

## Werk

**Titel:** Submikroskopische Experimentalphysik

**Untertitel:** Bericht über die Ehrenhaften Arbeiten aus der Physik des Millionstel Zentimete...

**Autor:** Konstantiowsky , D.

**Ort:** Berlin

**Jahr:** 1918

**PURL:** [https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X\\_0006](https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0006) | LOG\_0291

## Kontakt/Contact

[Digizeitschriften e.V.](#)  
SUB Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen

✉ [info@digizeitschriften.de](mailto:info@digizeitschriften.de)

Eins, so erhält man die oben als *R*-Werte bezeichneten Maßstäbe für den topotropen Effekt.

### 6. Schluß.

*Groth* hat aus den morphotropen und topotropen Wirkungen einer Substitution zuweilen Schlüsse auf die Anordnung der Atome in dem eingeführten Radikal und auf dessen Orientierung in der übrigen Molekel und im Kristall gezogen. Da z. B. beim Eintritt von vier Methylgruppen in das reguläre Jodammonium (s. oben) eine der vierzähligen Drehungsachsen eine stärkere Vergrößerung ihres topischen Parameters, also eine stärkere Dehnung erfährt als die beiden andern vierzähligen Achsen, so würden wohl nach *Groth* die Atome der Methylgruppen jedenfalls nicht in Basisbenen des tetragonalen Tetramethyljodids liegen, weil sonst eine Querdehnung statt der Längsdilatation zu erwarten wäre. Ähnlich hat *Groth* aus der morphotropen Beziehung der Benzoësäure zur *p*-Nitrobenzoësäure (s. oben) im Gegensatz zur *m*- und *o*-Nitrobenzoësäure auf die chemisch bereits konstatierte Para-Stellung jener Nitro-Säure geschlossen, denn ihre Kristalle zeigen bei z. T. ähnlichen Winkeln die gleiche (monokline) Symmetrie wie diejenigen der Benzoësäure, wie nach den Konstitutionsformeln auch die Molekel der Paraverbindung im Gegensatz zu Ortho- und Meta-Stellung dieselbe Symmetrie wie die Benzoësäure-Molekel aufweist.

Die (rhombischen) Kristallarten der zyklisch gebauten Anhydride von Bernsteinsäure und von Malcinsäure zeigen auffallend ähnliche topische Parameter, was für die beiden Säure-Hydrate, die keine Ringschließung besitzen, nicht zutrifft; *Groth* folgert hieraus, daß die ringförmigen Molekeln jener Anhydride als solche in deren Kristallstruktur eintreten und dadurch die topotrope Beziehung hervorgebracht wird.

So mögen Betrachtungen über Morphotropie und Topotropie vielleicht imstande sein, Fingerzeige bei röntgenometrischen Auswertungen wie bei chemischen Synthesen zu geben.

## Submikroskopische Experimentalphysik.<sup>1)</sup>

(Bericht über die Ehrenhaftschen Arbeiten aus der Physik des Millionstel-Zentimeters.)

Von Dr. D. Konstantinowsky, Wien.

(Schluß.)

### V. Die Optik.

§ 23. Der Ehrenhaftsche Probekörper im Spiele der Lichtwellen. — Wie kehren nun wieder zu den Ehrenhaftschen Experimenten zurück. Eines der interessantesten Gebiete der Physik des Millionstel-Zentimeters bildet das der optischen Erscheinungen. Bekanntlich sind unsere Gesichtsortgane imstande, die Wellenlängen elektromagnetischer Schwingungen, soweit diese uns als Lichtschwingungen überhaupt wahrnehmbar wer-

den, ziemlich genau von einander zu unterscheiden. Wir bezeichnen den Eindruck eines Körpers, der Schwingungen von kleiner Wellenlänge aussendet, als „blau“; größere Wellenlängen werden als „grün“, noch längere Wellen als „gelb“, „orange“ und „rot“ empfunden. Was wir als „weiß“ registrieren, stellt den summarischen Eindruck eines Gemisches der verschiedenen Strahlengattungen dar. Aber auch das Fehlen bestimmter Wellenlängen registrieren wir unter den verschiedenen Bezeichnungen der Mischfarben.

Im weißen Bogenlampenlichtstrahle, mit dem die Kügelchen sichtbar gemacht werden, sind alle sichtbaren Wellenlängen vertreten; die unsichtbaren kürzesten und längsten werden durch die Linsen der Beleuchtungsanordnung und durch die in den Gang der Strahlen gebrachte Wasserkühlung verschluckt, bevor sie in den Meßraum gelangen können. Fällt der Bogenlampenstrahl auf eine Silberplatte, so werden die Schwingungen sämtlicher Wellenlängen durch die bekannte Erscheinung der Reflexion nahezu vollständig und in eine einzige Richtung abgelenkt. Die Erscheinung wird eine wesentlich andere, wenn die Strahlen statt auf den Silberspiegel einer Platte auf die Oberfläche eines Silberkügelchens fallen, das, wie die Ehrenhaftschen, selbst nur mehr von der Größe der Wellenlänge der auffallenden Lichtstrahlen ist.

Theoretische Überlegungen lassen erwarten, daß das im Gase suspendierte Ehrenhaftsche Probekörperchen ein partieller Wegweiser für die auf dasselbe zuströmenden verschiedenen Wellenbewegungen (Farben) ist. Es hindert, je nach seiner Größe und optischen Beschaffenheit (Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtwellen im Teilchen und Fähigkeit, dieselben zu verschlucken, welche Eigenschaften der Materie im sogenannten komplexen Brechungsexponenten zusammengefaßt werden) ganz gewisse Wellenarten an ihrer geradlinigen Fortpflanzung und wirft sie zum großen Teile aus ihrer Richtung, so daß sie auch in das senkrecht zum Strahlengange justierte Beobachtungsmikroskop gelangen; andere werden weniger stark aus ihrer Bahn abgelenkt, manche fast gar nicht. Dem Auge des Beobachters müssen je nach der Größe des Kügelchens die einen oder die anderen an ihm zerschellten Wellenlängen mehr sichtbar werden, die Kügelchen daher je nach ihrer Größe verschieden gefärbt erscheinen. Tatsächlich ergibt die Beobachtung im Mikroskope, daß die kleinen und daher langsam fallenden Kügelchen in auffallend schönen und charakteristischen Farben erstrahlen.

Fig. 11 zeigt die theoretisch errechneten Intensitäten der in das Mikroskop gelangenden Ausstrahlungen an einigen Beispielen von Silberkügelchen verschiedener Größe, wie sie sich aus den auf Grund der Maxwell'schen Theorie von G. Mie entwickelten Formeln ergeben; der Gesamteindruck unseres Gesichtssinnes bei der Betrachtung eines beleuchteten Kügelchens, die

<sup>1)</sup> Vergl. diese Zeitschrift Heft 29, 30 und 32.

Farbe des Silberteilchens, läßt sich daran voraus-  
sagen; eine Silberkugel vom Radius  $7,5 - 9,10^{-6}$   
cm wird vornehmlich die Welle  $\lambda = 5,8 \cdot 10^{-5}$  cm  
bis  $5,9 \cdot 10^{-5}$  cm ins Mikroskop lenken, also gelb  
erscheinen, eine Kugel vom Halbmesser  $6,5 - 7 \cdot$   
 $10^{-6}$  cm grün usw.

In Übereinstimmung damit erweist ein Blick  
in das Mikroskop, daß die Farbe der Kügelchen  
umsomehr von kürzeren Wellenlängen herrührt,  
je langsamer sie herabfallen, d. h. je kleiner sie  
sind. Violette Kügelchen fallen langsamer als  
blaue oder grüne, diese wieder langsamer als gelbe  
oder rote.

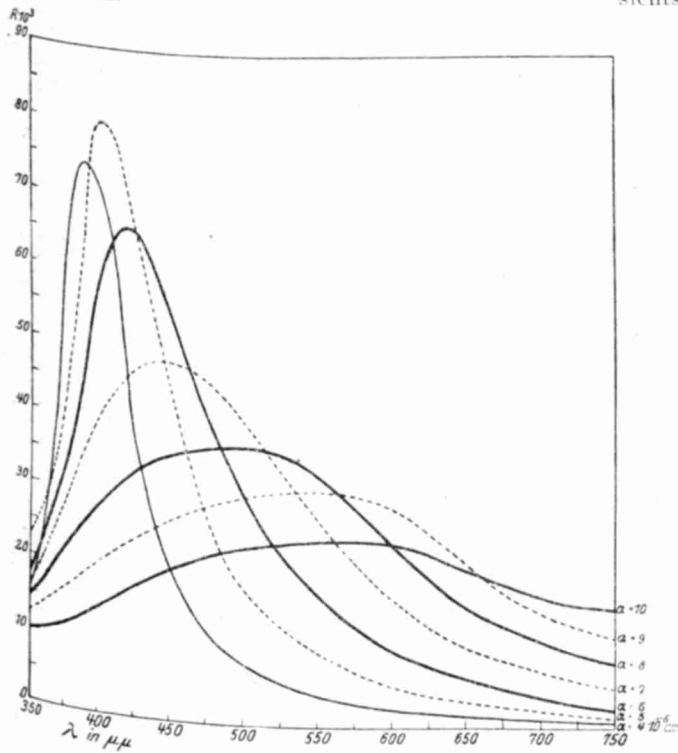


Fig. 11. Ausstrahlung von Silberkügelchen.

§ 24. Kontrolleichung des Meßinstrumentes.  
— Man könnte aber auch umgekehrt aus der Farbe  
des Kügelchens im Mikroskop, also auf rein opti-  
scher Grundlage die Größe des Kügelchens an-  
geben und damit eine Kontrolleichung des durch  
die Fallbeobachtung geeichten Ehrenhaftschen  
Meßinstrumentes anstreben, ein Gedanke, den  
Ehrenhaft auch ausgeführt hat. Durch die genaue  
Beobachtung der „farbigen“ Kügelchen ergibt sich  
z. B. an Silberkörperchen ein neuer Zusammen-  
hang zwischen Fallgeschwindigkeit und Größe,  
der durch die mit \* bezeichneten Punkte in die  
Fig. 12 aufgenommen ist. Bedenkt man, daß es  
sich um die Messung der Dimensionen von Kü-  
gelchen handelt, in deren Durchmesser nur wenig  
mehr als 100 Materiebausteine aneinandergereiht  
sein müßten und die noch bis zu etwa einer Mil-  
lion mal weniger wiegen als die geringste Na-  
triummenge, welche unsere empfindlichste Me-

thode, die Spektralanalyse, nachzuweisen gestattet,  
so kann man die an den verschiedensten Materia-  
lien, z. B. Gold, Quecksilber, Schwefel usw. ge-  
fundene glänzende Übereinstimmung der beiden  
Eichmethoden erst entsprechend würdigen.

Sie beweist die Richtigkeit des Reibungswider-  
standsgesetzes und rechtfertigt die zur Anwen-  
dung desselben notwendig gewesene Annahme,  
daß es sich um Kügelchen vom spezifischen Ge-  
wichte der verwendeten Edelmetallelektroden han-  
delt. Ist die Möglichkeit der Ermittlung solch  
kleiner Radien und der von ganz anderen Ge-  
sichtspunkten herrührenden Bestätigung ihrer

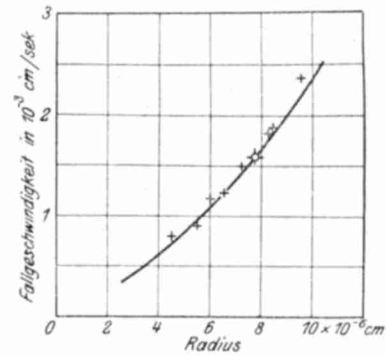


Fig. 12.

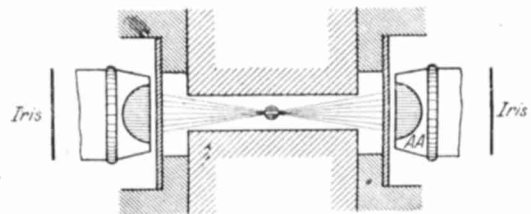


Fig. 13

Richtigkeit auf einige Prozent an und für sich  
erstaunlich, so ist es überraschend, daß Ehrenhaft  
noch eine dritte kontrollierende Meßmethode fin-  
den konnte, die wieder auf neuen und von den  
vorigen unabhängigen Grundlagen aufgebaut ist.  
Nach dieser — erst später zu erörternden — Me-  
thode läßt sich bloß ein Punkt der Radius-Ge-  
schwindigkeitskurve festlegen; er ist in die  
Fig. 12 durch \* aufgenommen.

Die Ehrenhaftsche Beobachtungsanordnung stellt  
also in gewissem Sinne die Fortsetzung der mikro-  
skopischen Größenbestimmung in jene Gebiete  
dar, welche nach den Lehren der Beugungstheorie  
für die gewöhnliche Mikroskopie nicht mehr er-  
reichbar sind.

§ 26. Vergleich mit den optischen Erfahrun-  
gen am molaren Körper. — Für das optische Ver-  
halten der Körperchen sind, wenigstens für eine  
gewisse Größenordnung unter ihnen, nicht mehr

die Reflexions-, Brechungs- und Absorptionsgesetze der großen, molaren Körper unserer Erfahrung allein maßgebend. Vielmehr machen sich zufolge der bereits mit den Wellenlängen des Lichtes vergleichbaren Größe der Probekörper die Erscheinungen der Beugung geltend. Verhältnisse, die wir an molaren Körpern durch mühsame und subtile Bearbeitung ihrer Oberflächen künstlich herbeiführen (Spalte, Gitter, Stufengitter usw.), treten als Folgeerscheinung der Kleinheit der untersuchten Materie von selbst auf. Auf ähnliche Ursachen werden die Farbnerscheinungen zurückgeführt, die gleichfalls von Natur aus auf den Oberflächen der Körper entstehen.

### VI. Thermodynamik.

§ 27. *Die Brownsche Bewegung.* — Nach den Anschauungen, welche uns die kinetische Gastheorie von dem Zustande eines Gases bietet, haben wir uns bekanntlich dessen Moleküle in stetiger, wirr durcheinander gerichteter Bewegung vorzustellen.

Wie kommt es nun, daß ein im Gase aufgehängter Körper, z. B. die Kugel eines Fadenpendels, trotz der ständig auf sie treffenden Moleküle des umgebenden Gases nicht die geringste Bewegung zeigt? Es läßt sich berechnen, daß, um die Kugel auch nur ein gerade meßbar kleines Stück nach z. B. links zu bewegen, eine ungemein große Zahl von Molekülen mehr von rechts als von links auf sie gestoßen haben müßte, ein Ereignis, das nach den Lehren der kinetischen Gastheorie eine so verschwindend geringe Wahrscheinlichkeit für sich hat, daß es praktisch niemals beobachtet werden kann. Die der Pendelkugel erteilten Bewegungsimpulse werden sich für unsere Beobachtungsmöglichkeiten immer aufheben. Je kleiner aber die Kugel gedacht wird, je mehr sie sich den Molekülen nähert, desto weniger unwahrscheinlich wird es, daß durch die in einem kleinen Zeitraume erfolgten Stöße ein Zufallsüberschuß nach der einen Richtung übrigbleibt, der die Kugel in für uns sichtbar zu machender Weise vom Platze rückt.

Wie aus den grundlegenden Theorien *Einsteins* und *v. Smoluchowskis* hervorgeht, müssen Kügelchen von der Größe unserer Probekörperchen derartigen im Mikroskope deutlich wahrnehmbaren Bewegungen unterworfen sein. Die Beobachtung kleiner Kügelchen zeigt, daß dieselben nicht völlig gerade und senkrecht herabfallen, sondern daß dieser Fallbewegung eine stoßartige, zitternde und unregelmäßige Bewegung überlagert ist.

Die nach ihrem Entdecker *Brownsche Bewegung* genannte Erscheinung war an kleinen in Flüssigkeiten suspendierten Teilchen schon lange bekannt, wurde in Gasen aber erst durch *Ehrenhaft* ihrer Messung zugeführt. Wir beobachten in ihr die Wirkungen der Wärmebewegung der Moleküle des umgebenden Gases auf unser Kügelchen, den thermodynamisch interessanten Vorgang des statistischen Temperatenausgleiches des Par-

tikels mit seiner Umgebung. Die Erscheinung der Brownschen Bewegung gibt uns also einen wesentlichen Zug der Thermodynamik des Kügelchens.

Die zackige Bahn der Bewegung scheint umso komplizierter, je stärker die Vergrößerung des Mikroskops ist. Offenbar beobachtet man im Mikroskope nicht die in alle Einzelheiten aufgelöste Bewegung, sondern bereits eine aus sehr vielen kleinen Wegstrecken zusammengesetzte Resultierende einer in Wahrheit sehr komplizierten Bahn. Steht das Kügelchen unter dem Einflusse einer konstanten Kraft, so vollführt es eben neben dieser zitternden Bewegung noch die der Kraftwirkung entsprechende gleichförmige Bewegung in diese Krafrichtung. Durch die Molekülstöße wird das Kügelchen wohl einmal zufälligerweise rascher, ein andermal langsamer gefallen sein; die Rechnung zeigt jedoch, daß falls die von den Stößen verursachten Störungen tatsächlich zufällige gewesen sind, das Mittel sehr vieler Fallzeiten über die gleiche Strecke identisch mit der Fallzeit ist, die das Kügelchen ohne Störung durch die Brownsche Bewegung gebraucht hätte. Aus der Theorie der Brownschen Bewegung läßt sich nun gleichfalls die Beweglichkeit (vgl. § 7) eines Kügelchens errechnen. Die Beobachtungen im elektrischen Felde führen so zum Produkte Loschmidtsche Zahl in die Ladung des Probekörperchens. (Vgl. § 21.) Wenn es einheitliche Elektronen gäbe, so müßte dieses Produkt jedesmal mit dem Faraday der Elektrolyse oder mit seinen Vielfachen übereinstimmen. Das ist aber nicht der Fall, denn es werden Werte gefunden, welche von seinen Vielfachen abweichen und insbesondere auch solche, die kleiner als das Faraday sind. Also auch dieser Weg führt zum Schlusse, daß, wenn ein Elektron existiert, es kleiner sein muß als das von der Theorie bisher postulierte.

Aus den beobachteten Abweichungen von den mittleren Zeiten läßt sich ferner schließen, daß der Charakter der Brownschen Bewegung der einer ungeordneten Bewegung ist, d. h. die verschiedenen Fallzeiten so verteilt sind, wie es die zufälligen Zusammenstöße des Teilchens mit den Gasmolekeln bedingen. Bemerkenswert ist, daß auch die Untersuchung des Brownschen Phänomens an Bazillen durch *K. Przibram* ergab, daß ihre Bewegung den Gesetzen des Zufalles gehorcht.

### VII. Die Strahlung.

§ 28. *Photophoresis.* — Schon im Jahre 1910 machte *Ehrenhaft* die Beobachtung, daß er unter seinen Probekörperchen Kugeln finden konnte, „die ruhig in vertikaler Bahn herabfielen, nur dann, wenn sie in die intensivste Spitze des Lichtkegels kamen, manchmal ein Stückchen auffallend rasch in horizontaler Richtung fortgetragen wurden und wenn sie diesen intensivsten Teil verlassen hatten, wieder vertikal nach abwärts fielen.“ Um die offenbar vom Lichtstrahle herrührende Wirkung, welche *Ehrenhaft Photophoresis* nennt,

zu steigern, ersetzte er das beleuchtende Objektiv durch ein solches von hoher Apertur (Apertur 0,3; Äquivalentbrennweite 17 mm), so daß der Lichtstrahl zwar nur mehr einen Querschnitt von  $\frac{1}{10}$  mm Durchmesser hatte, die mittlere Energiedichte im engsten Teile des Strahles jedoch 300 mal größer als die der unkonzentrierten Sonnenstrahlung ist. Um ein in Beobachtung genommenes Teilchen durch die Seitwärtsbewegung im Strahle nicht aus dem Gesichtsfelde, aus der Gewalt zu verlieren, wurde eine analoge Beleuchtungsanordnung auch von der anderen Seite eingerichtet, so zwar daß durch zwei photographische Momentverschlüsse der von rechts, der von links kommende oder auch beide Strahlen zur Beobachtung des Probekörpers freigegeben werden konnten.

§ 29. *Lichtpositive und lichtnegative Materie.* — Die Probekörperchen verschiedenen Materiales zeigten nun im Lichtfelde verschiedenes Verhalten. Es gibt Kügelchen, wie z. B. aus Gold, Silber, Quecksilber usw., die in die Richtung der Fortpflanzung der Lichtstrahlen, also von der Lichtquelle weg, und solche, wie z. B. aus Jod, Schwefel, Salpetersäure usw., die entgegen, also auf die Lichtquelle zu fortgetragen werden. Daneben konnte man an manchen Materialteilchen keine Beeinflussung durch das Licht beobachten. *Ehrenhaft* nennt die erste Art von Materie, die gleichsam von der Lichtquelle abgestoßen wird, *lichtpositiv*, die zweite und dritte entsprechend *lichtnegativ* und *lichtneutral*.

§ 30. *Über den Ursprung der Kräfte des Lichtes.* — Wir wissen aus der Mechanik unserer Größenordnung, daß die Bewegung in eine bestimmte Richtung stets nur die Folge einer Kraftwirkung in diese Richtung gewesen sein kann. Welches ist also die Ursache der uns hier entgegertretenden Kraft? Sind es durch den Lichtstrahl im Gase hervorgerufene Strömungserscheinungen? Haben die Erscheinungen vielleicht in einer eventuellen elektrischen Ladung des Probekörpers ihre Ursache? Wird die — offenbar vom Lichtstrahl stammende — Energie durch die Strahlung direkt oder durch Vermittlung des das Partikel umgebenden Gases in Bewegungsenergie des Kügelchens umgesetzt? Wäre die beobachtete Kraftwirkung auch dann vorhanden, wenn keine Gas-moleküle das Kügelchen umschwirren würden? *Ehrenhaft* formuliert die Fragestellung dahin, daß er die Kräfte, welche das Licht auf die Materie ohne vermittelnde Wirkung durch dessen materielle Umgebung ausübt, „Kräfte „erster Art“, alle übrigen denkbaren Kräfte „zweiter Art“ nennt und zu unterscheiden versucht, wieviel von den einen und wieviel von den anderen zur Bewegung der Kügelchen beigetragen wird.

Zunächst zeigt sich, daß ein in den Strahlengang gebrachter, mit einer  $\text{CuSO}_4$ -Lösung gefüllter Trog; der einen großen Teil der im Bogenlampenstrahle vertretenen Lichtwellen, darunter insbesondere die längeren (Wärme-) Wellen absorbiert, die Erscheinung nur so weit beeinflusst, als

es der geschwächte Energieinhalt des Strahlenkegels erwarten läßt; das Charakteristische der Erscheinung, insbesondere die Scheidung der Körper in die drei Gruppen bleibt gewahrt, woraus geschlossen werden kann, daß es sich wahrscheinlich nicht um eine Wärmebewegung im umgebenden Gase handelt. Bringt *Ehrenhaft* eine Mischung von lichtpositiven und lichtnegativen Probekügelchen in den Beobachtungsraum, so bewegen sie sich im Lichtstrahle gegen einander: die einen werden vom Lichte angezogen, die anderen abgestoßen. Es kann die Bewegung also auch nicht auf einer durch den Strahl hervorgerufenen Strömungsbewegung des Gases fußen. Einen interessanten Spezialfall dieser Erscheinung bieten Selen, Tellur, Arseneteilchen usw.; beim Verdampfen entstehen offenbar verschiedene Modifikationen des Präparates, die im Lichtstrahle entmisch werden.

Um den Einfluß der Ladung auf die Bewegung zu studieren, wird ein zunächst ungeladenes, z. B. lichtpositives Probekörperchen in den Lichtkegel gebracht und seine photophoretische Geschwindigkeit durch Abstoppen der Zeit, während welcher es vom Lichtstrahle über eine gewisse Strecke fortgeschoben wird, ermittelt. Wird das Kügelchen durch Bestrahlen mit einem Radiumpräparat in einen elektrisch geladenen Zustand versetzt, so kann es durch Heben im elektrischen Felde und Seitwärtsbewegen mit Hilfe der beiden Lichtstrahlen wieder an die gleiche Stelle des Lichtkegels wie vorhin dirigiert werden. Die neuerliche Messung zeigt, daß die vom Lichte erteilte Geschwindigkeit und mithin die photophoretische Kraft von seinem elektrischen Ladungszustande unabhängig ist.

Daraus läßt sich zunächst gleich folgern, daß die photophoretischen Erscheinungen ebenso gut an ungeladenen wie auch an elektrisch geladenen Probekörpern untersucht werden können, was insofern von Wichtigkeit ist, als z. B. die eventuell störende Fallbewegung (größerer) Kügelchen durch ein entsprechend großes und entgegengesetztes elektrisches Feld sistiert werden kann.

§ 31. *Die direkte Umwandlung von strahlender Energie in Bewegungsenergie.* — Um schließlich noch andere, unbekanntere Einflüsse des Gases untersuchen zu können, wurden die photophoretischen Geschwindigkeiten, z. B. eines und desselben Silberkügelchens beobachtet, wenn das Gas im Beobachtungsraum auf die verschiedensten Drucke (von 760 mm bis herab zu 55 mm Hg) ausgepumpt wurde; statt eines und desselben Kügelchens konnten und wurden in vielen Fällen verschiedene Kügelchen, aber von gleicher Größe genommen, die nach der optischen Größenbestimmung (§ 24) an den gleichen von ihnen ausgestrahlten Farben leicht zu erkennen sind. Wie Tabelle 1 erkennen läßt, werden die erreichten Geschwindigkeiten umso größer, je niedriger der Gasdruck ist; da aber auch der Reibungswiderstand umso kleiner, die Beweglichkeit B umso



Tabelle 1.

	Gasdruck in mm Hg	Photophoretische Geschwindigkeit in $10^{-3}$ cm/sec	Beweglichkeit in $10^{-7}$	Photophoretische Kraft $\left(\frac{v}{B}\right)$ $10^{-10}$ Dyn.
Schwefelkugel $19 \cdot 10^{-6}$ cm Radius	760	1,70	1,77	0,96
	496	1,97	2,10	0,94
	354	2,23	2,40	0,93
	143	3,93	4,20	0,94
	55	8,08	8,90	0,91
Schwefelkugel $9,10^{-6}$ cm Radius	760	0,60	4,79	0,13
	496	0,80	6,48	0,12
	354	0,98	7,98	0,12
	143	1,57	13,27	0,12
	55	4,09	34,25	0,12
Silberkugel $9,10^{-6}$ cm Radius	760	7,92	7,60	1,03
	550	8,57	8,90	0,95
	400	10,44	10,80	0,94
	320	12,05	12,60	0,90
	220	17,60	16,60	0,96
	100	35,75	32,10	0,91

größer wird, je höher die Gasverdünnung getrieben wird, d. h. je größer die den Dimensionen der Kügelchen bereits vergleichbaren mittleren Weglängen werden, welche ein Gasmolekül ohne Zusammenstoß mit einem zweiten durchläuft, ist die photophoretische Kraft für den Druck  $p = p_0$  durch den Quotienten  $K = \left(\frac{v}{B}\right)_{p=p_0}$  gegeben; sollten Kräfte im Spiele gewesen sein, welche auf indirekte Einwirkungen des das Partikel umgebenden Gases ganz oder zum Teile zurückzuführen sind, so müßte sich dies in einer Veränderung von  $K$  mit der Variation des Gasdruckes offenbaren. Die ausgezeichnete Konstanz der photophoretischen Kraft  $K$  in Tabelle 1, Spalte 5 schließt jede Teilnahme des Gases an der Erscheinung aus; die von *Ehrenhaft* konstatierten Bewegungen würden im luftleeren Raume ebenfalls vorhanden sein, sie stellen die direkte Umwandlung von strahlender Energie in Bewegung, die photophoretischen Kräfte reine Kraftwirkungen des Lichtes auf die Materie dar.

Kräfte, die vom Lichte auf die Materie ausgeübt werden, wurden schon von *Fresnel* am Anfang des 19. Jahrhunderts vermutet; *Maxwell* konnte sie aus seiner elektromagnetischen Lichttheorie voraussagen. *Lebedew* wies sie an — im Vergleiche zu den *Ehrenhaft*schen Probekörperchen großen — Platinplättchen durch Torsionswagen nach. Die messende Verfolgung des direkten Umsatzes von Lichtenergie in solche der progressiven Bewegung eines einzelnen Körperchens und vor allem die Entdeckung der dem Lichtdrucke entgegengesetzten Erscheinung an der lichtnegativen Materie geht auf *Ehrenhaft* zurück.

§ 32. Experimentelle Nachahmung *Arrhenius*scher Kometschweifteilchen. — Die fundamentale Wichtigkeit, welche derartigen Kräften für

die kosmische Physik zukommt, hat der schwedische Forscher *Svante Arrhenius* ausgesprochen. Die den Astronomen seit langem bekannte Tatsache, daß die Schweife gewisser Kometen der Sonne stets abgewendet sind, konnte aus der die Bewegung der Sterne so restlos beschreibenden Newtonschen Mechanik nicht erklärt werden. *Arrhenius* nimmt an, daß die Druckkräfte des von der Sonne ausgestrahlten Lichtes den aus vielen kleinen Staubteilchen zusammengesetzt gedachten Schweif des Kometen von der Sonne wegstoßen, während der massive Kern des Kometen durch Gravitationskräfte angezogen wird, woraus sich die eigentümliche Stellung des Kometen zwanglos erklären ließ.

Während nun die Theorie des Lichtes nur einen Lichtdruck abzuleiten vermag (entsprechend den lichtpositiven Kügelchen *Ehrenhaft*s) gibt es (den lichtnegativen Probekörpern *Ehrenhaft*s analog) in der Natur auch Kometen, deren Schweife in einer Stellung zur Sonne gekehrt sind, die sich aus Gravitationskräften allein nicht erklären ließe (den lichtnegativen Probekörpern *Ehrenhaft*s analog).

Mit Hilfe seines Meßinstrumentes ist nun *Ehrenhaft* im Stande, an irdischen Körpern ein im Spiele der Lichtdruck- (oder Lichtzug-) kräfte befindliches *Arrhenius*sches Kometschweifteilchen zu demonstrieren; wollte man nämlich die auf ein Probekörperchen einwirkenden Lichtdruckkräfte auf die statische Methode durch Vergleich mit den Gravitationskräften, dem Gewichte des Kügelchens, messen, so müssen die diesmal von unten (bzw. von oben) vertikal einfallenden Lichtstrahlen so lange abgeschwächt werden, bis Licht- und Gravitationskräfte einander das Gleichgewicht halten: das *Ehrenhaft*sche Probekügelchen schwebt dann dem *Arrhenius*schen Staubteilchen vollkommen analog im Raume.

§ 33. Zweite Kontrolleichung des *Ehrenhaft*schen Meßinstrumentes. — Da die Masse des Kügelchens mit kleiner werdendem Radius nach der 3. Potenz, die auf die Oberfläche des Kügelchens treffende Energie nur nach der 2., also weniger rasch abnimmt, sollte man erwarten, daß die photophoretischen Kräfte im Lichtstrahle umso wirksamer sein werden, je kleiner das beobachtete Kügelchen ist. Tatsächlich ist dies aber, wie *Schwarzschild* und *Debye* auf ziemlich kompliziertem Wege berechnet haben, nur so lange der Fall, als es sich um Kügelchen handelt, die gegen die Wellen des einfallenden Lichtes sehr groß sind. Bei kleineren treten Wirkungen auf, die mit der Beugung und Absorption des Lichtes durch das Kügelchen zusammenhängen und bei deren Berücksichtigung das für uns interessante Ergebnis gefunden wurde, daß bei Kügelchen ein und desselben Materiales eine ganz bestimmte Größe, z. B. Silberkügelchen von  $9,8 \cdot 10^{-6}$  cm Radius, ein Maximum des Lichtdruckes erfahren müßte. Tabelle 2 enthält in der ersten Spalte die Fallgeschwindigkeiten von Silberkügelchen verschiedener Größe, die in einem weniger hell erleuchteten

Tabelle 2.

Fallgeschwindigkeit in $10^{-3}$ cm/sec	Radius aus Widerstandsgesetz in $10^{-6}$ cm	Photophoretische Geschwindigkeit in $10^{-5}$ cm/sec	Beweglichkeit in $10^{-7}$	Photophoretische Kraft in $10^{-12}$ Dyn.
1,23	6,45	2,11	10,65	19,8
1,47	7,28	4,67	8,83	52,9
1,57	7,60	4,82	8,28	61,8
1,69	8,00	11,24	7,66	146,6
1,99	8,91	11,73	6,51	180,0
2,32	9,86	18,15	5,62	323,0
2,33	10,04	11,68	5,47	213,8
2,39	10,09	12,55	5,46	229,8
3,32	12,38	7,33	4,06	180,6
3,86	13,50	7,08	3,57	189,3

Teile des Gesichtsfeldes (breiter Teil des Lichtkegels) ohne Störung durch Lichtdruckwirkungen gemessen wurden; aus der zweiten Spalte sind die daraus errechneten Radien zu entnehmen. Wurde nun jedes der Probekügelchen in denselben Teil des hellen Lichtstrahles (engste Einschnürung) gebracht, so konnten aus den konstatierten photophoretischen Geschwindigkeiten (Spalte 3) die in Spalte 5 angegebenen Kräfte errechnet werden, die für Kügelchen vom Radius  $9,9 \cdot 10^{-6}$  cm ein deutlich ausgeprägtes Maximum zeigen. Die aus diesen Zahlen zu entnehmende — schon erwähnte — ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen dem errechneten und dem beobachteten Maximum bestätigt aufs Neue und abermals auf ganz verschiedener Grundlage die Richtigkeit der Eichung des Ehrenhaftschen Meßinstrumentes.

§ 34. *Das empfindlichste Bolometer.* — Hat sich das Ehrenhaftsche Meßinstrument bei der Bestimmung der Masse der Kügelchen als eine etwa zweimillionenmal empfindlichere Wage als die Nernstsche Mikrowage und beim Ermitteln von Ladungen als ein millionenmal empfindlicheres Elektrometer als die sonst am empfindlichsten bekannten ansehen lassen, so kann es in gewissem Sinne auch als das empfindlichste Bolometer gelten. Denn obwohl der das Probekörperchen sichtbar machende Lichtstrahl in seiner engsten Einschnürung nur mehr einen Durchmesser von  $\frac{1}{10}$  mm aufweist, ist Ehrenhaft dennoch in der Lage, die Energieverteilung auch noch innerhalb dieses winzigen Querschnittes aus den photophoretischen Geschwindigkeiten anzugeben, in welche ein und dasselbe Kügelchen an den betreffenden Stellen gelangt.

§ 35. *Schluß.* — Die physikalische Denkrichtung unserer Zeit bewegt sich durchaus unter dem Leitsterne atomistischer Vorstellungen, von denen namentlich die Bilder über die Atomistik der Materie, der Elektrizität und der Strahlung führenden Einfluß gewonnen haben.

Die Ehrenhaftschen Untersuchungen, die in möglichster Annäherung der untersuchten Materie an die geheimnisvollen Bausteine die Vorgänge in diesen Größenordnungen durch das direkte Experiment zu erforschen und in ein deutlicheres Licht

zu stellen suchen, werden daher gerade in unserer Zeit die richtige Würdigung finden.

Sie festigen einerseits Vorstellungen, wie sie die Theorie für die atomaren Bereiche gebaut hat, wie in der Beobachtung der Brownschen Bewegung in Gasen oder bestätigen andere von der Theorie vorausgesagte charakteristische Erscheinungen der Physik der Übergangsgrößenordnung vom molaren zum molekularen Körper wie in der Verfolgung der Erscheinung des Lichtdruckes, in den Farbenercheinungen der kleinen Probekörperchen; andererseits geben sie in neuen Entdeckungen wie in der Konstatierung von Ladungen von viel geringerer Größe als das bis nun als unteilbar angesehene Elementarquantum der Elektrizität und im Phänomen des lichtnegativen Körpers der Theorie fruchtbare Anregungen zum weiteren Ausbau.

Aber auch der Experimentalphysik werden in einzelnen Gebieten durch neue Forschungsmethoden Arbeitsmöglichkeiten geschaffen, deren Ausbeutung die bereits in einigen Zügen gekennzeichnete Physik der Größenordnung des Millionstel-Zentimeters Materie noch viel weiter vervollkommen wird.

Literaturangaben.

- Zu I. § 4.  
 W. Weber, Ber. d. kgl. sächs. Ges. d. Wiss. 1852.  
 P. Weiß, Journ. d. phys. 4, 473, 1905.  
 A. Einstein u. de Haas, Verh. d. d. phys. Ges. 17, 152, 1915; 18, 173, 1916.  
 H. Helmholtz, Vorträge u. Reden, I. Bd. 251, 1896.  
 G. J. Stoncy, Phil. mag. XI, 381, 1881.  
 H. A. Lorentz, Versuch einer Theorie d. el. u. opt. Erschein. in bewegten Körpern, Leiden, 1895.  
 M. Planck, Verh. d. d. Phys. Ges. 1900.
- Zu II. § 5.  
 F. Ehrenhaft, Wien. Ber. CXVIII, IIa, 321, 1909.  
 Wien. Ber. CXIX, IIa, 815, 1910.  
 Phys. Z. 11, 619, 1910; 12, 94, 1911.  
 Wien. Ber. CXXIII, IIa, 53, 1914.
- § 6. F. Ehrenhaft, Phys. Z. 16, 227, 1915.
- Zu III. § 7.  
 E. Cunningham, Proc. roy. soc., S. A. 83, 357, 1910.  
 J. Zelcny u. Mc. Keehan, Phys. Z. 11, 78, 1910; 12, 707, 1911.  
 M. Knudsen, Ann. d. Phys., 36, 981, 1911.
- Zu IV. § 17.  
 F. Ehrenhaft, l. c., ferner Ann. d. Phys. 44, 673, 1914.  
 D. Konstantinowsky, Ann. d. Phys. 46, 261, 1914; 48, 57, 1915; 49, 881, 1916.  
 J. Parankiewicz, Phys. Z. 18, 567, 1917, Ann. d. Phys. 53, 551, 1917.
- § 20.  
 J. S. Townsends, phil. mag., 45, 125, 1898.  
 J. J. Thomson, phil. mag., 46, 523, 1898; 48, 547, 1899.  
 H. A. Wilson, phil. mag. 5, 429, 1903.  
 K. Przibram, Wien. Ber. CXXI, IIa, 949, 1912.  
 A. Mayer, Wien. Ber. CXXI, 1097, 1912.  
 E. Weiß, Wien. Ber. CXX, 1021, 1912.  
 A. Joffé, Sitzber. d. kgl. bayr. Akad. d. Wiss. Febr. 1913.  
 E. Rögner, Phys. Z. 12, 263, 1911.  
 J. Roux, Ann. d. phys. et chim., mai 1913, 1918.  
 E. Meyer u. W. Gerlach, Ann. d. Phys. 45, 177, 1914; 47, 227, 1915.