ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 12.

1. *Über Strahlungsdruck;* *von E. F. Nichols und G. F. Hull.*

(Aus dem englischen Manuskript übersetzt von H. Stein in Gießen.)

Die historische Entwicklung unseres Gegenstandes möge hier übergangen werden, da das Wesentliche schon in der Arbeit von P. Lebedew¹⁾ enthalten ist. Ergänzend bemerken wir nur, daß außer Lebedew²⁾ auch Fitzgerald³⁾ und Hull⁴⁾ den Einfluß des Strahlungsdruckes auf Massen, die dem Newtonschen Gravitationsgesetz unterworfen sind, mit besonderer Rücksicht auf die Abstoßung der Kometenschweife diskutiert haben. In erweiterter Weise ist der Einfluß des Strahlungsdruckes auf kosmische Vorgänge neuerdings von Arrhenius⁵⁾ und Schwarzschild⁶⁾ theoretisch behandelt worden.

Vor dem Internationalen Physiker-Kongreß im Jahre 1901 beschrieb Hr. Lebedew⁷⁾ eine Versuchsanordnung, die er zu jener Zeit zur Messung des Lichtdruckes benutzte. Seine bis dahin erhaltenen Ergebnisse faßt er folgendermaßen zusammen: „Die Resultate der bis jetzt angestellten Messungen sind folgende: das Experiment zeigt, daß ein auffallendes Lichtstrahlenbündel auf ebene absorbierende oder reflektierende Oberflächen Drucke ausübt, die, innerhalb der Beobachtungsfehler, gleich den von Maxwell und Bartoli er-

1) P. Lebedew, Ann. d. Phys. 6. p. 433. 1901.

2) P. Lebedew, Wied. Ann. 45. p. 292. 1892; Astrophys. Journ. 14. p. 155. 1902.

3) G. F. Fitzgerald, Proc. Roy. Soc. Dublin 1884.

4) G. F. Hull, Trans. Astron. Soc. Toronto p. 123. 1901.

5) S. Arrhenius, Königl. Vetenskaps. Akademiens Fördhandlingar p. 545. 1900.

6) K. Schwarzschild, Kgl. Bayer. Akad. d. Wissensch. 31. p. 293. 1901.

7) P. Lebedew, Rapports présentés au Congrès International de Physique (2) p. 133. Paris 1900.

rechneten Werten sind.“ In der Abhandlung waren weder eine Schätzung der Beobachtungsfehler noch andere zahlenmäßige Daten gegeben. Leider kamen die Verhandlungen des Pariser Kongresses den Autoren nicht vor der Veröffentlichung ihrer eigenen vorläufigen Versuche in die Hände, ebensowenig war ihnen bis dahin eine Andeutung von der Methode oder den Resultaten von Hrn. Lebedews Arbeit zu Gesicht gekommen.

Die Autoren¹⁾ veröffentlichten ihre Resultate, die sie bei Messungen des Strahlungsdruckes unter acht verschiedenen Luftdrucken erhalten hatten, in einer vorläufigen Mitteilung an die American Physical Society bei einer Versammlung mit Sektion B der American Association zu Denver am 29. August 1901. Die damals mitgeteilten Resultate ballistischer Beobachtungen des Strahlungsdruckes sind in Tab. I gegeben, wo p den Druck der umgebenden Luft in Millimetern Quecksilber und d das statische Äquivalent des ballistischen Ausschlages der Drehwage angibt. Die Resultate wurden erhalten mit wesentlich denselben Apparaten und Methoden, die auf p. 239 ff. beschrieben sind.

Tabelle I.

p	d	p	d
96,3	19,7	33,4	21,1
67,7	21,0	1,2	20,9
37,9	21,6	0,13	26,8
36,5	22,1	0,06	23,2

Mittel: 22,5

Bilden wir das Produkt aus dem Durchschnittswert des in Zentimetern gemessenen Ausschlages und der Drehwagenkonstanten, so beträgt der Strahlungsdruck:

$$2,25 \cdot 4,65 \cdot 10^{-5} = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ Dynen.}$$

Die Energie der Strahlung wurde mit einem Bolometer von besonderer Konstruktion²⁾ gemessen (vgl. Fig. 1). Hierbei

1) E. F. Nichols u. G. F. Hull, Science 14. p. 538. 1901; Phys. Rev. 13. p. 293. 1901.

2) E. F. Nichols u. G. F. Hull, Phys. Rev. 13. p. 307. 1901.

wurde die empfindliche Oberfläche einmal durch den Lichtstrahl und einmal durch einen elektrischen Strom von bekannter Stärke auf gleiche Temperatur gebracht. Wenn i die gemessene Stromstärke, r der Bolometerwiderstand ist, so ist $i^2 \cdot r \cdot 10^7$ gleich dem Energiegehalt des Strahles in Erg/Sekunden. Bei den Beobachtungen war $i^2 = 0,75 \text{ Amp.}^2$ und $r = 0,278 \Omega$. Nehmen wir den Reflexionskoeffizienten der Silberschicht der Flügel zu 0,92 an, so ergibt sich der aus der Energie berechnete Druck

$$p = 1,34 \cdot 10^{-4} \text{ Dynen.}$$

Nach Veröffentlichung obiger Resultate wurde ein durch einen Konstruktionsfehler verursachter Irrtum in dem Bolometerwiderstand gefunden. Der korrigierte Wert des Widerstandes ergab $0,221 \Omega$ und somit ist der verbesserte Wert des Druckes

$$p = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ Dynen.}$$

Die Übereinstimmung dieses Resultates mit dem beobachteten Druck ist eine zufällige. Durch Anbringung der später bestimmten notwendigen Korrekturen ergab sich eine Differenz zwischen dem beobachteten und berechneten Druck zu ca. 3 Proz. Ferner belief sich der wahrscheinliche Fehler des Resultates auf etwa den doppelten Betrag.

In diesen Annalen veröffentlichte Hr. Lebedew¹⁾ die Resultate von einer Serie Messungen des Strahlungsdruckes, die umfassender als die früheren Beobachtungen der Autoren war.

Fig. 1.

1) P. Lebedew, Ann. d. Phys. 6. p. 433. 1901.

Der Hauptunterschied zwischen seiner und unserer Methode liegt darin, daß er sehr dünne Metallflügel in einem hohen Vakuum aufhing, also Maxwells Vorschlag wörtlich befolgte, während wir mit versilberten Glasflügeln bei mäßigen Verdünnungen arbeiteten. Die Einwirkung der Luft bei diesen Drucken wurde sorgfältig und erschöpfend untersucht; wir fanden, daß sie bei kurzen Bestrahlungen vernachlässigt werden könne. Da wir wissen, wie mit dem Grade der Verdünnung die Lufteinwirkung sich ändert, glauben wir bestimmt, daß bei Benutzung der Lebedewschen hohen Vakuen unsere Methode wegen der hier relativ stark auftretenden Luftstörungen nicht erfolgreich gewesen wäre.

Hrn. Lebedews Verfahren mit geschwärzten Flügeln zeigt, daß sein Erfolg in der teilweisen Entfernung der Luftstörungen mehr von der guten Wärmeleitfähigkeit seiner dünnen Flügel als von dem benutzten hohen Vakuum herrührt.

Hr. Lebedew¹⁾ schätzt den möglichen Fehler seines Schlußresultates auf ± 20 Proz. Ein Vergleich von Lebedews Arbeit mit unseren vorläufigen Versuchen scheint zu zeigen, daß seine zufälligen Fehler größer sind, als die unserigen, aber wegen des bei der Bestimmung des Bolometerwiderstandes unterlaufenen Irrtums stimmten unsere Resultate nicht so gut mit der Theorie überein wie die seinigen.

Beide obige Arbeiten stellen hinreichend die *Existenz* einer von Strahlung herrührenden Druckkraft fest, aber keine enthält nach unserer Meinung eine genügende *quantitative* Bestätigung der Maxwell-Bartolischen Theorie.

Neuere Untersuchungen.

I. Druck der Strahlung.

Da wir weder die Luft vollständig entfernen noch ihren Einfluß unter verschiedenen Bedingungen berechnen können, so ist nur dann ein Erfolg zu erwarten, wenn man Apparate und Versuchsanordnung so einrichtet, daß die von der Luft ausgehenden Störungen auf ein Minimum herabgesetzt werden. Die folgenden Überlegungen führten zu einer Methode, mit

1) l. c. p. 457.

welcher die Elimination der Luftstörungen bei den vorliegenden Versuchen praktisch erfüllt war.

1. Die Oberfläche des bestrahlten Flügels soll ein möglichst vollkommener Reflektor sein. Einmal wird hierdurch der Lufteffekt verkleinert, da infolge der geringen Absorption die Temperatur des Flügels nur wenig steigt, während andererseits der Strahlungsdruck vergrößert wird, denn nach der Theorie übt ein vollständig reflektierter Strahl den doppelten Druck aus, wie einer, der ganz absorbiert wird.

2. Bei der Untersuchung, wie sich die Einwirkung eines Strahles auf eine Oberfläche gestaltet, wenn diese von Luft von verschiedenen Drucken umgeben ist, wurde gefunden, daß für gewisse Drucke die Luftstörungen ein Minimum werden.

3. Der Apparat, eine Art Drehwage, soll zwei einander möglichst gleiche Flügel tragen. Sie sollen symmetrisch zur Drehachse aufgehängt und so eingerichtet sein, daß die Kräfte, die von Strahlung und Lufteinwirkung (Saug- oder Druckwirkung an der wärmeren Oberfläche) herrühren, einmal gleichgerichtet sind, das andere Mal aber gegeneinander wirken, wenn durch Umdrehung der Suspension der Sinn des Lufteffektes umgekehrt wird.

4. Der Strahlungsdruck muß seiner Natur nach den maximalen Wert momentan erreichen, wohingegen die Einwirkung der Luft, wie die Beobachtung gezeigt hat, mit Null beginnt und mit der Länge der Exposition wächst; sie steigt erst rasch, dann langsamer zu ihrem maximalen Betrage an, der, wie in einigen Fällen beobachtet wurde, noch nicht erreicht war, wenn die Bestrahlung $2\frac{1}{2}$ bis 3 Min. gedauert hatte. Bei hohen Luftdrucken war sogar eine noch längere Exposition nötig, um stationäre Zustände zu erreichen. Die Luftstörungen können also noch weiter durch eine ballistische oder halbballistische Meßmethode beseitigt werden.

1. Beschreibung der Apparate.

Die Drehwage.

Gestalt und Anordnung der Flügel, wie sie zur Druckmessung in vorliegender Arbeit benutzt wurden, zeigt Fig. 2.

Die Rotationsachse ab bestand aus einem dünnen Glasstäbchen. An ihr war ein gläserner Querarm c , der an jedem Ende zu einem kleinen Häkchen umgebogen war, befestigt. Die Flügel C und D , die den Lichtstrahl auffingen, waren runde Mikroskopdeckgläschen von 12,8 mm Durchmesser und 0,17 mm Dicke; jedes wog ungefähr 51 mg. Um die beiden Flügel von einander unterscheiden zu können, im Falle sich besondere Unterschiede bei den Messungen zeigen sollten, und um auch beide Seiten von jedem Flügel zu kennzeichnen, war mit einem Diamanten auf dem einen ein C und auf dem anderen ein D eingeritzt. Durch jedes Gläschen war nahe an dem Rande ein Loch von ca. 0,5 mm Durchmesser eingebohrt, mit welchem die Gläschen an die Haken des Querarmes c eingehängt werden konnten. An entgegengesetzten Seiten der Drehachse bei d waren zwei andere gläserne Querarme angebracht, zwischen welche die Deckgläschen leicht hineinglitten und so sicher in einer Ebene festgehalten wurden. Ferner war unten an ab ein kleiner versilberter Planspiegel m rechtwinklig zur Ebene von CD angebracht. Dieser Spiegel war auf der Silberseite hochpoliert, so daß die Skala S_s (Fig. 3) auf beiden Spiegelseiten abgelesen werden konnte. Ein kleines Messinggewicht m_3 (Fig. 2) von 452 mg Masse und bekannten Dimensionen war an dem unteren Ende von ab befestigt. Die als Flügel dienenden Deckgläschen waren versilbert, auf den Silberseiten hochpoliert und hingen so an den Häkchen, daß entweder beide Silberseiten oder beide Glasseiten dem Lichte zugekehrt waren. Ein Quarzfaden f_2 von 3 cm Länge war an dem oberen Ende von ab befestigt und hing an dem unteren Ende eines feinen Glasstäbchens d_1 , das einen horizontalen Magneten m_2 trug. Das Stäbchen d_1 war vermittelt eines kurzen Fadens an einer Stahlnadel e , die in dem Träger h gehoben oder gesenkt werden konnte, drehbar aufgehängt. Das Ganze wurde von einem gebogenen Glasrohr t getragen, das in einem soliden Messingfuß F befestigt war. Dieser ruhte auf einer ebenen Glasplatte P , welche wiederum auf einer Messingplatte aufgekittet war, die drei in der Figur nicht sichtbare Nivellierschrauben besaß. Eine Glasglocke von 25 cm Höhe und 11 cm Durchmesser bedeckte die Drehwage. Der untere Rand der Glocke war auf die Platte P aufgeschliffen.

Mit Hülfe eines hohlen Glasstopfens, der in den Hals der Glocke eingeschliffen war, konnte sie mit einer Geisslerschen Quecksilberluftpumpe, einem McLeodschen Druckmesser und einer vertikalen Glasröhre in Verbindung gesetzt werden. Dieses Glasrohr tauchte in Quecksilber und diente während der Versuche bei hohen Luftdrücken zur ungefähren Druckangabe. Die

Fig. 2.

niederen Drucke wurden mit dem McLeodschen Manometer nach der gebräuchlichen Art gemessen. Ein halbkreisförmiger Magnet M , der auf die vertikale Krümmung der Glasglocke paßte, diente dazu, um den aufgehängten Magneten m_2 zu richten und so die Nulllage der Drehwaage festzulegen. Wurde M um 180° gedreht, so konnten die Rückseiten der Flügel dem Lichte zugekehrt werden.

Die Versuchsanordnung.

Einen durch die Achse des Lichtstrahles gelegten Horizontalschnitt der Apparate gibt Fig. 3. Als Lichtquelle diente das weißglühende Ende der horizontal gelagerten Kohle S_1 einer Wechselstrom-Bogenlampe nach A. T. Thompson, deren Kohlen rechtwinklig zueinander standen. Als Schirm gegen die Linsen L_1 und L_2 diente das Asbestdiaphragma d_2 . Eine

Fig. 3.

nicht gezeichnete Linse entwarf ein vergrößertes Bild von Kohle und Bogen auf einer in der Nähe stehenden Wand, so daß die Lage von Kohlen und Lichtbogen von beiden Beobachtern jederzeit kontrolliert werden konnte. Der Strahlenkegel passierte das enge Diaphragma d_2 und fiel auf die Kondensorlinsen L_1 und L_2 . Bei d_3 war eine Blende von 11,25 mm Durchmesser eingeschaltet, die nur dem zentralen Teil des Strahlenbündels den Durchgang gestattete. Hinter d_3 passierten die Strahlen einen Verschuß S_2 . Dieser Verschuß wurde elektromagnetisch durch den Sekundenkontakt

einer Normaluhr ausgelöst. Der Beobachter bei T_1 konnte sich wohl die Sekunde zum Öffnen oder Schließen des Verschlusses wählen, aber eine Bewegung desselben fand nur im Moment eines Sekundenkontaktes statt, so daß jede Exposition eine Anzahl von ganzen Sekunden dauerte. Der geöffnete Verschuß ließ nur den direkten Lichtstrahl, der d_3 passiert hatte, hindurch, nicht aber zerstreutes Licht. Dicht hinter dem Verschuß war an dem Diaphragma d_5 eine gegen 45° geneigte Glasplatte angebracht, die einen Teil des Strahlenbündels auf Linse L_5 reflektierte. Diese Linse entwarf auf einem Zweig des Bolometers R ein Bild von der Blende d_3 . Linse L_3 erzeugte innerhalb der Glasglocke in der Ebene der Drehwagenflügel ein scharfes Bild von der Öffnung d_3 . Die Glasglocke war mit drei Spiegelglasfenstern W_1 , W_2 und W_3 versehen. Die ersten beiden bestanden in einer runden Öffnung von 42 mm Durchmesser, durch das dritte wurden die Ausschläge der Drehwage mit Fernrohr und Skala abgelesen. Die Linse L_3 war derart angebracht, daß sie zwischen den beiden Hemmungen S_3 und S_4 in horizontaler Richtung verschoben werden konnte. S_3 und S_4 waren so justiert, daß, wenn die Linse bei S_3 war, das scharfe Bild der Blende d_3 zentral auf den einen Flügel, und wenn bei S_4 , zentral auf den anderen Flügel fiel. Diese sehr wichtige Justierung war mit Hilfe des Fernrohres T_2 , das auf dem Schlitten einer Teilmaschine befestigt war, ausgeführt worden, indem die Lage der Rotationsachse und der Bilder von d_3 beobachtet und gemessen worden war, wenn die Linse bei S_3 und bei S_4 stand. Hierbei konnten die Flügel aus dem Wege gerückt werden, wenn man vermittelst des Richtmagneten M (Fig. 2) die Aufhängung um 90° drehte.

Um sich zu versichern, daß die Drehwage vollkommen von jeder magnetischen Beeinflussung frei sei, wurde der kleine Magnet m_2 festgeklemt, um eine konstante Ruhelage zu erhalten. Sodann wurde die Schwingungsdauer genau bestimmt, einmal, wenn die Achse des großen Magneten in der Vertikalebene der Flügel, das andere Mal, wenn sie rechtwinklig dazu stand. Verschiedene Serien ergaben für beide Magnetlagen einen Unterschied in der Schwingungsdauer von weniger als 0,1 Proz.

Das Bolometer R (Fig. 3) war aus 0,001 mm dickem, in Silber ausgewalztem Platinblech hergestellt worden. Es wurde ein Streifen, wie ihn Fig. 4 zeigt, ausgeschnitten und auf eine dünne Schieferplatte S aufgezogen. Die Schieferplatte hatte unter dem Streifen bei A, B, C, D zwei Fenster, an welchen Stellen sich nach Entfernung des Silbers nur das

Fig. 4.

dünne Platinblech befand. Seine Oberfläche war nach Kurlbaums¹⁾ Methode geschwärzt. Das von L_b (Fig. 3) erzeugte Bild fiel auf die Stelle D . Ein dicker Draht EF verband die Enden zwischen A und C und ein Gleitkontakt c erlaubte etwaige Unsymmetrie der vier in der Figur sichtbaren Brückenarme auszugleichen.

2. Beobachtungsmethoden.

Die Beobachtungen, die zu den später angeführten Resultaten führten, zerfielen in drei Gruppen: 1. das Eichn der Drehwage, 2. die Messung des Strahlungsdruckes mit Hilfe der Drehwagenkonstante und 3. die Messung der Energie des Lichtstrahles in Erg/Sek. Letzteres wurde durch Beobachtung der Temperaturerhöhung eines geschwärzten Silberkörpers von bekannten Dimensionen und bekannter spezifischer Wärme ausgeführt.

1. Die Bestimmung der Drehwagenkonstante geschah dadurch, daß man nach Entfernung der Flügel C und D die Schwingungsdauer ihrer Aufhängevorrichtung genau maß. Das Trägheitsmoment war aus den Massen und dem Abstand der

1) F. Kurlbaum, Wied. Ann. 67. p. 846. 1899.

einzelnen Teile von der Drehachse leicht zu berechnen. Das Drehmoment des Fadens für 1 mm Ausschlag bei 105 cm Skalenabstand ergab sich zu $0,363 \cdot 10^{-5}$. Dieser Wert, geteilt durch die halbe Entfernung zwischen den beiden Zentren der Lichtpunkte auf den Flügeln, gibt die Kraft in Dynen pro Skalenteil Ausschlag. Da die Lichtpunkte Kreise von 11,25 mm Durchmesser waren, so betrug die Bildfläche beinahe einen Quadratzentimeter, und obiges Verfahren ergab somit angenähert den Druck in Dynen pro Quadratzentimeter.

2. Bei den Messungen des Lichtdruckes war es bequemer, die Intensität des Lichtstrahles bei jeder Exposition auf eine Einheit zu beziehen, die konstant gehalten werden konnte, als zu versuchen, die Bogenlampe auf konstanter Lichtstärke zu halten, wie es anderenfalls nötig gewesen wäre. Zu diesem Zwecke diente das Bolometer *R* (Fig. 3). Es wurde zu gleicher Zeit die relative Intensität des reflektierten Strahles durch den Ausschlag des Galvanometers G_2 und der Druck des durchgegangenen Strahles durch den Ausschlag der Drehwage gemessen. Jeder Ausschlag der Drehwage wurde dann auf einen solchen reduziert, der einem Galvanometerausschlag von 100 Skt. entsprach. Die Galvanometerempfindlichkeit wurde sorgfältig vor und nach jeder abendlichen Untersuchungsreihe festgestellt. Jeder beobachtete Druck wurde also auf einen solchen umgerechnet, der von einem Lichtstrahl von bestimmter Intensität herrührte (im folgenden Normalstrahlung genannt: Ausschlag von $G_2 = 100$ bei einer Empfindlichkeit = 1000).

Bei jeder Serie von Druckmessungen wurden zwei Sätze von Beobachtungen gemacht. Einmal wurden die statischen Bedingungen untersucht, das andere Mal die von kurzen Expositionen herrührenden Ausschläge der Drehwage beobachtet. Bei den statischen Beobachtungen wurde jeder Spiegel den Lichtstrahlen so lange exponiert, bis aus den Umkehrpunkten der Schwingungen zu erkennen war, daß sich ein stationärer Zustand eingestellt hatte. Hierbei war also das Drehmoment, das von dem Strahlungsdruck und der Luftereinwirkung herrührt, gleich dem Produkte aus Drehwagenkonstante und Ablenkungswinkel. Alsdann wurde die Torsionsvorrichtung mit Hilfe des äußeren Magneten um 180° gedreht und ähnliche Beobachtungen an der Rückseite der Spiegel gemacht. Alle Um-

kehrpunkte der Schwingungen wurden bei diesen Beobachtungen aufnotiert und so konnte die Resultante der kombinierten Kräfte von Strahlung und Lufteinwirkung zur Zeit eines jeden Umkehrpunktes berechnet werden. Da jeder Wert auf den zur selben Zeit abgelesenen und auf Normalempfindlichkeit reduzierten Ausschlag des Galvanometers G_2 umgerechnet wurde, so waren alle Werte auf die normale Lichtintensität bezogen. Die Resultate, die auf diesem Wege erhalten wurden, zeigen zusammen mit den ballistischen Messungen Richtung und Größe der Lufteinwirkung, sowie ihre Veränderung mit der Expositionsdauer.

Die Gründe, die Flügel umzudrehen, sind folgende: Der von der Bogenlampe kommende Lichtstrahl passiert, ehe er die Drehwage erreicht, drei dicke Glaslinsen und zwei Glasplatten. Alle Wellenlängen, die von Glas absorbiert werden, werden aus dem Strahl ausgeschieden, ehe er den Flügelapparat erreicht. Von den Silberseiten der Flügel wird also mehr absorbiert als von den Glasseiten. Der Strahlungsdruck war immer von der Lichtquelle weggerichtet, einerlei wie die Spiegel gedreht wurden, während sich die Wirkung der Luft hauptsächlich an der Silberseite der Flügel äußerte.

Als beim Abschluß der Druck- und Energiemessungen das Reflexionsvermögen der Silberseiten der Flügel mit dem der Glasseiten verglichen wurde, fand sich, daß die Reflexion an der Silberseite viel größer war als an der versilberten Glasseite. Dies Resultat erschien um so überraschender, als durch Messung gefunden war, daß die Absorption der unversilberten Flügel einflußlos klein sei.¹⁾ Dieser unerwartete Unterschied in dem Reflexionsvermögen der beiden Flügelseiten machte die Elimination der Luftstörungen (nach der beschriebenen Methode) weniger vollkommen als wir damals erwartet hatten. Wählt man aber einen Luftdruck, bei dem die Einwirkung der Luft auch bei langer Exposition klein ist, so kann man den gesamten Lufteffekt für die Zeit einer ballistischen Exposition so herabsetzen, daß er in jedem Falle nur geringen Einfluß hat.

1) Lord Rayleigh berichtet über einen ähnlichen Unterschied zwischen der Reflexion Luft-Silber und Glas-Silber. *Scientific Papers*, Cambridge 2. p. 538—539. 1900.

Wenn man die beiden Flügel abwechselnd exponiert, die Aufhängung umdreht und den Mittelwert bildet, so kann man fast alle Fehler eliminieren, die von einer Unsymmetrie der Drehwaage oder von einer zur Rotationsachse unsymmetrischen Lage der Lichtbilder, sowie von ungleichmäßiger Verteilung der Lichtintensität herkommen.

Der mit Expositionsdauer und Luftdruck wechselnde Charakter der Lufteinwirkung ist in acht Serien von statischen Beobachtungen zum Ausdruck gebracht, wobei die Glasseiten beider Flügel exponiert worden waren.¹⁾ Die von den beiden Flügeln erhaltenen Mittelwerte wurden als Kurven in Fig. 5 aufgetragen, wo der statische Ausschlag, der von der kombinierten Wirkung des Lichtdruckes und der Luftstörungen herrührt, als Ordinate und die Expositionsdauer in Sekunden als Abszisse aufgetragen ist.²⁾ Die horizontale Linie in den Kurven gibt den Mittelwert des Strahlungsdruckes an, wie er aus Tab. II berechnet wurde. Abnahme des Ausschlages mit der Zeit zeigt eine abstoßende Wirkung der Luft an der erwärmten Silberfläche und zunehmender Ausschlag eine saugende Wirkung. Aus den Kurven ersieht man, daß bei Luftdrucken von 66 mm bis 19,8 mm die Luft eine abstoßende Wirkung ausübt, die zwischen 19,8 und 11,2 mm in eine saugende übergeht. Bei den beiden letztgenannten Drucken ist die gesamte Lufteinwirkung gering. Für niedere Drucke bis zu 0,05 mm wächst die Saugwirkung, bei einem Druck von 0,02 mm besteht wieder kräftige Abstoßung. Die Kurven zeigen also die Gegenwart von zwei Luftdrucken, bei welchen die Lufteinwirkung in unserer Versuchsanordnung Null sein sollte, der eine Druck liegt zwischen 19,8 und 11,2 mm, der andere zwischen 0,05 und 0,02 mm.³⁾ Das erste Gebiet wurde bei

1) Es wurden auch Beobachtungen an den Silberseiten gemacht, aber hier war die Lufteinwirkung immer kleiner als an den Glasseiten, so daß wir den ungünstigeren Fall vor uns haben.

2) Die Ordinaten sind keine Drucke, sondern Drehmomente.

3) Bei seiner Untersuchung über Radiometer fand Crookes gewisse Luftdrucke, bei welchen sich die Einwirkung der Luft und die Druckkraft der Strahlung das Gleichgewicht hielten, aber da er keinen Unterschied zwischen Strahlungs- und Luftwirkungen macht, so sind seine Überlegungen etwas unklar. Vgl. Phil. Trans. 165. p. 519. 1875.

den weiteren ballistischen Messungen benutzt und fast alle Beobachtungen bei einem Luftdruck von 16 mm angestellt.

Fig. 5.

Die Lufteinwirkung wird erheblich durch eine geringe Neigung der Flügelebene zu der Vertikalen beeinflusst, ebenso auch durch einen Gegenstand, der unter die Glasglocke in der Nähe der Flügel gebracht wird. Z. B. wurde eine beträchtliche Störung beobachtet, als ein kleines Gefäß mit Phosphorpentoxyd unter die Glasglocke gestellt worden war, obgleich sich die nächste Stelle der Gefäßwand mindestens 3 cm vor den Flügeln befand.

Während der Beobachtungen wurden die polierten Silberschichten der Flügel rasch zerstört, frische Schichten hielten selten länger als für zwei abendliche Untersuchungen. Da die Drehwaage herausgenommen, die Flügel abgehängt, versilbert, poliert und wieder eingesetzt werden mußten, so war es schwierig, genau dieselben Bedingungen für die Lufteinwirkung wieder herzustellen, obgleich die Flügel sehr sorgfältig vertikal gehängt wurden.

Die fernere Eliminierung der Lufteinwirkung mußte dadurch geschehen, daß man die Exposition so abkürzte, daß die Luftwirkungen nur einen kleinen Bruchteil ihres stationären Wertes erreichen konnten. Das führte zur Methode der *ballistischen* Beobachtungen.

3. Ballistische Messungen.

Will man an Stelle der statischen Ausschläge ballistische benutzen, so muß es immer möglich sein, das statische Äquivalent der ballistischen Schwingungen auszurechnen. Ferner müssen die Expositionen so kurz als möglich gemacht werden, ohne jedoch die Amplituden unter einen gut meßbaren Wert zu bringen.

Wenn die Exposition eine halbe Schwingungsperiode dauert, so ist, falls die Lufteinwirkung gering und die Dämpfung Null ist, der Ausschlag gleich 2Θ , wo Θ der Winkel ist, unter welchem die Fadentorsion dem vom Strahlungsdruck ausgeübten Drehmoment das Gleichgewicht hält. Beträgt die Expositionsdauer $\frac{1}{4}$ der Schwingungsdauer, so ist der Ablenkungswinkel gleich $\Theta\sqrt{2}$. Der Ausschlag wird somit um 30 Proz. verkleinert, die Luftstörungen aber um noch mehr. Es wurde deshalb eine Expositionsdauer von 6 Sek. = $\frac{1}{4}$ der Schwingungs-

dauer gewählt. Vernachlässigen wir die Luftwirkungen, so lautet die Bewegungsgleichung¹⁾ für die Drehwagenschwingung:

$$\kappa \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} + 2 \varepsilon \frac{\partial \Theta}{\partial t} = - G \Theta + L,$$

wobei κ das Trägheitsmoment der Drehwage, ε die Dämpfungskonstante, G das Torsionsmoment des Fadens für $\Theta=1$ (Bogenmaß) und L das Drehmoment des Strahlungsdruckes ist.

Die Lösung dieser Gleichung ist

$$(1) \quad \left\{ \begin{aligned} \Theta &= \frac{L}{G} \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon}{\kappa} t} \cos \sqrt{\frac{G}{\kappa} - \frac{\varepsilon^2}{\kappa^2}} \cdot t \right) \\ &= \frac{L}{G} \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon}{\kappa} t} \cos 2\pi \frac{t}{T} \right). \end{aligned} \right.$$

Die Integrationskonstanten wurden aus der Beziehung bestimmt, daß $\Theta = \partial \Theta / \partial t = 0$, wenn $t = 0$.

Für $t = T/4$ ist

$$(2) \quad \left\{ \begin{aligned} &\Theta = \frac{L}{G} \\ \text{und} \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} &= \frac{L}{G} \left(\frac{\varepsilon}{\kappa} e^{-\frac{\varepsilon}{\kappa} t} \cos 2\pi \frac{t}{T} + e^{-\frac{\varepsilon}{\kappa} t} \frac{2\pi}{T} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right). \end{aligned} \right.$$

Hört die Lichteinwirkung auf für $t = T/4$, so geht die Bewegungsgleichung über in:

$$(3) \quad \kappa \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} + 2 \varepsilon \frac{\partial \Theta}{\partial t} = - G \Theta,$$

deren Lösung ist

$$\Theta = A e^{-\frac{\varepsilon}{\kappa} t} \cos \left(2\pi \frac{t}{T} + \alpha \right),$$

wo A und α nach den bei Gleichung (2) gemachten Voraussetzungen bestimmt werden können. Vernachlässigen wir sehr kleine Größen, so ist der Wert der Amplitude A ausgedrückt durch die Gleichung

$$(4) \quad A = \frac{L}{G} \left(1 + r + \frac{2}{\pi} r^{1/2} \log \left(\frac{1}{r} \right) \right)^{1/2},$$

1) Wir sind berechtigt, diese Gleichung anzuwenden, die ein der Geschwindigkeit proportionales Dämpfungsglied enthält, weil experimentell gefunden wurde, daß das Amplitudenverhältnis aufeinanderfolgender Schwingungen konstant war, wenn keine Energie auf die Flügel fiel.

wo r das Verhältnis der aufeinanderfolgenden Amplituden bei gedämpften Schwingungen ist. Für $r=1$, also für ungedämpfte Schwingungen, ist $A=(L/G)\sqrt{2}$. Für den bei den Versuchen benutzten Luftdruck (16 mm Quecksilber, welcher Wert aus den Kurven [Fig. 5] gewählt wurde), war gefunden worden: $r=0,783$, folglich

$$(5) \quad A = 1,357 \frac{L}{G}.$$

Hieraus folgt, daß der ganze Ablenkungswinkel der Drehwaage bei ballistischen Messungen gleich dem 1,357fachen des Winkels ist, unter welchem die Torsionskraft des Fadens dem Drehmoment des Strahlungsdruckes das Gleichgewicht hält.

Die Expositionsdauer betrug immer 6 Sek. ohne schätzbaren Fehler, aber die Schwingungsdauer der Drehwaage (24 Sek.) differierte wegen geringfügiger, zufälliger Veränderungen an dem Gegengewicht m_g (Fig. 2) manchmal um 1 Proz. Es ist deshalb notwendig, den durch diese Veränderung der Periode verursachten Fehler des Ausschlages zu berechnen. Dies geschieht, wenn man in Gleichung (2) $t = T/4 + \delta$ setzt und die neuen Bedingungen in Gleichung (3) einführt. Es ist jedoch einfacher und hinreichend genau, die Bewegung als ungedämpft zu betrachten. Unter dieser Voraussetzung ist die Amplitude

$$A = \frac{L}{G} \left(2 + 2 \sin 2\pi \frac{\delta}{T} \right)^{1/2} = \sqrt{2} \frac{L}{G} \left(1 + \pi \frac{\delta}{T} \right) \text{ (angenähert).}$$

Für $T=23,75$ Sek. ist $T/4=5,94$ und $\delta=0,06$, folglich $A=\sqrt{2}(L/G) \cdot 1,008$. Wenn $\delta=0$, ist $A=\sqrt{2}(L/G)$, somit verursacht ein Fehler von 1 Proz. bei T einen solchen von 0,8 Proz. bei A .

Um sich zu überzeugen, daß der beobachtete Strahlungsdruck nur von der Intensität des Lichtstrahles abhängt und nicht von der Wellenlänge der auftreffenden Energie beeinflußt wird, wurden die ballistischen Beobachtungen des Druckes, die kalorimetrischen Messungen der Lichtenergie und die Bestimmung der Reflexionskoeffizienten bei drei ganz verschiedenen Wellengruppen ausgeführt. Bei den mit „Luft“ bezeichneten Messungen befand sich außer den erwähnten Linsen und den Glasplatten kein absorbierendes Medium in dem Strahlengang zwischen Bogenlampe und Drehwaage. Bei den mit „rotes

Glas“ oder „Wasserschicht“ bezeichneten Beobachtungen war zwischen L_2 und d_3 ein Rubinglas oder ein Glastrog mit einer 9 mm dicken Schicht destillierten Wassers in den Strahlengang gestellt.

Die eigentlichen Beobachtungen beginnen mit ballistischen Messungen des Strahlungsdruckes vermittelt der Drehwage. Ihre Behandlung zeigt Tab. II, die eine direkte Abschrift des Laboratoriumsjournals ist und eine durchschnittliche ballistische Serie darstellt. Die Bezeichnungen O.F. C_s , W.F. D_s , O.F. D_g und W.F. C_g geben an, ob der Flügel C oder D sich auf der

Tabelle II.

Lichtdruck. Ballistische Messungen. „Luft“.

28. August.

Flügel- stellung	Null- punkt	Umkehr- punkt	Aus- schlag	Bogen- lampe	Ausschlag reduziert	
					O.F.	W.F.
O.F. C_s	281,4	248,5	32,9 mm	164,3	20,0 mm	
W.F. D_s	281,5	313,9	32,4	164,5		19,7 mm
O.F. C_s	281,4	249,8	31,6	157,9	20,0	
W.F. D_s	281,5	310,5	29,0	147,0		19,8
O.F. C_s	281,5	252,6	28,9	144,8	20,0	
W.F. D_s	281,5	309,6	28,1	141,8		19,8
O.F. C_s	281,5	252,9	28,6	143,5	19,9	
W.F. D_s	281,5	309,3	27,8	140,4		19,8
Mittel:					19,97 mm	19,77 mm
Mittel:					$\frac{C_s + D_s}{2} = 19,87 \text{ mm}$	

Magnete umgedreht.

O.F. D_g	280,1	246,0	34,1 mm	180,4	18,92 mm	
W.F. C_g	280,0	317,8	37,8	187,3		20,20 mm
O.F. D_g	279,8	247,2	32,6	170,8	19,20	
W.F. C_g	279,4	313,7	34,3	169,4		20,25
O.F. D_g	279,1	248,9	30,2	161,1	18,80	
W.F. C_g	279,0	311,9	32,9	161,6		20,35
O.F. D_g	279,0	249,0	30,0	158,9	18,90	
W.F. C_g	278,9	311,2	33,2	164,4		20,20
Mittel:					18,97 mm	20,25 mm

Mittel: $\frac{C_g + D_g}{2} = 19,61 \text{ mm.}$

Ost- oder Westseite der Drehachse befand und ob seine Silber- oder Gasfläche dem Lichte zugekehrt war. Die zweite Kolumne der Tabelle gibt die Ruhelage der Drehwage an, ehe der Verschluß geöffnet wurde, die dritte den Umkehrpunkt einer Schwingung, die von einer 6 Sek. langen Belichtung hervorgebracht worden war, die vierte den Ausschlag der Drehwage, die fünfte den ballistischen Ausschlag des Lampengalvanometers G_2 . Kolumne 6 und 7 geben den auf normale Lichtstärke reduzierten Ausschlag.

Die Resultate von allen ballistischen Druckmessungen für „Luft“ sind in Tab. III zusammengestellt. In Kolumne 4 und 5 sind zwei Werte für die Konstante des Lampengalvanometers G_2 gegeben. Wenn man den Magnet auf der Glasglocke drehte, um die Aufhängung im Innern umzudrehen, so wurde dadurch die Galvanometerkonstante etwas beeinflußt, so daß ihr Wert für Silber und Glasseiten der Flügel nicht der gleiche war. Die Indizes zeigen, zu welcher Serie die betreffende Konstante gehört. Die Werte für den Hebelarm l in der sechsten Kolumne wurden erhalten, indem man die Entfernung zwischen den Bildzentren auf den Flügel (mit der Teilmaschine T_2 , Fig. 3) maß und durch 2 dividierte. Die Kolumnen, mit

$$\frac{C_s + D_s}{2} = P_s \quad \text{und} \quad \frac{C_g + D_g}{2} = P_g$$

bezeichnet, sind die durchschnittlichen Werte der Drehmomente, die der Lichtdruck auf die Silber- und auf die Glasseite der Flügel ausübte. Die nächsten beiden Kolumnen enthalten die für eine Schwingungsdauer der Drehwage von 24 Sek. korrigierten Werte. In den mit

$$\frac{P_s \cdot G_s}{l} \quad \text{und} \quad \frac{P_g \cdot G_g}{l}$$

bezeichneten Kolumnen stehen die auf die Normalempfindlichkeit von $G_2 = 1000$ reduzierten Kräfte. Die letzte Kolumne enthält den Durchschnittswert der beiden vorhergehenden.

Tab. IV enthält die entsprechenden Daten für „rotes Glas“ und „Wasserschicht“. Luftdruck, Schwingungsdauer, Hebelarm und Galvanometerkonstante sind die gleichen wie in Tab. III.

Tabelle III.
Strahlungsdruck. Ballistische Messungen. „Luft“.

Datum	Luft- druck in mm Hg	Schwin- gungs- dauer T	Galvanometer- empfindlichkeit G_s (Silber) G_g (Glas)	l Hebel- arm in cm	$\frac{C_s + D_s}{2} = P_s$	$\frac{C_g + D_g}{2} = P_g$	P_s korr. für $T = 24''$	P_g korr. für $T = 24''$	$\frac{P_s \times G_s}{l}$	$\frac{P_g \times G_g}{l}$	Mittel
19. Juni	32,5	23,75	784	0,814	Mittel = 18,88	18,88	18,73	18,73	16,89	16,89	16,89
20. "	32,5	23,75	756	0,814	19,67	16,94	19,51	16,81	18,12	15,86	17,00
23. "	37,0	23,75	700	0,814	—	—	—	—	—	—	—
23. Juli	16,0	23,75	682	0,831	21,16	20,42	21,00	20,26	17,25	17,25	17,25
25. "	16,6	23,75	684	0,815	—	—	—	—	—	—	—
26. "	16,6	23,75	720	0,815	19,34	19,98	19,18	19,82	16,93	17,28	17,10
27. Aug.	16,8	23,82	724	0,823	20,16	19,40	20,00	19,25	17,60	16,61	17,10
28. "	15,7	23,82	721	0,824	19,87	19,61	19,73	19,48	17,26	16,97	17,10
29. "	13,7	23,82	712	0,824	19,68	20,07	19,53	19,92	16,90	16,97	16,94
31. "	14,0	24,00	718	0,810	18,55	18,94	18,55	18,94	16,44	16,60	16,52
1. Sept.	16,6	24,00	692	0,808	19,14	20,17	19,14	20,17	16,40	16,78	16,59
20. "	16,4	23,78	670	0,812	20,96	20,02	20,81	19,87	17,17	16,54	16,86
23. "	16,4	23,78	666	0,816	21,32	20,27	21,16	20,12	17,27	16,87	17,07
24. "	16,2	23,78	667	0,816	20,76	19,80	20,60	19,65	16,84	16,11	16,47
							Mittel:	Mittel:	17,11	16,71	$\pm 0,053$

Tabelle IV.
Strahlungsdruck. Ballistische Messungen.

Datum	„Wasserschicht“						„Rotes Glas“					
	$\frac{C_s + D_s}{2}$	$\frac{C_v + D_v}{2}$	P_s korr. für $T = 24''$	$\frac{P_s \times G_s}{l}$	$\frac{P_v \times G_v}{l}$	P Mittel	$\frac{C_s + D_s}{2}$	$\frac{C_v + D_v}{2}$	P_s korr. für $T = 24''$	$\frac{P_s \times G_s}{l}$	$\frac{P_v \times G_v}{l}$	P Mittel
20. Juni	18,82	17,10	18,46	16,96	17,14	16,57	—	—	—	—	—	—
23. „	—	—	—	—	—	—	19,99	18,40	19,83	17,05	16,06	16,56
23. Juli	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25. „	19,00	20,10	18,85	19,94	15,82	16,28	20,70	20,94	20,54	20,77	17,24	17,33
26. „	18,03	19,39	17,89	19,33	15,80	16,32	—	—	—	—	—	—
27. Aug.	18,63	18,66	18,50	18,53	16,29	16,14	19,97	19,25	19,82	19,10	17,46	16,96
28. „	—	—	—	—	—	—	19,99	19,42	19,84	19,28	17,36	17,05
29. „	—	—	—	—	—	—	19,99	19,92	19,84	19,77	17,14	16,98
31. „	18,25	19,02	18,10	18,87	15,68	15,87	18,98	19,14	18,98	19,14	16,82	16,83
20. Sept.	20,39	19,14	20,23	19,00	16,69	16,25	21,00	19,97	20,83	17,19	16,50	16,84
23. „	20,21	19,51	20,05	19,36	16,37	16,30	21,48	20,34	21,31	20,18	17,39	17,15
24. „	19,84	18,91	19,69	18,77	16,10	15,70	21,00	19,68	20,83	19,53	17,03	16,53
				Mittel:	16,24	16,15			Mittel:	17,18	16,65	16,91
						$\pm 0,066$						$\pm 0,057$

Bei diesen ballistischen Messungen wurde die Lichtintensität durch den Impuls gemessen, der von einer 6 Sek. langen Belichtung des Bolometers herrührte, bei den Energiemessungen geschah dies durch einen statischen Ausschlag, der von einer längeren Exposition hervorgebracht wurde. Um die Druckwerte mit den Energiewerten vergleichen zu können, war es nötig, das Mittel der Beträge in der letzten Kolumne durch Multiplikation mit $0,363 \cdot 10^{-5}$, dem Torsionskoeffizienten des Quarzfadens, zu Drucken in Dynen umzurechnen und es nicht allein auf einen statischen Ausschlag der Drehwage, sondern auch auf einen solchen des Lampengalvanometers G_2 zu reduzieren. Das Verhältnis eines ballistischen Ausschlages des Galvanometers G_2 zu einem statischen wurde durch eine lange Reihe von Belichtungen mit der Bogenlampe ermittelt. Es betrug bei „Luft“ 1,55, bei „rotem Gas“ 1,535, und bei „Wasserschicht“ 1,502. Diese Verschiedenheiten rühren wahrscheinlich nicht allein von der Dämpfungskonstante des Galvanometers her, sondern von der besonderen Art, wie das Bolometer durch den Lichtstrahl zu seinem stationären Zustand erwärmt wurde. Wenden wir diese Reduktionsfaktoren auf die Mittelwerte in Tab. III und IV an, so erhalten wir folgende Resultate:

Der Druck des Normallichtstrahles betrug für

a) „Luft“:

$$16,91 \cdot \frac{1,55}{1,357} \cdot 0,363 \cdot 10^{-5} = (7,01 \pm 0,023) \cdot 10^{-5} \text{ Dynen.}$$

b) „Rotes Glas“:

$$16,91 \cdot \frac{1,535}{1,357} \cdot 0,363 \cdot 10^{-5} = (6,94 \pm 0,024) \cdot 10^{-5} \text{ Dynen.}$$

c) „Wasserschicht“:

$$16,20 \cdot \frac{1,502}{1,357} \cdot 0,363 \cdot 10^{-5} = (6,52 \pm 0,028) \cdot 10^{-5} \text{ Dynen.}$$

II. Energie der Strahlung.

Die bei den „vorläufigen Versuchen“ zur Energiemessung benutzte Methode (p. 227) wurde verworfen, da die Angaben des Bolometers auch nach einigen angebrachten Konstruktionsverbesserungen für die vorliegende Arbeit nicht genau genug waren. Wir wandten deshalb folgendes Verfahren an:

Wir ließen den Lichtstrahl auf die geschwärzte Oberfläche eines Silberscheibchens fallen und beobachteten dessen Temperaturzunahme pro Sekunde, wenn es dieselbe Temperatur wie seine Umgebung hatte. Dieses Silberscheibchen hatte 13,6 mm Durchmesser, 3,58 mm Höhe und wog 4,80 g; es war von Tiffany & Co. geliefert worden und

Fig. 6.

bestand nach deren Angabe aus 99,8 Proz. reinem Silber. In parallelen Durchmessern wurden durch das Scheibchen zwei Löcher gebohrt, die um $\frac{1}{4}$ der Scheibendicke von jeder Kreisfläche entfernt waren. Zwei Eisen-Konstantanthermoelemente, die durch Verlöten zweier 0,1 mm dicken Drähten hergestellt waren, wurden durch die Löcher des Scheibchens gezogen. Um diese Drähte von dem Scheibchen zu isolieren, waren feine Glasröhrchen über sie gezogen und in die Löcher

eingeführt, so daß sie knapp als 2 mm Draht an jeder Seite der Lötstelle frei ließen. Die Drähte waren in den Glasröhrchen und diese in dem Scheibchen mit Schellack festgekittet; die Röhrchen ragten ca. 15 mm aus dem Scheibchen heraus und waren in einer zu den Kreisflächen parallelen Ebene aufwärts gebogen. Die allgemeine Anordnung zeigt Fig. 6. Das Scheibchen war an den vier Drähten in einiger Entfernung unterhalb einer flachen Holzschachtel aufgehängt. Auf der Schachtel stand ein mit Watte umwickeltes Kalorimetergefäß, das mit Petroleum gefüllt war. Hierein tauchten die Enden der Thermoelemente, die auf konstanter Temperatur gehalten werden sollten. An ihren Enden waren Kupferdrähte angelötet, die mit 500 Ω Galvanometerwiderstand und 1000 Ω Ballastwiderstand den Stromkreis bildeten.

Die Thermoelemente in dem Scheibchen waren hintereinander geschaltet und da jede Lötstelle mitten zwischen der Mittelebene und der einen Fläche lag, durfte angenommen werden, daß, wenn sich das Scheibchen infolge der Bestrahlung einer Fläche langsam erwärmte, die elektromotorische Kraft der mittleren Temperatur des Scheibchens entsprach. Eine Kreisfläche des Scheibchens wurde geschwärzt, indem man mittels eines Zerstäubungsapparates eine Mischung von Lampenruß und Alkohol, in dem eine Spur Schellack aufgelöst war, auftrug. Diese Methode ist von G. E. Hale angegeben und gibt eine sehr feine und gleichmäßige tiefschwarze Schicht, die ebensogut ist, wie ein Rußniederschlag aus Rauch.

Bei den Energiemessungen wurde die Glasglocke und die Drehwage von der Platte *P* (Fig. 2) entfernt und ein doppelwandiges Kupfergefäß *AB* (Fig. 6), das als Wassermantel diente und einen kleinen Luftraum *C* umschloß, auf denselben Platz gestellt. Eine Röhre von 2 cm Weite war in die Vorderseite des Gefäßes eingelötet, um den Lichtstrahl in den Raum *C* einzulassen. Ihre Öffnung war mit einer Spiegelglasplatte von derselben Beschaffenheit wie die größeren Fenster an der Glasglocke bedeckt.

Das Nadelsystem im Galvanometer G_1 , ein du Bois-Rubens-Instrument mit einem Magnetgehänge von 0,09 g, war in einem starken Magnetfelde aufgehängt, so daß die Schwingungsdauer gegen 4 Sek. betrug. Das System besaß

eine starke Luftdämpfung in Gestalt eines Glimmerflügels von großer Oberfläche.

Die Thermoelemente und das Galvanometer reagierten rasch auf die Bestrahlung, was daraus zu erkennen war, daß sich die Bewegung des Magnetsystems 1,2 Sek. nach Abschluß des Lichtes umkehrte, wenn sich die Temperatur des Scheibchens etwas über der des Raumes befand.

Das Silberscheibchen wurde auf folgende Art für Temperaturangaben geeicht. Es wurde in ein Petroleumbad eingetaucht und der Galvanometerausschlag für zwei verschiedene Temperaturen abgelesen. Die eine Temperatur lag ca. 18° über der relativ konstanten Temperatur des Raumes *C* oder des Kalorimeters, und die andere etwa dieselbe Zahl von Graden darunter. Diese beiden Temperaturen wurden durch ein Fuessssches Normalthermometer gemessen, das in $\frac{1}{10}$ Grade geteilt und in der Reichsanstalt geeicht war. Zwei von obigen Eichungssätzen wurden unabhängig voneinander ausgeführt. Eine dieser Serien ist vollständig in Tab. V enthalten. Die ersten drei Kolumnen geben den Nullpunkt, den direkten und den kommutierten Ausschlag des Galvanometers, die vierte gibt die Temperatur des Bades, in das der Körper eingetaucht wurde, und die fünfte die des Kalorimeters von konstanter Temperatur. Die sechste Kolumne enthält die Ausschläge von G_1 , die siebente die Mittelwerte je zweier Ausschläge nach der gleichen Seite, die achte das Mittel aus beiden vorhergehenden. Die letzte Kolumne gibt die Differenz zwischen den Temperaturen der beiden Kalorimeter in Celsiusgraden an. Für das ganze Temperaturintervall in der Tabelle, $39,11^{\circ}$, betrug der Ausschlag von G_1 394 Skt. bei einer Empfindlichkeit von $G_1 = 996$. Einem Intervall von 1° entsprach also ein Ausschlag von 10,03 Skt. für eine Empfindlichkeit $G_1 = 1000$. Das Mittel aus den beiden getrennten Kalibrierungen ergab 9,96 Skt. für 1° Temperaturunterschied.

Vor Beginn einer Serie von Energiemessungen wurde das Scheibchen in einem Luftraum, der Phosphorpentoxyd enthielt und durch Eis und Salz abgekühlt wurde, aufgehängt. Wenn hier das Scheibchen eine Temperatur von ungefähr Null Grad erreicht hatte, wurde es rasch in den Raum *C* (Fig. 6) gebracht und der Lichtstrahl darauf gerichtet. Hatte sich dann

Tabelle V.
Eichung des Silberscheibchens.

Kältebad								Wärmebad							
Ablesung von G_1								Ablesung von G_1							
Komm. punkt	Null-Direkt	Scheibchen T_1^0	Kal. T_2^0	Ausschlag von G_1	Mittel der abwechselnden Ausschläge	G_1 Mittel	$T_2^0 - T_1^0$	Komm. punkt	Null-Direkt	Scheibchen T_1^0	Kal. T_2^0	Ausschlag von G_1	Mittel der abwechselnden Ausschläge	G_1 Mittel	$T_2^0 - T_1^0$
402,0	221,2 221,0 220,9 221,0 221,2	35,2 —	1,58° 20,05° 20,07°	185,8 181,0 185,5	— 185,7 181,3	— 183,4 183,4	— 18,47° —	2,0	217,3 218,6 219,9 220,5 221,1	434,2 —	41,45° 20,40° 20,42°	20,40° 218,5 213,7	215,6 — 216,1	— 20,93° —	
403,1	221,2 221,5 221,9 222,0	35,7 —	1,57° 20,10° 20,14°	185,5 181,6 185,8	181,3 183,4 183,7	18,53 — 18,56	—	10,0	222,4 223,7 224,4 225,1 225,7	434,2 —	41,23° 20,44° 20,50°	211,8 216,4 214,1	20,81 209,1 211,7	20,38 209,4 20,35	
405,0	222,1 222,2 222,4	35,9 —	1,54° 20,16° 20,20°	186,1 182,2 186,3	184,1 184,5 18,68	18,62	16,3	226,3 226,7 227,2	432,1 —	40,90° 20,55° 20,60°	206,4 212,4 204,8	207,6 20,20 20,20	—	—	
405,8	222,7 223,0 223,1 223,2 223,3 223,5	36,2 —	1,57° 20,22° 20,26° 1,60° 20,30°	186,5 182,7 186,7 184,7	184,6 18,65 18,66	21,8	—	227,8 228,4 228,5 228,7 229,0 229,3	431,0 —	40,67° 20,61° 20,63° 40,55° 20,65°	203,2 208,5 205,8 20,07	206,7 201,8 204,2	19,92 — —	— — —	

Korrektion für $T_1^0 = 0,00^\circ$, 184,0 | 18,60°Korrektion für $T_2^0 = 0,10^\circ$, 209,8 | 20,41°

Korrigiert: 20,51°

seine Temperatur auf 5 oder 6° der Raumtemperatur genähert, so wurde in Zwischenräumen von 5 Sek. das Galvanometer abgelesen, bis das Scheibchen eine Temperatur erreicht hatte, die mehrere Grade über der seiner Umgebung lag. Die Temperatur des Raumes wurde dadurch bestimmt, daß man das Scheibchen entfernte und nahe auf die Temperatur des Raumes abkühlte, dann wurde es wieder zurückgebracht und der Gang der Temperaturänderung während einiger Minuten beobachtet.

Tabelle VI.
Energiemessungen. „Luft“.
16. August 1902.

Zeit	G_1	Zeit	G_1	ΔG_1	Δt	$\frac{\Delta G_1}{\Delta t}$ in mm pro Sek.
0 Sek.	174,5	60 Sek.	253,2	78,7	60 Sek.	1,312
5	182,0	55	247,3	65,3	50	1,306
10	189,0	50	241,3	52,3	40	1,308
15	196,2	45	235,2	39,0	30	1,300
20	203,0	40	229,1	26,1	20	1,305
25	209,7	35	222,8	13,1	10	1,310
30	216,4					

Mittel: 1,307

Ablesung des Lampengalvanometers $G_2 = 924$. Die Empfindlichkeit von G_2 betrug 667 und von G_1 996; $\Delta G/\Delta t$ reduziert auf die normalen Verhältnisse wird $1,307 \cdot 667 \cdot 996 : 924 \cdot 1000 = 0,943$ mm/Sek.

Nulllage des Galvanometers G_1 (kurz geschlossen) bestimmt nach der Abkühlungsmethode gleich 216,8 gleich der Ablesung bei der Raumtemperatur.

Tab. VI gibt eine solche Beobachtungsserie, die die Erwärmung des Scheibchens durch den Lichtstrahl darstellt, vollständig wieder. Man sieht, daß die Temperatur des Scheibchens die des Raumes 30 Sek. nach Beginn der Serie überschreitet. Die letzte Kolumne enthält den Betrag, um welchen der Galvanometeraussschlag pro Zeiteinheit zunahm, wenn das Scheibchen und seine Umgebung dieselbe Temperatur hatten. Energiemessungen wurden bei „Luft“, „rotem

Glas“ und „Wasserschicht“ angestellt, analog wie bei den Druckmessungen. Während der Experimente wurde öfters die Rußschicht des Scheibchens abgewischt und eine neue aufgetragen; das endgültige Resultat entspricht deswegen nicht einer einzelnen Schicht, sondern stellt einen Durchschnittswert dar.

Eine Ungleichheit der beiden Thermoelemente des Scheibchens oder eine in Bezug auf die Mittelebene unsymmetrische Lage hätte zur Folge gehabt, daß die Durchschnittstemperatur der Lötstellen nicht der mittleren Temperatur des Scheibchens entsprochen hätte. Um etwaige Fehler dieser Art zu eliminieren, wurden Beobachtungsreihen für jede Seite des Scheibchens angestellt, wobei die Rußschicht jedesmal von der dem Licht abgewandten Seite weggewischt wurde. Alle Serien von Energiemessungen sind in Tab. VII und VIII zusammengestellt. In den Tabellen, die mit „Luft“ bezeichnet sind, enthält die erste Kolumne die beobachtete Zunahme des Galvanometerausschlages G_1 , wenn Scheibchen und Umgebung auf gleicher Temperatur waren. Die zweite gibt das entsprechende Mittel der Ausschläge des Lampengalvanometers G_2 ; die dritte und vierte enthält die Empfindlichkeit von G_1 und G_2 und die letzte Kolumne die Werte, die auf Normallichtstärke und normale Empfindlichkeit der beiden Galvanometer reduziert sind. Von jeder der an beiden Seiten des Scheibchens erhaltenen Serie wurde der Mittelwert gebildet und diese Werte mit ihren wahrscheinlichen Fehlern wurden dann am Schluß der Tab. VIII zu einem Hauptmittel vereinigt.

Tab. VII u. VIII geben folgende Resultate: Die durchschnittliche Zunahme der Ablenkung von G_1 für die normalen Zustände ergab 0,966 mm pro Sekunde. Nach der kalorimetrischen Eichung entspricht ein Ausschlag von 9,96 Skt. einer Temperaturdifferenz von 1°C . Folglich beträgt bei Belichtung die Temperaturzunahme des Silberkörpers pro Sek.:

a) „Luft“:	$0,966 : 9,96 = (0,0970^\circ \pm 0,00034^\circ) \text{C.},$
b) „Rotes Glas“:	$0,942 : 9,96 = (0,0946^\circ \pm 0,00036^\circ) \text{C.},$
c) „Wasserschicht“:	$0,880 : 9,96 = (0,0884^\circ \pm 0,00064^\circ) \text{C.}$

Tabelle VII.
Vorderseite.

Datum	„Luft“				„Rotes Glas“				„Wasserschicht“			
	$\frac{d G_1}{d t}$	G_3 Bogen- lampe	E_1	E_2	$\frac{d G_1}{d t}$ reduziert	$\frac{d G_1}{d t}$	O_2	$\frac{d G_1}{d t}$ reduziert	$\frac{d G_1}{d t}$	G_2	$\frac{d G_1}{d t}$ reduziert	
10. August	1,387	980	990	689	0,965	—	—	—	0,369	279	0,902	
10. "	1,263	920	990	689	0,936	—	—	—	0,437	345	0,864	
10. "	—	—	—	—	—	—	—	—	0,400	311	0,877	
11. "	1,244	866	986	701	0,992	0,750	546	0,950	0,412	315	0,905	
11. "	1,455	1010	986	701	0,995	0,750	546	0,950	0,510	382	0,922	
11. "	1,505	1047	986	701	0,994	—	—	—	0,516	381	0,935	
16. "	1,447	1022	996	669	0,942	0,736	529	0,927	0,416	327	0,873	
16. "	1,284	886	996	669	0,966	0,740	527	0,936	0,451	352	0,853	
16. "	1,316	925	996	669	0,948	0,797	550	0,965	0,502	382	0,875	
16. "	1,307	924	996	669	0,943	—	—	—	—	—	—	
18. "	1,598	1110	995	667	0,955	0,738	515	0,952	0,449	333	0,895	
18. "	1,550	1047	995	667	0,984	0,732	518	0,940	0,445	342	0,865	
18. "	1,548	1031	995	667	0,995	0,730	518	0,938	0,451	346	0,867	
18. "	1,410	957	995	667	0,977	—	—	—	—	—	—	
18. "	1,330	898	995	667	0,983	—	—	—	—	—	—	
19. "	1,241	862	1001	675	0,975	0,760	532	0,965	0,451	343	0,892	
19. "	1,360	934	1001	675	0,985	0,728	512	0,960	0,452	338	0,904	
19. "	1,324	905	1001	675	0,990	0,738	525	0,950	0,466	351	0,898	
19. "	1,364	934	1001	675	0,988	—	—	—	—	—	—	
Mittel:					0,973 ± 0,003	0,948 ± 0,002			0,888 ± 0,004			

Tabelle VIII.

Rückseite.

Datum	„Luft“				„Rotes Glas“			„Wasserschicht“		
	$\frac{d G_1}{d t}$	G_1 Bogen- lampe	E_1	F_2	$\frac{d G_1}{d t}$ reduziert	$\frac{d G_1}{d t}$	G_2	$\frac{d G_1}{d t}$ reduziert	G_2	$\frac{d G_1}{d t}$ reduziert
12. August	1,374	960	991	684	0,970	0,808	578	0,495	370	0,906
12. "	1,331	932	991	684	0,968	0,740	536	0,434	320	0,919
12. "	1,284	900	991	694	0,967	0,765	542	0,489	371	0,895
15. "	1,428	992	996	670	0,960	0,703	506	0,490	368	0,890
15. "	1,428	984	996	670	0,968	0,742	526	0,466	352	0,885
15. "	1,531	1068	996	670	0,962	0,765	551	0,440	337	0,873
20. "	1,477	1047	996	685	0,961	0,703	522	0,458	375	0,833
20. "	1,520	1090	996	685	0,951	0,760	537	0,497	400	0,848
20. "	1,576	1130	996	685	0,951	0,781	570	0,507	408	0,848
20. "	1,568	1124	996	685	0,950	—	—	—	—	—
21. "	1,783	1224	995	668	0,970	0,846	604	0,503	393	0,852
21. "	1,773	1232	995	668	0,957	0,790	575	0,481	377	0,850
21. "	1,705	1190	995	668	0,953	0,803	575	0,483	373	0,862
21. "	1,452	1019	995	668	0,948	—	—	—	—	—
Mittel:					0,960 $\pm$ 0,0014	0,936 $\pm$ 0,003			0,872 $\pm$ 0,005	
Mittel von Vorder- und Rückseite:					0,966 $\pm$ 0,0034	0,942 $\pm$ 0,0036			0,880 $\pm$ 0,0064	

Das Gewicht des Silberscheibchens betrug 4,80 g; seine spezifische Wärme¹⁾ bei 18° C. = 0,0556; das mechanische Wärmeäquivalent bei 18° C. = $4,272 \cdot 10^7$ Erg.²⁾

Folglich beträgt die Energie der Normalstrahlung:

- a) „Luft“: $0,0970 \cdot 4,80 \cdot 0,0556 \cdot 4,272 \cdot 10^7$,
 $E_L = (1,108 \pm 0,004) \cdot 10^6$ Erg pro Sek.
 b) „Rotes Glas“: $E_G = (1,078 \pm 0,004) \cdot 10^6$ Erg pro Sek.
 c) „Wasserschicht“: $E_W = (1,008 \pm 0,007) \cdot 10^6$ Erg pro Sek.

Reflexionskraft der benutzten Oberflächen.

1. Regelmäßige Reflexion.

Nach Maxwell ist bei senkrechter Inzidenz der Druck in Dynen pro Quadratcentimeter gleich der Energie in Erg, die in der Volumeneinheit des Mediums enthalten ist. Die in der Volumeneinheit enthaltene Energie besteht aus der Energie des direkten und reflektierten Strahles. Wenn E die Intensität des einfallenden Strahles ist und ρ der Reflexionskoeffizient, so ist der Druck $p = E(1 + \rho) / c$, wo c die Lichtgeschwindigkeit ist. Die Methoden zur Messung von p und E sind schon beschrieben. Die Bestimmung von ρ für beide Seiten der Flügel C und D geschah folgendermaßen. Die Unterlagen der Drehwaage wurden ersetzt durch eine geteilte kreisförmige Platte A' (Fig. 7), die um eine zentrische vertikale Achse gedreht werden konnte. Die Achse ging durch die Platte hindurch und trug an ihrem Ende einen Spiegelhalter $b b$. Die Flügel wurden frisch versilbert und auf einer Spiegelglasplatte $a a$ befestigt, die von einer Klammer gegen die Rückseite von $b b$ gehalten wurde. Der Lichtstrahl wurde von der Linse L_3 (Figg. 3 u. 7) auf die Flügel gerichtet, gerade so, wie es bei den Druckbeobachtungen geschehen war. Nach der Reflexion durch den Flügel fiel der Strahl auf einen Konkavspiegel M , der ein Bild von dem Flügel auf einen einfachen Streifenbolometer B entwarf, das den unbekannten Widerstand in einer Brückenordnung bildete. Der Strom wurde von Akkumulatoren geliefert. Das Galvanometer war dasselbe, das

1) U. Behn, Ann. d. Phys. 4. p. 266. 1900.

2) Mittel von Rowlands und Griffiths Werten (Phil. Trans. 184. p. 496. 1893).

bei den Energiemessungen benutzt worden war, nur hatte es Spulen von geringerem Widerstande. Das Bolometer wurde von der früher benutzten Glasglocke bedeckt. Der Spiegel M , die Glocke und das Bolometer standen auf der drehbaren Platte. Die ausgezogenen Linien der Figur zeigen die Anordnung zur Messung der Intensität des reflektierten Strahles, die punktierten die Stellung zur Bestimmung des direkten Strahles. Alle Messungen der regelmäßigen Reflexion wurden bei einem Einfallswinkel von $12,5^\circ$ ausgeführt.

Fig. 7.

Die Beobachtungsmethode kann man aus Tab. IX ersehen, die eine Journalaufzeichnung einer einzelnen Serie von Messungen darstellt. In der Tabelle bezeichnet D und R den direkten und reflektierten Strahl. Die erste und zweite Kolumne enthält die Nulllage und die Umkehrpunkte der Schwingungen des Galvanometers G_1 , die dritte den Ausschlag. Die übrigen Kolumnen enthalten der Reihe nach den Ausschlag des Lampengalvanometers, die Mittel aus jedem Wertepaar von D oder R und die abwechselnden Mittel. Die letzte Kolumne gibt die Quotienten der beiden vorhergehenden, also

die gesuchten Reflexionskoeffizienten. Im ganzen wurden drei Serien von Messungen an der Silberseite und zwei an der Glasseite eines jeden Flügels gemacht. Um die mittleren Koeffizienten zu erhalten, die dem durchschnittlichen Zustand eines Flügels während der Druckmessungen entsprachen, wurden die Flügel zwischen je zwei Serien gereinigt und neue Silberschichten auf denselben Seiten niedergeschlagen. Die Reflexionskoeffizienten sind in Tab. X zusammengestellt.

Tabelle IX.

Reflexionskoeffizient von D_p . „Luft.“

31. Oktober 1902.

	Nullpunkt	Umkehrpunkt	Ausschlag G_1	Bogenlampe	G_1 reduz. auf Normal	Mittel	Abweichend. Mittel	Reflexionskoeffizient
$R \left\{ \begin{array}{l} 350,0 \\ 349,0 \end{array} \right.$	159,5	190,5	132,6	143,8	141,3	142,5	—	—
$D \left\{ \begin{array}{l} 349,5 \\ 350,0 \end{array} \right.$	100,5	249,0	136,8	182,1	183,0	182,5	142,0	0,779
$R \left\{ \begin{array}{l} 346,0 \\ 347,0 \end{array} \right.$	177,0	169,0	119,3	141,2	141,7	141,5	182,5	0,775
$D \left\{ \begin{array}{l} 348,5 \\ 348,5 \end{array} \right.$	123,0	225,5	124,0	181,8	183,0	182,4	141,1	0,773
$R \left\{ \begin{array}{l} 345,0 \\ 345,0 \end{array} \right.$	172,0	173,0	122,6	141,0	140,3	140,6	182,7	0,770
$D \left\{ \begin{array}{l} 346,0 \\ 346,0 \end{array} \right.$	132,0	214,0	115,5?	—	183,0	183,0	141,2	0,773
$R \left\{ \begin{array}{l} 344,0 \\ 344,5 \end{array} \right.$	173,0	171,0	120,7	141,8	141,6	141,7	182,1	0,778
$D \left\{ \begin{array}{l} 346,0 \\ 346,0 \end{array} \right.$	119,0	227,0	125,3	181,0	181,3	181,2	141,6	0,781
$R \left\{ \begin{array}{l} 342,0 \\ 342,0 \end{array} \right.$	174,0	168,0	118,0	142,3	140,8	141,5	181,8	0,780
$D \left\{ \begin{array}{l} 347,0 \\ 347,0 \end{array} \right.$	130,0	217,0	119,0	182,3	182,7	182,5	141,4	0,775
$R \left\{ \begin{array}{l} 341,5 \\ 341,0 \end{array} \right.$	174,5	167,0	118,0	141,3	141,1	141,2	—	—

Mittel: 0,776

Tabelle X.

Reflexionskoeffizienten in Prozenten.

C_x				C_y			
„Luft“	„Rotes Glas“	„Wasser“	Diffuse Reflex.	„Luft“	„Rotes Glas“	„Wasser“	Diffuse Reflex.
92,8	94,5	88,9	0,98	77,8	75,9	80,8	—
89,8	90,8	86,0	0,92	77,6	76,6	80,0	1,6
90,8	—	—	1,23	—	—	—	—
Mittel: 91,1	92,7	87,5	1,04	77,7	76,3	80,4	1,6

D_x				D_y			
95,0	96,3	91,5	2,2	77,6	76,5	81,0	2,8
92,0	94,0	90,4	—	76,7	75,2	79,7	2,2
94,8	95,0	92,3	0,8	—	—	—	—
Mittel: 93,9	95,1	91,4	1,5	77,2	75,9	80,4	2,5

Mittlere Koeffizienten.

Luft—Silber				Glas—Silber			
92,5	93,9	89,5	1,3	77,5	76,1	80,4	2,0

Korrigierte Koeffizienten.

92,0	93,4	89,0	—	77,6	76,2	80,5	—
------	------	------	---	------	------	------	---

Durchschnittswert der Koeffizienten.

„Luft“	„Glas“	„Wasser“
84,8	84,8	84,8

2. Diffuse Reflexion.

Für jede benutzte Oberfläche wurde die *diffuse* Reflexion eines Strahles, der durch Luft gegangen war, folgendermaßen bestimmt. Die Fläche wurde auf senkrechte Inzidenz gestellt, die Energie, die in einem Winkel von 25° reflektiert wurde und auf die volle Öffnung des Spiegels *M* fiel, wurde gemessen und der Gesamtbetrag für die Halbkugel auf Grund des

Kosinusetz berechnen. Wenn $I_\theta dA$ der Betrag der diffusen Strahlung ist, die unter einem Winkel θ zur einfallenden Strahlung normal auf das Flächenelement dA fällt, das sich in einer Entfernung r von dem Flügel befindet, dann ist

$$I_\theta dA = I_0 \cos \theta dA.$$

Der gesamte Betrag der diffusen Strahlung ist

$$\iint I_0 \cos \theta dA;$$

genommen über die Oberfläche der Halbkugel

$$= \int_0^{\pi/2} 2\pi r^2 I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta = \pi I_0 r^2.$$

Dieses Integral stellt den Betrag der diffusen Reflexion in Tab. X dar. Von der diffusen Strahlung $I_\theta dA$ kommt allein die zum Flügel senkrechte Komponente $I_\theta \cos \theta dA$ in Betracht. Der Gesamtausdruck lautet

$$\int_0^{\pi/2} 2\pi r^2 I_0 \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = \frac{2}{3} \pi I_0 r^2.$$

Man sieht also, daß $\frac{2}{3}$ des diffus reflektierten Lichtes Druckwirkung ausübt. Dieses vergrößert die Luft-Silber-Reflexionskoeffizienten um 0,9 Proz. und die Glas-Silber-Koeffizienten um 1,3 Proz. Die kleinen Glasstäbchen d_1 (Fig. 2), die bei den Reflexionsmessungen nicht vorhanden waren, verkleinern die reflektierende Fläche der versilberten Flügel bei den Druckmessungen um 1,54 Proz. Die Werte für Luft-Silber sind also zu vermindern um $0,92 \cdot 1,54 = 1,4$ Proz. und die Werte für Glas-Silber um $0,78 \cdot 1,54 = 1,2$ Proz. Durch Anwendung dieser beiden Korrekturen erhält man die endgültig korrigierten Koeffizienten in Tab. X.

Die diffuse Reflexion von Rußschichten, die nach der bei der Schwärzung des Silberscheibchens angegebenen Methode hergestellt waren, wurde nach derselben Art gemessen und berechnet wie die diffuse Reflexion der Flügel C und D. Die Übereinstimmung, die Ångström¹⁾ zwischen der diffusen

1) K. Ångström, Wied. Ann. 26. p. 271. 1885.

Reflexion von matten Oberflächen bei senkrechter Inzidenz und dem Kosinusetz gefunden hat, war für den gegenwärtigen Zweck hinreichend. Es wurden fünf Bestimmungen der diffusen Reflexion unter verschiedenen Bedingungen und mit verschiedenen Rußschichten gemacht. Die Werte betrugen 4,4, 4,5, 4,2, 4,6 und 5,2 Proz., im Mittel 4,6 Proz. der Intensität des einfallenden Strahles. Also nur 95,4 Proz. des auffallenden Lichtes wurden durch die Rußschicht des Silberscheibchens absorbiert. Folglich beträgt die wahre Energie des Lichtstrahles $1/0,954$ der beobachteten.

Das Silberscheibchen von 13,3 mm Durchmesser empfing lange Wellen und zerstreute Strahlung, die um und durch die Lichtdruckflügel von 12,8 mm Durchmesser gegangen war. Dieser Betrag wurde für dicke und dünne Silberschichten experimentell festgestellt, um angenähert den durchschnittlichen Einfluß der Schichten auf die Lichtdruckmessungen zu finden und man hatte im Mittel erhalten:

- a) „Luft“: 1,40 Proz., b) „Rotes Glas“: 1,44 Proz.,
c) „Wasserschicht“: 0,46 Proz.

Um einen solchen Betrag muß die Energie E der Normalstrahlung noch verringert werden.¹⁾ Wenden wir diese Korrekturen an und auch die oben erwähnten, von der diffusen Strahlung des Silberkörpers herrührenden, so beträgt die Energie der Normalstrahlung:

$$\text{a) „Luft“: } E_L \cdot \frac{0,986}{0,954},$$

$$\text{b) „Rotes Glas“: } E_G \cdot \frac{0,986}{0,954},$$

$$\text{c) „Wasserschicht“: } E_W \cdot \frac{0,995}{0,954}.$$

Folglich ist der Druck, der von einer konstanten Strahlung herrührt, nach Maxwells Formel $p = E(1 + \rho)/3 \cdot 10^{10}$ berechnet, für $\rho = 0,848$

1) Da durchschnittlich die Tangente des Öffnungswinkels des einfallenden Lichtstrahles gegen $1/40$ betrug, war es nicht nötig, für schiefe Inzidenz eine Korrektur anzubringen. Ferner war die Innenseite der Glasglocke geschwärzt und der Nullpunkt der Drehwaage so gewählt, daß keine von den Fenstern reflektierte Energie Druckwirkungen ausüben konnte.

a) „Luft“:

$$p = E_L \cdot \frac{0,986}{0,954} \cdot \frac{1,848}{3 \cdot 10^{10}} = 1,108 \cdot \frac{0,986}{0,954} \cdot \frac{1,848}{3 \cdot 10^{10}} \cdot 10^6 \text{ Dynen}$$

$$p = (7,05 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{ Dynen.}$$

b) „Rotes Glas“:

$$p = E_G \cdot \frac{0,986}{0,954} \cdot \frac{1,848}{3 \cdot 10^{10}} = 1,078 \cdot \frac{0,986}{0,954} \cdot \frac{1,848}{3 \cdot 10^{10}} \cdot 10^6 \text{ Dynen}$$

$$p = (6,86 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{ Dynen.}$$

c) „Wasserschicht“:

$$p = E_W \cdot \frac{0,995}{0,945} \cdot \frac{1,848}{3 \cdot 10^{10}} = 1,008 \cdot \frac{0,995}{0,954} \cdot \frac{1,848}{3 \cdot 10^{10}} \cdot 10^6 \text{ Dynen}$$

$$p = (6,48 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \text{ Dynen.}$$

Ein Vergleich der beobachteten und berechneten Drucke folgt:

	Beobachtet $p \cdot 10^{-5} \text{ Dynen}$	Berechnet $p \cdot 10^{-5} \text{ Dynen}$	Differenz in Proz.
„Luft“	$p = 7,01 \pm 0,02^1)$	$7,05 \pm 0,03$	-0,6
„Rotes Glas“ . . .	$p = 6,94 \pm 0,02$	$6,86 \pm 0,03$	+1,1
„Wasserschicht“ . .	$p = 6,52 \pm 0,03$	$6,48 \pm 0,04$	-0,6

Die aus Druck- und Energiemessungen erhaltenen Werte zeigen eine befriedigende Übereinstimmung.

Eine Schätzung des ungefähren Betrages der *Luftstörungen*, die bei der ballistischen Beobachtungsmethode nicht eliminiert wurden, kann man aus folgenden Betrachtungen erhalten.

Wenn Strahlung auf einen Flügel der Drehwaage fällt, wird ein Teil davon durch die Silberoberfläche absorbiert. Aus den Beträgen der regelmäßigen und diffusen Reflexion (Tab. X), aus dem Betrage, der auf die Durchschnittsoberfläche übertragen ist (experimentell bestimmt, aber nicht in Tab. X angegeben), ferner aus der Wirkung des Glasstäbchens und aus dem Reflexionskoeffizient der Glasoberfläche war gefunden worden, daß, wenn die

1) Um den beobachteten Druck mit dem aus der Energie berechneten vergleichen zu können, wurden für die drei verschiedenen Wellengruppen (Luft, rotes Glas, Wasserschicht) drei voneinander völlig unabhängige Experimente angestellt. Die Druckwerte 7,01, 6,94 und 6,52 kommen einander nur zufällig nahe. Die Differenz entsteht durch die verschiedene Reflexionskraft der unter 45° geneigten Glasplatte für die verschiedenen Strahlen, sowie auch dadurch, daß die Angaben des Lampengalvanometers G , zusammen mit dem Bolometer R nicht streng proportional den Energiemengen sind, deren gegenseitiges Verhältnis etwa 33 : 60 : 100 für „Wasser“, „rotes Glas“ und „Luft“ ist. Das Lampenbolometer und -Galvanometer diente nur dazu, die kleinen Schwankungen der Lichtintensität zu kontrollieren, die selten mehr als 10 Proz. von jeder Seite des Mittelwertes betrugten

Silberseite des Flügels dem Lichte zugekehrt war, der Absorptionskoeffizient bei Strahlung durch „Luft“ 6 Proz., und wenn die Glasseite nach vorn stand, dann 18 Proz. betrug.

Die ganze Kraft, die auf den Flügel einwirkte, zerfiel in zwei Komponenten, eine die von dem Strahlungsdruck, und eine, die von der Lufteinwirkung herrührte. F_s sei die Kraft, die von der ersten Ursache herrührt, wenn wir annehmen, daß die gesamte Strahlung absorbiert werde, und F_L sei der von der zweiten Ursache herrührende Effekt unter derselben Voraussetzung. Dann beträgt der gesamte Effekt, wenn die Silberseite dem Lichte zugekehrt ist und die Strahlung durch „Luft“ geht, gleich $1,92 F_s + 0,06 F_L$. Steht die Glasseite nach vorn, ist der ganze Effekt $1,776 F_s - 0,18 F_L$. Setzen wir diese Ausdrücke gleich den entsprechenden reduzierten Ausschlägen (Tab. III, Kolumne 11 und 12), so haben wir zwei Gleichungen, aus welchen der Wert von F_s und F_L erhalten werden kann. Hiernach ist also der Effekt, der von der Einwirkung des Gases auf den Flügel herrührt, annähernd bestimmt und damit auch der Betrag $0,06 F_L$, der bei der Bildung von Kolumne 13 (als Mittel aus den beiden vorhergehenden) nicht eliminiert ist.

Wenden wir diese Methode auf sämtliche Resultate der Tab. III an (mit Ausnahme derjenigen Resultate, die mit schlechtem Spiegel, wie unser Notizbuch angibt, erhalten sind), so beträgt die Lufteinwirkung, die bei den ballistischen Ausschlägen für „Luft“ auftritt, 0,8 Proz. Verfahren wir ebenso mit den Werten der Tab. IV, so beträgt die Lufteinwirkung bei „rotem Glas“ 1,1 Proz. und bei Wasserschicht 0,3 Proz. Das Vorzeichen von F_L erscheint negativ, was bedeutet, daß die Luftwirkung saugend war.

Diese Betrachtung hat zur Voraussetzung, daß die Glasseiten der Flügel während der Expositionsdauer weder durch Absorption noch durch Wärmeleitung von der Silberschicht aus erwärmt wurden. Der Effekt einer solchen Absorption oder Leitung hätte den berechneten Lufteinfluß vermindern müssen. Wie bei den statischen Beobachtungen vermutet wurde, ist die Lufteinwirkung bei den ballistischen Messungen der Größe nach vergleichbar mit den berechneten Werten, wie sie oben erhalten wurden und von demselben Vorzeichen. Beide Überlegungen zeigen, daß die Lufteinwirkung auch im ungünstigsten

Fälle 1 Proz. des Strahlungsdruckes nicht überschreitet. Wegen der Kleinheit und Undefiniertheit wurde an den endgültigen Werten für den Druck keine Korrektur für die Luftstörung angebracht. Bei den Resultaten der Druck- und Energiemessungen sind die wahrscheinlichen Fehler mit angegeben; eine Zusammenstellung der prozentischen Genauigkeit der anderen Werte, die in den Berechnungen vorkommen, sowie die Beeinflussung des endgültigen Resultates wird in folgendem mitgeteilt.

1. Größen, die sich auf einzelne Serien beziehen:

a) Druckwerte:

Schwingungsdauer T . .	genau auf	0,2 Proz.,	bewirkt am Resultat	0,0 Proz.
Hebelarm der Drehwaage l	" "	0,1 "	" " "	0,0 "
Konstante des Galv. G_2	" "	0,5 "	" " "	0,0 "
Expositionsdauer . . .	" "	0,4 "	" " "	0,1 "

b) Energiewerte:

Konstante des Galv. G_1	genau auf	0,1 Proz.,	bewirkt am Resultat	0,0 Proz.
" " " G_2	" "	0,5 "	" " "	0,0 "

2. Größen, die sich auf endgültige Durchschnittswerte beziehen:

a) Druckwerte:

Torsionskraft des Fadens	genau auf	0,2 Proz.,	bewirkt am Resultat	0,2 Proz.
Reduktionsfaktor 1,937 .	" "	0,1 "	" " "	0,1 "
" 1,550 für G	" "	0,2 "	" " "	0,2 "
Reflexion der Flügeloberflächen	" "	0,4 "	" " "	0,2 "

b) Energiewerte:

Gewicht des Silberscheibchens	genau auf	0,1 Proz.,	bewirkt am Resultat	0,1 Proz.
Temperaturkalibrierung des Silberscheibchens .	" "	0,5 "	" " "	0,5 "
Diffuse Reflexion der Rußschicht	" "	0,5 "	" " "	0,1 "

Die Übereinstimmung der Werte von „Luft“, „rotes Glas“ und „Wasserschicht“ mit der Theorie innerhalb der Beobachtungsfehler beweist, daß der Strahlungsdruck nur von der Intensität der Strahlung und nicht von der Wellenlänge abhängt.

Die Maxwell-Bartolische Theorie ist somit innerhalb der wahrscheinlichen Beobachtungsfehler quantitativ bestätigt.

Hanover N. H., Wilder Laboratory, Dartmouth College,
Dezember 1902.

(Eingegangen 2. März 1903.)