengesetzt gerichteten Kraft, z. B. der Schwerkraft, ins Gleichgewicht gebracht werden

¹⁾ Die näherungsweise von *E. Cunningham* aufgestellte Formel lautet:

$$B = \frac{1.63 \frac{l}{a}}{1 + \frac{2-f}{6\pi\mu a}}$$

Hierin bedeutet μ den Reibungskoeffizienten des Gases, a den Radius des Kügelchens, v die Geschwindigkeit des Kügelchens, l die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle (dem Gasdrucke invers proportional), f einen Zahlenfaktor zwischen 0 und 1 (Verhältnis der elastischen Zusammenstöße der Gasmoleküle mit dem Kügelchen zur Gesamtzahl der Zusammenstöße).

kann, wird mit Vorteil die zweite der Ehrenhaften Methoden, die *statische* Kräftemessung angewendet.

Das spezifische Gewicht s eines solchen Kügelchens ist dasjenige des Edelmetalles, aus dem es im Lichtbogen entstanden ist. Die Größe der Vergleichskraft, das Gewicht $mg = 4/3 a^3 \pi s g$, ließe sich also berechnen und die statische Kräftemessung ausführen, wenn wir auch hier wieder den Radius a des Probekörperchens als gegeben voraussetzen.

§ 9. *Das Ehrenhafte Meßinstrument.* — Das Meßinstrument, das die Ermittlung der Kräfte nach jeder der beiden Methoden zuläßt, ist in Fig. 3 schematisch gezeichnet. P_1 und P_2 sind 2 kreisrunde Messingplatten, welche einen sehr kleinen Gasraum G nach oben und unten luftdicht abschließen. Durch Öffnen von Zuführungshähnen kann das die Kügelchen eines bestimmten Materiales tragende Gas in den Raum G geleitet werden, der sodann durch Schließen der Hähne wieder luftdicht abgeschlossen wird.

An einem in das Okular des Beobachtungsmikroskopes eingelegten Raster kann der Weg abgelesen werden, den ein herausgegriffenes Teilchen durchwandert oder es kann die Zeit abgestoppt und die Geschwindigkeit errechnet werden,

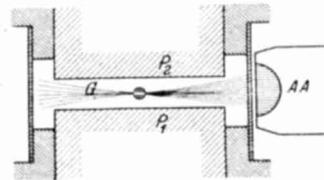


Fig. 3. *Plattenkondensator.*

AA ist das Beleuchtungsobjektiv; der schwarze Kreis in der Mitte stellt das Gesichtsfeld des Beobachtungsmikroskopes dar.

in der es unter dem Einflusse der zu messenden Kraft über die Strecke von einem Rasterstrich zum anderen geführt wurde. Kann man die zu ermittelnde Kraft meßbar abstufen und gelingt es, sie senkrecht nach aufwärts wirken zu lassen, so läßt sich das Gleichgewicht zwischen ihr und der entgegengesetzt gerichteten Schwere daran erkennen, daß der Probekörper weder von der einen noch von der entgegengesetzten Kraft fortgezogen wird, und sein Bild folglich an der gleichen Stelle des Rasters stehen bleibt. Das im Mikroskope beobachtete Kügelchen selbst ist daher das geeignete Meßinstrument für jede der beiden Kräftemessungen; allerdings muß — denn die Kenntnis des Kugelradius war ja für jede der Methoden vorausgesetzt — das Meßinstrument vor jeder Vornahme einer Messung durch eine Ermittlung des Teilchenhalbmessers „geeicht“ werden.

§ 10. *Zur Dynamik des Kügelchens.* — Bevor zur Eichung des Meßinstrumentes übergegangen wird, soll noch eines einfachen Versuches Erwähnung getan werden, an dem sich zwei — von uns bereits benützte — Folgerungen über die Dyna-

mik unseres Probekörpers beweisen lassen. Zwischen den zwei (in Fig. 3 ersichtlichen) Platten kann *Ehrenhaft* ein elektrisches Feld passender Größe hervorrufen, verschwinden lassen oder umkehren. Ist kein elektrisches Feld vorhanden, so mißt man eine Fallgeschwindigkeit v_f des Kügelchens, die mit der treibenden Kraft G (dem unbekanntem Gewichte) in dem uns bekannten Zusammenhang

$$G = \frac{v_f}{B}$$

steht, wobei B die uns bereits bekannte, dem Probekörper eigentümliche Konstante, die Beweglichkeit, sein müßte, wenn das theoretische Reibungsgesetz richtig sein soll. Passend große elektrische Kräfte (gleichfalls unbekannter Größe) E , werden unser — diesmal elektrisch geladen vorausgesetztes — Probekügelchen mit der gleichfalls meßbaren Geschwindigkeit v_e' der Schwere entgegen nach oben führen

$$E - G = \frac{v_e'}{B}$$

Wird die Richtung des Feldes umgekehrt, so verhalten die elektrischen Kräfte nunmehr im Vereine mit dem Gewichte dem Partikelchen zu einer Geschwindigkeit v_e''

$$E + G = \frac{v_e''}{B}$$

Die aus den 3 Gleichungen leicht herauslesbare Beziehung

$$\frac{v_e'' - v_e'}{2} = v_f$$

bleibt, soweit sich die Genauigkeit des Versuches überhaupt treiben läßt, für jedes Kügelchen und bei jedem einzelnen Kügelchen für alle anwendbaren elektrischen Kräfte immer erfüllt. Für die Dynamik des Probekörpers ist damit erwiesen:

1. Die Bewegung des Probekörpers erfolgt immer in die Richtung der bewegendes Kraft.
2. Die Beweglichkeit ist eine dem Probekörper eigentümliche Konstante oder die erreichte Geschwindigkeit ist der treibenden Kraft proportional.

§ 11. *Submikroskopische Größenbestimmung: Eichung des Meßinstrumentes.* — Die dem Kügelchen charakteristische Beweglichkeit B sowie sein Gewicht $4/3 a^3 \pi s g$ ließen sich, wie erwähnt, berechnen, wenn sein Radius a bekannt wäre. Die Gleichung der Fallbewegung

$$4/3 a^3 \pi s g = \frac{v_f}{B} \quad 1)$$

enthält daher als einzige nicht beobachtbare Größe den Halbmesser a , da die Fallgeschwindigkeit v_f durch Abstoppen von Fallzeiten festgestellt werden kann. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die

1) Mit Benutzung der in der Bemerkung auf Seite 433 gegebenen Formel

$$\frac{2 s g}{9 \mu v_f} = \frac{1}{a^2 \left(1 + 1,63 \frac{l}{a} \cdot \frac{1}{2-f} \right)}$$

Größe des Kügelchens durch die Beobachtung seiner Fallgeschwindigkeit, und zwar auf einem rein mechanistischen Wege festzulegen.

So läßt sich in Fig. 4 an der voll ausgezogenen Kurve¹⁾ beispielsweise für jede gemessene Fallgeschwindigkeit eines Silberkügelchens dessen Radius ablesen.

Die Kräfte, die nunmehr der Messung zugeführt werden können, sind von einer kaum vorstellbaren Kleinheit; man braucht ja bloß zu bedenken, daß das Gewicht der kleinsten Probekörperchen — Größenordnung 10^{-12} Dyne — einer Kraft entspricht, mit der zwei Gefäße mit je einem Liter Wasser Inhalt einander aus einer Entfernung von 4 km anziehen. Wo immer also Kräfte beobachtet werden können, welche das Kügelchen in eine, seiner Fallgeschwindigkeit vergleichbare Bewegung versetzen, werden derartig minimale Wirkungen im Spiele gewesen sein. Das in Gase suspendierte Kügelchen bekannter Größe stellt das geeignete und geeichte Meßinstrument zur Festlegung dieser Kräfte dar.

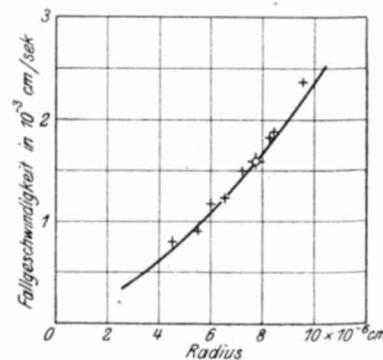


Fig. 4. Radius-Fallgeschwindigkeits-Zusammenhang für Silberkügelchen.

§ 12. *Charakteristik der Mechanik der untersuchten Größenordnung.* — Sowohl unsere Beobachtungen der Mechanik in der makroskopischen Welt als auch die in der submikroskopischen werden gewöhnlich in gaserfüllten Räumen angestellt. Die Reibungswiderstände, die durch die Bewegung der makroskopischen Körper durch die Luft auftreten, sind in den allermeisten Fällen so klein, daß sie für die erste Näherung vernachlässigt werden können, d. h. die Bewegungssätze bleiben für die meisten Bewegungen dieselben wie für die Fortführung der Körper durch den luftleeren Raum. Ganz anders sind die Verhältnisse in der Mikrowelt der Ehrenhaftschen Probekörper, weil mit abnehmendem Radius das Verhältnis von Oberfläche zu Masse und das Verhältnis von Reibung zu Antriebskraft gewaltig zugenommen hat.

Bei Beschränkung auf die reinen Beobachtungsstatsachen, ohne auf ihre Deutung einzugehen, hätte *Newton* an Millionstel-Zentimeter

1) Über die Bedeutung der Kreuzchen wird später die Rede sein.