

ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 6.

1. *Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes; von Peter Lebedew.*

Bei der Aufstellung seiner elektromagnetischen Lichttheorie hat Maxwell (1873) auch diejenigen Kräfte mit in Betracht gezogen, welche als ponderomotorische Kräfte in einem elektrisch oder magnetisch polarisirten Medium auftreten; als eine notwendige Consequenz seiner Theorie ergibt es sich, dass diese Kräfte in einem Strahlenbündel auftreten müssen, und Maxwell¹⁾ sagt:

„Es wirkt in einem Medium, in welchem eine Welle sich fortpflanzt, in der Richtung der Fortpflanzung ein Druck, der an jeder Stelle numerisch ebenso gross ist, wie die daselbst vorhandene, auf Volumeneinheit bezogene Energie.“

Auf die Ableitung dieser Maxwell'schen Druckkräfte der elektromagnetischen Strahlung sind neuerdings Heaviside²⁾, Lorentz³⁾, Cohn⁴⁾ und Goldhammer⁵⁾ näher eingegangen.

Auf einem ganz anderen Wege, und wie es scheint ohne Maxwell's Resultat zu kennen, ist Bartoli (1876)⁶⁾ zu dem nämlichen Schlusse gelangt: er giebt Kreisprocesse an, welche es gestatten sollen, durch bewegte Spiegel die strahlende Energie von einem kälteren Körper auf einen wärmeren zu übertragen und berechnet die hierbei nach dem zweiten Hauptsatze zu leistende Arbeit. Die Notwendigkeit einer Arbeits-

1) J. C. Maxwell, Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus § 792. Deutsch von B. Weinstein, Berlin 1883.

2) O. Heaviside, *Electromagnetic Theorie* 1. p. 334. London 1893.

3) H. A. Lorentz, *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern* p. 29. Leiden 1895.

4) E. Cohn, *Das elektromagnetische Feld* p. 543. Leipzig 1900.

5) D. Goldhammer, *Ann. d. Phys.* 4. p. 834. 1901.

6) A. Bartoli, *Exner's Rep. d. Phys.* 21. p. 198. 1884, übersetzt aus *Nuovo Cimento* 15. p. 195. 1883.

leistung bei der Verschiebung der Spiegel gegen die Richtung der auffallenden Strahlung zwingt zu der Annahme von Druckkräften, welche von dieser Strahlung auf den Spiegel ausgeübt werden. Bartoli berechnete die Grösse dieser Druckkräfte; sein Resultat stimmt mit dem von Maxwell gewonnenen vollkommen überein.

Dem von Bartoli eingeschlagenen Wege folgte Boltzmann¹⁾ und nachher Fürst Galitzin²⁾ und Guillaume³⁾ bei der Berechnung der Druckkräfte, welche von der Strahlung ausgeübt werden; Drude⁴⁾ hat diese Methode auf absolut schwarze Körper ausgedehnt.

Fällt ein Bündel paralleler Strahlen normal auf eine ebene Fläche, so ist die Grösse dieses Maxwell-Bartoli'schen Druckes p bestimmt, wenn die pro Zeiteinheit auffallende Energiemenge E , das Reflexionsvermögen ρ der Fläche und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit V der Strahlung bekannt sind; es ist dann

$$p = \frac{E}{V}(1 + \rho),$$

worin ρ zwischen 0 für einen absolut schwarzen und 1 für einen absolut spiegelnden Körper liegt.

Diese Druckkräfte sind sehr klein. Sowohl Maxwell als auch Bartoli haben berechnet, dass die Sonnenstrahlung, wenn sie normal auf 1 qm fällt, einen Druck ausübt, welcher für eine absolut schwarze Oberfläche 0,4 mg und für einen ebenen Spiegel 0,8 mg beträgt.

Vermutungen, dass solche Druckkräfte der Strahlung existieren müssen, sind bereits viel früher ausgesprochen worden. So glaubte Kepler (1619) die abstossende Kraft, welche die Sonne auf Kometenschweife ausübt, in den Druckkräften ihrer Strahlung suchen zu müssen, eine Anschauung, welche im Einklange mit der herrschenden Emissionstheorie des Lichtes stand und von Longomontanus (1622)⁵⁾ eifrig vertreten wurde. Der nämliche Grund führte auch Euler (1746)⁶⁾ dazu, der

1) L. Boltzmann, Wied. Ann. 22. p. 33, 291 u. 616. 1884.

2) B. Galitzin, Wied. Ann. 47. p. 479. 1892.

3) Ch. Ed. Guillaume, Archives des Sc. phys. et natur. de Genève 31. p. 121. 1894.

4) P. Drude, Lehrbuch der Optik p. 447. Leipzig 1900.

5) Vgl. hierüber weiter unten bei De Mairan, p. 355—356.

6) L. Euler, Histoire de l'Academie Royale de Berlin 2. p. 121. 1746.

Sonnenstrahlung Druckkräfte zuzuschreiben und er versuchte die Notwendigkeit solcher Druckkräfte aus der als longitudinale Schwingungen betrachteten Lichtbewegung zu begründen.

De Mairan (1754)¹⁾ hat zusammen mit Du Fay sehr interessante Versuche gemacht, diese Vermutungen experimentell zu prüfen, erkannte aber bald, dass die störenden Erwärmungen der umgebenden Luft keinen sicheren Nachweis der directen ponderomotorischen Kräfte des Lichtes zulassen; für die Hülfsmittel des XVIII. Jahrhunderts verdienen die Experimente De Mairan's die grösste Bewunderung. Solche Versuche hat auch A. Fresnel (1825)²⁾ unternommen und ist gleichfalls auf dieselben Schwierigkeiten gestossen; eine eingehende Untersuchung ähnlicher Erscheinungen führte Crookes³⁾ auf die Entdeckung der radiometrischen Kräfte.

Die Anwendungen, welche die Maxwell-Bartoli'schen Druckkräfte der Strahlung sowohl in der Physik als auch in der Astronomie erlangen können, lassen eine experimentelle Untersuchung dieser Kräfte durchaus wünschenswert erscheinen, da die theoretischen Ableitungen, sowohl die nach Maxwell als auch die nach Bartoli sich auf gewisse einfache Eigenschaften der absorbirenden und reflectirenden Flächen stützen und es noch fraglich erscheinen könnte, ob durch diesen Eigenschaften *allein* die auftretenden ponderomotorischen Kräfte auch für *Lichtstrahlen* bestimmt werden. Diese Fragen können nur durch weitere ergänzende Untersuchungen erledigt werden; am einfachsten führt hierbei zum Ziele ein directer Versuch.

Die Bemühungen, welche Zöllner⁴⁾ und Bartoli (l. c. p. 205) in dieser Richtung gemacht haben, haben kein positives Resultat ergeben; deshalb habe ich die weiter folgende experimentelle Untersuchung der Druckkräfte des Lichtes unternommen.⁵⁾

1) De Mairan, *Traité physique et historique de l'Aurore Boréale* (Seconde Edition) p. 371. Paris 1754.

2) A. Fresnel, *Ann. de Chim. et de Phys.* (2) 29. p. 57 u. 107. 1825.

3) W. Crookes, *Phil. Trans.* 164. p. 501. 1874; die einschlägige Litteratur ist hier ausführlich angegeben.

4) F. Zöllner, *Pogg. Ann.* 160. p. 154. 1877.

5) Ein vorläufiger Bericht über diese Untersuchungen findet sich in *Rapports présentés au Congrès International de Physique à Paris* 2. p. 133. 1900.

I. Die Vorversuche.

In seinem Lehrbuch § 793 sagt Maxwell:

„Concentrirtes elektrisches Licht wird wahrscheinlich einen noch grösseren Druck ausüben (als die Sonnenstrahlung) und es ist nicht unmöglich, dass die Strahlen eines solchen Lichtes, wenn sie auf ein dünnes metallisches Blättchen, das in einem Vacuum fein aufgehängt ist, fallen, an diesem einen beobachtbaren mechanischen Effect ausüben.“

Als ich meine Versuche beginnen wollte, schien mir die von Maxwell vorgeschlagene Versuchsanordnung aussichtslos, weil bereits Zöllner¹⁾ diesen Weg ohne Erfolg eingeschlagen und auch „darauf aufmerksam gemacht hat, dass der von Maxwell theoretisch erlangte Wert (des Lichtdruckes) ungefähr 100 000 mal kleiner sei als der von Crookes in einem speciellen Falle beobachtete Wert der Resultate“. ²⁾ Wenn man auch darauf rechnen konnte, diese störenden radiometrischen Wirkungen ganz erheblich zu verkleinern, so glaubte ich dennoch, dass nur eine solche Einrichtung zum Ziele führen könnte, in welcher diese radiometrischen Kräfte compensirt sind.

Bei der Untersuchung der radiometrischen Kräfte hat Schuster³⁾ nachgewiesen, dass diese Kräfte innere Kräfte des Radiometers sind; Righi⁴⁾ hat diesen Satz auf eine elegante Weise bestätigt: „Ich liess“, sagt Righi, „ein Radiometer auf Wasser schwimmen, Kopf nach unten, sodass das Glashütchen der Mühle auf dem Rohre lag, welches die letztere verhindert, aus der Normalstellung herauszufallen, wodurch eine Reibung entstand, die das Drehen der Mühle hemmte. Als auf die Mühle ein intensives Strahlenbündel gerichtet wurde, habe ich nicht die geringste Drehung (des Radio-

1) F. Zöllner, l. c. p. 155.

2) Bei seiner Berechnung hat Zöllner die Energie der Gesamtstrahlung einer Kerze zu klein angenommen. Vergleicht man die von E. Nichols (Wied. Ann. 60. p. 405. 1897) beobachteten radiometrischen Kräfte, mit denen aus den Strahlungsmessungen von K. Ångström (Wied. Ann. 67. p. 647. 1899) für eine Hefnerlampe berechneten Maxwell-Bartoli'schen Druckkräften, so erhält man ein Verhältniss von ca. 10000.

3) A. Schuster, Phil. Mag. (5) 2. p. 313. 1876.

4) A. Righi, in wörtlicher Uebersetzung angeführt bei Bertin u. Garbe weiter unten p. 51.

meters) erhalten.“ Das nämliche Resultat erhielten auch Bertin und Garbe¹⁾ bei der Wiederholung dieser Versuche.

In folgender Weise habe ich die Versuchsanordnung von Righi für die Bestimmung der Maxwell-Bartoli'schen Druckkräfte des Lichtes verwendet: zwischen zwei kreisrunden, aus sehr dünnem Nickelblech gestanzten Deckeln war ein Stück Glimmer zu einem Cylinder gebogen und festgeklemmt — es bildete sich somit ein cylindrischer Radiometerkörper —, in welchem sich der mit der Hülle starr verbundene Flügel befand. Dieses Radiometer wurde in einem evacuirten Glasballon an einem Glasfaden aufgehängt: wurde das Licht einer Bogenlampe auf den Flügel gerichtet, so wurden stets Drehungen des Radiometers beobachtet²⁾, welche ihrer Grössenordnung nach den Maxwell-Bartoli'schen Druckkräften entsprachen.³⁾

Als ich bei diesen Versuchen vergleichsweise die Radiometerflügel für sich, *ohne* Glimmerhülle untersuchte, fand ich, dass die auftretenden radiometrischen Kräfte weit unter der von Zöllner angegebenen Grösse lagen und selbst eine wesentlich kleinere Störung darstellen, wie die bei der verhältnissmässig sehr grossen Radiometerhülle auftretenden Störungen durch Convection. Ich habe deshalb diese Methode verlassen und die Versuche in der von Maxwell vorgeschlagenen einfachen Form aufgenommen.

II. Die Versuchsanordnung und die Apparate.

Der Durchführung einer Untersuchung der Maxwell-Bartoli'schen Druckkräfte des Lichtes stellen sich zwei Schwierigkeiten in den Weg: die Störungen durch *Convection* und die auftretenden *radiometrischen* Kräfte. Bei den höchsten

1) Bertin et Garbe, Ann. de Chim. et de Phys. (5) 11. p. 67. 1877.

2) Dass Righi, sowie Bertin und Garbe bei ihren Versuchen *keine* Wirkung der Maxwell-Bartoli'schen Druckkräfte beobachtet haben, liegt *nur* darin, dass ihre Versuchsanordnungen, auf die sehr viel grösseren radiometrischen Kräfte berechnet, für die Kräfte des Lichtes nicht empfindlich genug waren.

3) Die Ergebnisse dieser Vorversuche wurden in der Société Vaudoise in Lausanne den 17. Mai 1899 vorgetragen (Archives des Sc. phys. et nat. de Genève 8. p. 184. 1899). Das rechtzeitige Erscheinen der dort angekündigten ausführlichen Note ist durch zufällige Ursachen verhindert worden und ist deshalb ausgeblieben.

Verdünnungen werden diese störenden Kräfte gering, müssen aber dennoch bei den Messungen berücksichtigt werden.

Die Störungen durch Convection entstehen dadurch, dass bei der Erwärmung der Flügel durch Belichtung die anliegenden Gaschichten sich gleichfalls erwärmen und eine langsam aufsteigende Strömung hervorrufen; hat die Ebene des Flügels auch nur eine geringe (kaum zu vermeidende) Neigung gegen die Verticalebene, so übt der aufsteigende Gasstrom auf den Flügel eine Drehung aus, welche *nur* von der Erwärmung, aber *nicht* von der Richtung, in welcher die erwärmenden Strahlen auffallen, abhängig ist. Diese Störung kann dadurch eliminirt werden, dass die Strahlen derselben Quelle abwechselnd auf die eine und auf die andere Seite des Flügels gerichtet werden.

Die Störung durch radiometrische Kräfte wurde dadurch auf ein Minimum reducirt, dass der Glasballon möglichst gross ($D = 20$ cm) genommen wurde¹⁾, alle Strahlen, welche von der Glaswand des Ballons absorbiert werden können, durch ein Strahlenfilter ausgeschlossen²⁾, die Flügel des besseren Wärmeausgleichs wegen aus dünnem Metallblech gefertigt und überdies die Evacuierung³⁾ mit Hülfe einer Quecksilberpumpe und Anwendung von Kältemischung möglichst hoch getrieben.

Sind die radiometrischen Kräfte klein, so kann die diesbezügliche Correction in folgender Weise berechnet werden: die radiometrischen Kräfte sind der Temperaturdifferenz zwischen der belichteten und der dunkeln Oberfläche des Flügels, oder für zwei Flügel aus gleichem Material und von gleicher Oberflächenbeschaffenheit, ihrer *Dicke* direct proportional⁴⁾; machen wir gleichzeitige Beobachtungen an *zwei* gleichen Flügeln von sehr verschiedener Dicke, so können wir *berechnen*, eine wie grosse Ablenkung das Licht hervorrufen würde, wenn die Dicke

1) Vgl. W. Crookes, Phil. Trans. 170. p. 113. 1879.

2) Vgl. W. Crookes, Phil. Trans. 168. p. 266. 1878.

3) l. c. p. 300.

4) Bei unseren Versuchen war die Temperaturdifferenz zwischen dem belichteten Flügel und dem Ballon sehr viel grösser, als die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Oberflächen des Flügels. Welcher Function der ersten Temperaturdifferenz proportional die radiometrischen Kräfte auch sein mögen, ihre ponderomotorische Wirkung auf den Flügel stellt ihre Differenz an beiden Oberflächen des Flügels dar und diese ist somit mit genügender Annäherung der zweiten Temperaturdifferenz direct proportional.

des Flügels gleich Null und somit auch die radiometrische Kraft gleich Null wäre. Ich möchte hier gleich bemerken, dass diese Correction nur bei den platinirten Flügeln zu machen ist; bei Metallflügeln waren die radiometrischen Kräfte gegen alle Erwartungen verschwindend klein.

Ausser den angeführten bekannten störenden Einflüssen möge noch eine Hypothese nicht unberücksichtigt bleiben, dass die von Lenard und Wolf¹⁾ nachgewiesene Zerstäubung belichteter Oberflächen merkliche ponderomotorische Reactionskräfte hervorrufen könne, welche immer als Begleiter der Maxwell-Bartoli'schen Druckkräfte des Lichtes auftreten müssten; diese hypothetischen Reactionskräfte müssen aber sowohl von der Farbe des auffallenden Lichtes

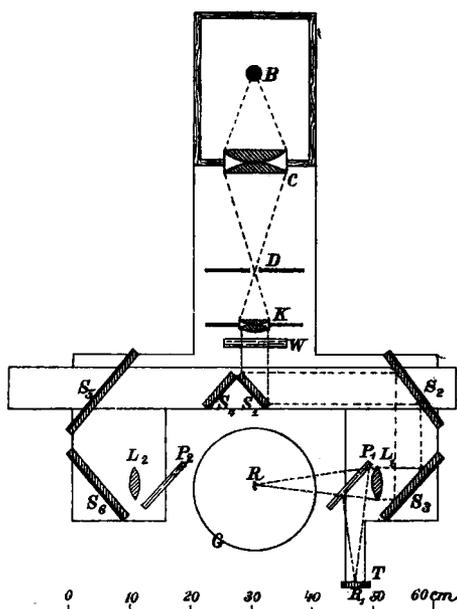


Fig. 1 (Grundriss).

als auch von der chemischen Natur des Flügels abhängig sein; die weiter folgenden Versuche mit farbigem Lichte und mit verschiedenen Flügeln haben keine nachweisbare Wirkung dieser hypothetischen Reactionskräfte entdecken lassen.

Die getroffene Anordnung war die folgende (Fig. 1, Grundriss):

Das Bild des Kraters einer Gleichstrombogenlampe *B* (30 Amp.) wurde mit Hülfe eines Condensators *C* auf ein Metalldiaphragma *D* ($d=4$ mm) geworfen. Der aus dem Diaphragma austretende Lichtkegel wurde durch die Linse *K* zu einem Parallelstrahlenbündel gemacht; um das Licht von ultraroten

1) Ph. Lenard u. M. Wolf, Wied. Ann. 37. p. 455. 1889.

Strahlen zu befreien, befand sich hinter der Linse K ein planparalleles Glasgefäß W mit reinem Wasser¹⁾ (Schichtendicke 1 cm); an dieser Stelle konnte auch noch ein rubinrotes Glas eingeschaltet bez. das reine Wasser durch eine ammoniakalische Kupferlösung ersetzt werden.²⁾

Auf seinem weiteren Wege wurde das Lichtbündel von den ebenen hinten belegten Glasspiegeln S_1 , S_2 und S_3 reflectirt und durch die Linse L_1 zu einem reellen vergrößerten ($d' = 10$ mm) Bilde des Diaphragmas D , im Innern des Glasballons, in R vereinigt; wurde das Spiegelpaar $S_1 S_4$ verschoben, so durchsetzten die Strahlen einen analogen Weg und fielen von der anderen Seite auf den im Glasballon G hängenden Flügel. Die Linsen L_1 und L_2 hatten je 20 cm Brennweite und je 5 cm freie Oeffnung, sodass der auffallende Lichtkegel einen Oeffnungswinkel von ca. 15° hatte.

Der Spiegelapparat war mit der Bogenlampe fest verbunden. Die Lampe stand auf einem Schlitten, auf welchem sie verschoben bez. von dem Glasballon weggeschoben werden konnte; durch Stellschrauben konnte der Lichtkegel gehoben und gesenkt werden.

Die immer vorhandenen zufälligen plötzlichen Schwankungen der Lichtintensität, welche bei einer Bogenlampe unvermeidlich sind, können nur durch Häufung der Beobachtungen unschädlich gemacht werden.

Um die einzelnen Messungsreihen auf eine constante mittlere Lichtintensität reduciren zu können, diente die folgende

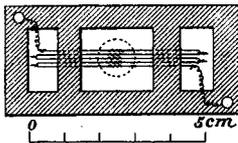


Fig. 2.

Vorrichtung: zwischen der Linse L_1 (Fig. 1) und dem Glasballon G wurde eine dünne ebene Glasplatte P_1 unter 45° zur Richtung der Strahlen aufgestellt. Der grössere Teil der Strahlung durchsetzte die Glasplatte ungehindert, während sich das reflectirte Licht zu einem reellen Bilde R_1 vereinigte und dieses auf die Thermosäule T fiel. Die Thermosäule (Fig. 2) bestand aus fünf Constantan-Eisenelementen (Draht-

1) Hierdurch werden alle ultraroten Strahlen mit $\lambda > 1,2 \mu$ ausgeschlossen; anderseits halten Glaslinsen die ultravioletten Strahlen zurück.

2) Bei dem roten und dem blauen Strahlenfilter reducirt sich die verfügbare Energie auf ca. ein Fünftel derjenigen des weissen Lichtes; das ist ein Beweiss, dass die angewandte Strahlung fast ausschliesslich dem sichtbaren Gebiete angehörte.

dicke $d = 0,025$ mm), welche in einem Ebonitrahmen montirt und mit Glasplatten verschlossen waren; durch die Ausschläge eines d'Arsonvalgalvanometers wurde die relative Lichtintensität gemessen. Um das von der Linse L_2 (Fig. 1) kommende Lichtbündel in gleicher Weise zu schwächen, wurde eine entsprechende Glasplatte P_2 eingeschaltet. Die Controle der Lichtintensität geschah nur, wenn der Doppelspiegel $S_1 S_2$

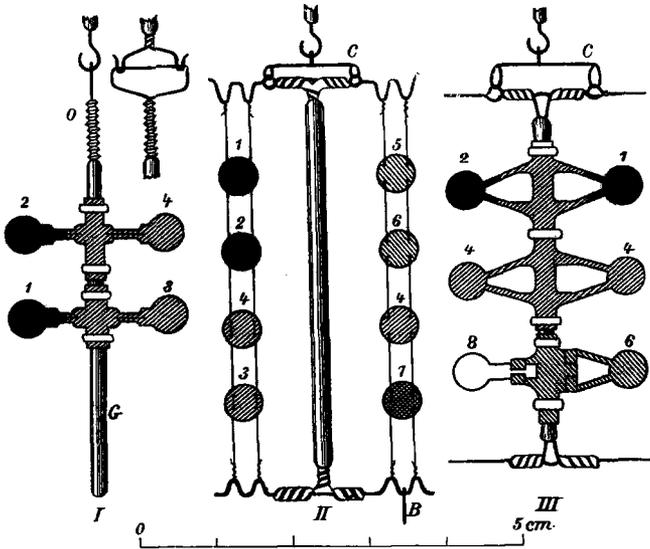


Fig. 3 (natürl. Grösse).

(Fig. 1) in der gezeichneten Lage stand; beim Verschieben des Doppelspiegels fällt kein Licht auf die Thermosäule und diese Stellung dient zur Bestimmung des Galvanometernullpunktes.

Es wurden *drei* verschiedene *Flügelapparate* (Fig. 3) verwendet.

Flügelapparat I (Fig. 3, I) bestand aus einem Glasstabe G , an welchem zwei aus verschieden dickem Platinblech verfertigte Kreuze mittels Platindrahringen (ohne Kitt) festgeklemmt waren; um die kreisrunden Scheibchen (Durchmesser gleich 5 mm) sämtlicher Apparate gleich gross zu machen,

diente eine Stahlstanze. Zwei Scheibchen waren von beiden Seiten blank, zwei andere von beiden Seiten platinirt¹⁾, hierbei der dickere fünfmal stärker wie der dünnere. Um den Apparat an den Doppelhaken der Torsionsvorrichtung aufzuhängen, diente eine an den Glasstab *G* angeschmolzene Platinöse *O*, welche senkrecht zur Richtung der Flügelarme stand, damit beim Einhängen der Glasstab *G* in der Ebene dieser Arme sich frei vertical einstelle.

Flügelapparat II (Fig. 3, II) bestand aus einem Glasstabe, an welchem Arme aus Platindraht angeschmolzen waren. Zwischen diesen Platinarmen waren dünne (0,05 mm) Platindrähte aufgespannt, welche durch kleine Löcher von je vier Metallscheibchen gingen und diese in verticaler Stellung in der Ebene der Platinarme festhielten; die tragenden Platindrähte waren so dünn, dass ihre radiometrische Wirkung vernachlässigt werden konnte. Der Flügelapparat war mit einer Cardani'schen Aufhängung *C* aus Platindraht versehen und mittels dieser an den Platinhaken des Torsionsfadens aufgehängt; die Verticalstellung des Glasstabes *G* wurde durch ein Zusatzgewicht *B* (Platindraht) gesichert.

Flügelapparat III war ähnlich wie Apparat I construirt und hatte eine Cardani'sche Aufhängung. Die Blechstreifen, welche an den Scheiben als Arme gelassen waren, hatten eine sehr geringe Breite (0,3 mm) und dennoch sicherten sie die Verticalstellung der Scheiben in genügender Weise; der Glimmerflügel (8) wurde durch eine Aluminiumfassung gehalten. Oben und unten waren noch Aluminiumarme angebracht, welche es verhinderten, dass während des Einhängens des Apparates die Flügel an die Glaswand des Ballonhalses anstossen.

Es wurden folgende Flügel untersucht:

1) Vgl. F. Kurlbaum, Wied. Ann. 67. p. 848. 1899. Es ist vorteilhaft, beim Beginn der Platinirung den Flügel im Bade während 30 Sec. ununterbrochen heftig zu bewegen: der Flügel bekommt eine schwach stahlgraue Oberfläche, auf welche sich bei nachheriger ruhiger Platinirung der Platinschwamm sehr gut setzt.

Nr.	Material
1	Platin, dick platinirt
2	„ fünfmal dünner platinirt
3	„ blank Dicke = 0,10 mm
4	„ „ „ = 0,02 „
5	Aluminium, blank „ = 0,10 „
6	„ „ „ = 0,02 „
7	Nickel, blank „ = 0,02 „
8	Glimmer „ < 0,01 „

Als *Torsionsvorrichtung* diente ein Glasfaden (Länge 30 cm), welcher unten einen Planspiegel trug und oben in einer *eisernen* Klemme im Innern des Quecksilberschliffes ¹⁾ (Fig. 4) im Ballonhalse eingefasst war; um den Torsionsfaden *ohne Kitt* zu befestigen, wurden seine Enden zwischen je zwei Stücke ausgeglühter Asbestpappe eingefasst und oben durch die Klemme gehalten, unten durch einen Platindrahtring an den Träger des Spiegels geklemmt.

Der Spiegel befand sich in einer dünnen, mit Platinchlorid geschwärzten Aluminiumfassung und wurde durch Kathodenzerstäubung platinirt, da selbst verdeckte Silberspiegel durch Quecksilberdämpfe bald vernichtet werden. Bei der schwachen Reflexion eines solchen Spiegels und bei der zwischengeschalteten gewölbten Wand des Glasballons hat sich die Scalenbeleuchtung nach Wellmann-Martens ²⁾ ganz vorzüglich bewährt.

Bei der Bestimmung der Directionskraft aus Schwingungsbeobachtungen wurde der Torsionsfaden aus dem Ballon herausgenommen, der Flügelapparat entfernt und der Faden mit einem Kupferdraht von 4,0 cm Länge und 0,314 g Masse belastet.

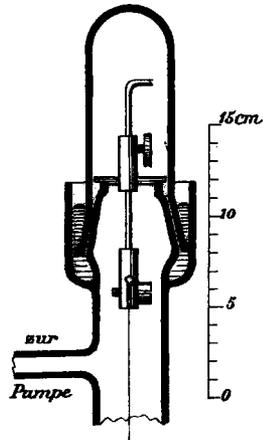


Fig. 4.

1) Alle Glasschliffe waren in tadelloser Ausführung von C. Kramer in Freiburg i. B. geliefert.

2) F. Martens, Wied. Ann. 62. p. 206. 1897; 64. p. 625. 1898. Bezogen von Schmidt & Haensch in Berlin.

Die Beobachtungen wurden mit drei verschiedenen Torsionsfäden durchgeführt, deren Directionskräfte so gewählt waren, dass man bei einem Scalenabstande von 1200 Sct. die blanken Flügel mit 40—90 Sct. Doppelausschlag beobachten konnte. Hierbei hatten die drei Flügelapparate die halben Schwingungsdauern von 15, 35 bez. 13 Sec.

Zur *Evacuierung* diente eine Kahlbaum'sche Pumpe¹⁾; die Messungen mit einem McLeod-Kahlbaum'schen Druckmesser²⁾ ergaben, dass ein Partialdruck der Luft von 0,0001 mm (kaum ein Fünfzehntel des Quecksilberdampfdruckes bei Zimmertemperatur) leicht erreicht werden konnte.

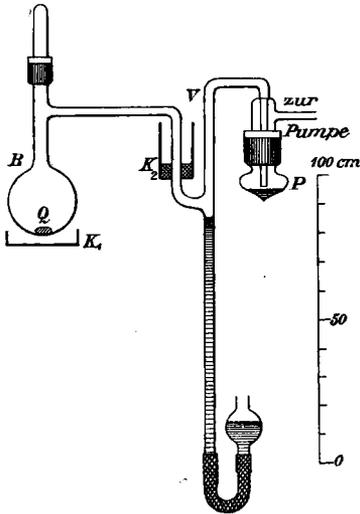


Fig. 5.

Um eine noch höhere *Evacuierung* zu erzielen, wurde das folgende Verfahren angewendet (Fig. 5): Etwas Quecksilber Q wurde auf den Boden des Ballons B gegossen, evacuirt und der Quecksilbertropfen durch ein untergestelltes Wasserbad K_1 auf ca. 5° C. über-Zimmertemperatur erwärmt; das Quecksilber destillirt in die ununterbrochen wirkende Pumpe und

führt die noch im Ballon vorhandene Luft mit sich. Schliesst man durch Heben des Quecksilbers im Barometerverschluss V den Ballon von der Pumpe und dem Trockengefäß P ab, so bleibt im Ballon nur Quecksilberdampf zurück: man kann nun in üblicher Weise durch Abkühlen mittels Eis und Kochsalz in K_1 und K_2 die Tension des zurückbleibenden Quecksilberdampfes sehr klein machen.

1) G. Kahlbaum, Wied. Ann. 53. p. 199. 1894. Der zum Vorpumpen dienende gefettete Hahn konnte nach dem Vorpumpen durch einen Barometerverschluss von der Pumpe abgeschlossen werden; das Fallrohr hatte einen eisernen Einsatz. Bezogen von C. Kramer in Freiburg i. B.

2) G. Kahlbaum, Zeitschr. f. Instrumentenk. 15. p. 192. 1895.

Die auf den Flügel fallende *Energiemenge der Strahlung* wurde calorimetrisch gemessen: die Lampe mit dem Spiegelapparat (Fig. 1) wurde auf dem Schlitten so weit zurückgezogen, dass der Flügelapparat durch ein Diaphragma *D* (Fig. 6 oder Fig. 7) ersetzt werden konnte, welches genau so gross war wie jeder Flügel ($d = 5$ mm); alle Strahlen, welche durch das Diaphragma *D* gingen, wurden von einem Calorimeter absorbiert. Eine Glasscheibe *G* compensirte bei diesen Messungen die Reflexion an der Glaswand des Ballons; sie war jedoch

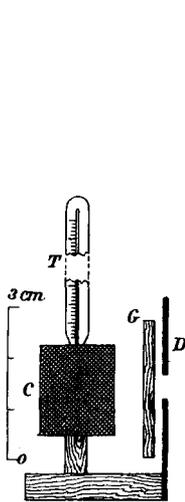


Fig. 6.

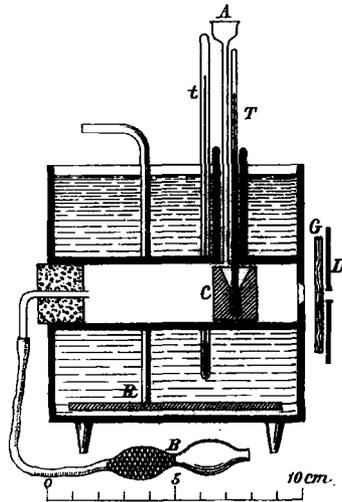


Fig. 7.

zwischen dem Diaphragma und dem Calorimeter eingeschaltet, um die Wärmestrahlung des Diaphragmas abzuhalten.

Das erste Calorimeter (Fig. 6) bestand aus einem *Kupferblock C*, in dessen verticaler, mit Quecksilber gefüllter Bohrung sich das Gefäss eines kleinen in $\frac{1}{5}^{\circ}$ C. getheilten Thermometers *T* befand; die absorbirende Fläche war berusst. Der berechnete Gesamtwasserwert des Calorimeters (die spezifische Wärme des Kupfers gleich 0,093 angenommen) war 3,13 g.

Das zweite Calorimeter (Fig. 7) war ein *Kupfercylinder* ähnlicher Construction mit einem Gesamtwasserwert von 3,61 g; seine absorbirende Fläche war vergoldet und hierauf platinirt; er befand sich in einem Messingrohre im Innern eines Wasser-

bades von ca. 1 Liter Inhalt, welches mit einem Rührer *R* versehen war. Um das Calorimeter vor Beginn der Versuche unter die Wasserbadtemperatur abzukühlen, wurden durch das Glasrohr *A* einige Tropfen Aethyläther in die conische Bohrung des Calorimeters gegossen und mittels eines Gummigebläses *B* ein starker Luftstrom durch die Messinghülle geschickt.

Die Messungen ergaben, dass die auf das Diaphragma ($d = 5$ mm) fallende Energiemenge der Strahlung 1,2 bis 1,8 g-Cal. pro Minute beträgt, d. h. dass diese Intensität etwa das Doppelte bis das Dreifache der Gesamtstrahlung der Sonne an der Erdoberfläche ausmacht.

Zur Messung des Reflexionsvermögens der untersuchten Metallbleche diente ein Photometer nach Ritchie (Fig. 8).

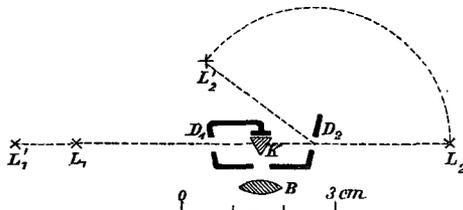


Fig. 8.

Das Licht zweier kleinen Glühlampen L_1 und L_2 fiel durch zwei Diaphragmen D_1 und D_2 (Durchmesser 3 mm) auf ein kleines Prisma K aus Kreide, deren Schneide mit einer Lupe B beobachtet wurde; durch Verschiebung der Lampe L_1 wurde auf gleiche Helligkeit eingestellt. Hierauf wurde die Lampe L_2 um ca. 130° nach L_2' gedreht, das Diaphragma D_2 durch das zu untersuchende Metallblech von aussen verschlossen und wiederum durch Verschieben der Lampe L_1 nach L_1' auf gleiche Helligkeit eingestellt. Für den angewandten Einfallswinkel von 25° ergab sich das Reflexionsvermögen ρ des Metallbleches $\rho = (K L_1 : K L_1')^2$.

III. Die Versuche.

Die oben beschriebene Versuchsanordnung gestattet zwei fundamentale Fragen experimentell zu beantworten:

1. ob die Lichtstrahlung Kräfte ausüben kann, die unabhängig von den bereits bekannten secundären (convectiven und radiometrischen) Kräften sind, und

2. ob diese ponderomotorischen Kräfte des Lichtes den von Maxwell und Bartoli berechneten Druckkräften entsprechen.

Vor Beginn der Untersuchung wurde ein Hilfsthermo-
element (welches mit einem d'Arsonvalgalvanometer verbunden
war) längs der Axen beider Linsen L_1 und L_2 (Fig. 1) ver-
schoben und ihre Brennweiten für die Hauptstrahlung be-
stimmt; hierauf wurden die Spiegel und die Linsen des Appa-
rates (Fig. 1) so justirt, dass die reellen Diaphragmenbilder
der von rechts und von links kommenden Strahlen auf dieselbe
Stelle fielen.

Um die Intensität beider Lichtbündel zu vergleichen, wurde
das Hilfsthermo-
element an die Stelle der reellen Diaphragmen-
bilder aufgestellt und abwechselnd von rechts und von links
belichtet; aus einer grossen Zahl von Einzelmessungen ergab
sich gewöhnlich eine geringe (kaum 1 Proc. betragende) Diffe-
renz: bei der grossen Anzahl reflectirender Glasflächen genügt
schon ein unsymmetrisches Abstäuben, um eine ähnliche Inten-
sitätsdifferenz hervorzurufen.

Verschiebt man das Thermo-
element um $\pm 0,5$ cm von
seiner ursprünglichen Lage in der Richtung der Lichtkegelaxe,
im Bereiche, in welchem die Einstellung auf den Flügelapparat
unsicher sein kann, so nimmt die Lichtintensität für beide
Bestrahlungsrichtungen um ca. 5 Proc. ab. Die beschriebenen
Voruntersuchungen sind unbedingt notwendig.

Der Flügelapparat wurde so eingehängt, dass die von der
Lampe kommenden Strahlen, welche von der concaven Glas-
fläche des Ballons zurückgeworfen werden, nicht Teile des
Flügelapparates belichten konnten.

Nachdem der Flügelapparat eingehängt war, wurde der
Ballon verschlossen und während mehrerer Tage hoch evacuirt,
zuletzt unter gelinder Erwärmung der ganzen Glashülle und
beim Belichten der einzelnen Flügelscheiben. Vor jeder Ver-
suchsreihe wurde der untere Teil des Glasballons, wo sich das
Quecksilber befindet, auf ca. 5° C. über Zimmertemperatur
im Wasserbade erwärmt¹⁾, während 1—2 Stunden weiter aus-

1) Bei dieser kleinen Temperaturdifferenz schlägt sich kein Quecksilber
auf die kälteren Teile des Apparates nieder, eine Erscheinung, die für
nicht benetzbare Oberflächen von M. Cantor (Wied. Ann. 56. p. 493.
1895) nachgewiesen ist.

gepumpt, dann durch den Barometerverschluss V (Fig. 5) abgeschlossen und durch Eis mit Kochsalz gekühlt.

Die hauptsächlichliche Unsicherheit der Messungen wird durch Störungen, welche von der Convection herrühren, verursacht; sie machen sich durch stetige Verschiebungen des Nullpunktes geltend, deren Grösse und Richtung von zufälligen¹⁾ Umständen abhängen, jedoch während der Dauer einer Messung hinreichend klein sind und durch längere Beobachtungsreihen eliminirt werden können; die Convection des Quecksilberdampfresiduums wird sowohl durch die Erwärmung des belichteten Flügels als auch durch äussere ungleichmässige Erwärmungen der Ballonwände und namentlich durch Temperaturdifferenzen der beiden Quecksilberoberflächen hervorgerufen. Versucht man ohne Abkühlung des Quecksilbers zu beobachten, so machen sich erhebliche²⁾ Störungen durch Convection geltend, während sie bei Eis- und Kochsalzkühlung viel geringer werden.

Ein anderer Grund der Unsicherheit liegt in der ungenügenden Constanz der Lichtquelle³⁾; plötzliche Schwankungen der Lichtintensität geben sprungweise Aenderung der Schwingungsamplitude des Flügelapparates; sie lassen sich nur durch Häufung der Beobachtungen umgehen.

Der Beobachter konnte durch zwei passend aufgestellte Fernrohre abwechselnd den Flügelapparat und das Galvanometer ablesen; ein Gehülfe, der die Bogenlampe bediente, verschob nach Commando den Doppelspiegel $S_1 S_4$ (Fig. 4). Durch intermittirende Beleuchtung konnte die Schwingungsamplitude des Flügelapparates auf eine gewünschte Grösse gebracht werden.

Tab. I giebt den Anfang eines Beobachtungsprotocolles wieder.

1) Bei den Untersuchungen desselben Flügels an verschiedenen Tagen konnten die Grösse und die Richtung der Nullpunktswanderung ganz verschieden ausfallen.

2) Bei höheren Gasdrucken werden die Beobachtungen durch Convection sehr unsicher gemacht und lassen zuverlässig Messungen kaum zu.

3) Siemens „A“-Kohlen haben sich gut bewährt; mit minderwertigen Kohlen sind die Messungen kaum durchführbar.

Tabelle I.

Apparat III. Platinirter Flügel (2).

Abstand des Scheibencentrums von der Rotationsaxe $a = 9,2$ mm.

Kühlung mit Eis und Kochsalz. Scalenabstand $A = 1195$ Sct.

R		L		R		L		R
	ber.		ber.		ber.		ber.	
176	306	115	206	295	184	245	307	174
	240		207				303	177
	239	302	118	207	296	184	243	300
177	239		208	296	184	243	300	180
	240	302	124	209				
178					294	189		
	240		208				244	212
Ablenk.		32 Sct.		36 Sct.		32 Sct.	
<i>Gb</i>		<i>Gn</i>		<i>Gb</i>		<i>Gn</i>		<i>Gb</i>
308				314				.
305				312				.
312		201		314		201		.
314				316				.
310				314				.
Galv.		109 Sct.		113 Sct.		113 Sct.	
Ablenk. } reduc. } ($G = 100$) }		29,3 Sct.		31,8 Sct.		28,3 Sct.	

Hierin bedeuten:

R und L die Umkehrpunkte auf der Scala, wenn das Licht von rechts (R) oder links (L) auffällt. Die Mittelreihen „ber.“ geben die aus je drei anliegenden Umkehrpunkten berechnete Ruhelage. Die „Ablenk.“ geben die Ablenkungen des Systems, wenn die Belichtung von rechts nach links gewechselt wird.

Gb und Gn geben die Einstellungen des Galvanometers wenn die Thermosäule belichtet wird bez. unbelichtet bleibt (Galvanometernullpunkt). Unter „Galv.“ sind die Galvanometerausschläge angeführt.

„Ablenk. reduc. ($G = 100$)“ sind die oben genannten Ablenkungen, auf einen constanten Galvanometerausschlag von 100 Sct. reducirt.

In der aus Tab. I ersichtlichen Weise wurden für jeden Flügel sieben *R*- und *L*-Beobachtungen gemacht und die erhaltenen „Ablenk. reduc.“ zu einem Gesamtmittel vereinigt, mit Angabe der mittleren \pm Abweichung aller Einzelbeobachtungen vom Gesamtmittel. (Für den Flügel der Tab. I Doppelausschlag gleich $29,4 \pm 1,6$ Sct.)

Um die Messungen, welche mit einzelnen Scheiben gemacht wurden, übersichtlicher miteinander vergleichen zu können, sind noch gewisse Reductionsrechnungen erforderlich.

Bei den Apparaten I und III fällt ein Lichtsaum (von ca. 3 mm Breite) auf die tragenden Arme, welcher den Ausschlag vergrößert; durch Ausmessung der belichteten Teile und ihres Axenabstandes lässt sich dieser Betrag, welcher bei verschiedenen Flügeln 5—10 Proc. ausmacht, berechnen und in Abzug bringen: wir erhalten dann die Ablenkung, welche durch die kreisrunde Scheibe allein hervorgebracht wird. (Apparat II ist frei von dieser Correctionsrechnung.) Für den Flügel der Tab. I würde diese Correction 1,9 Sct. betragen; der berechnete Doppelausschlag wäre 27,5 Sct.

Die Messungen der Abstände der Scheibenmittelpunkte von der Rotationsaxe wurden in folgender Weise ausgeführt: der Spiegelapparat (Fig. 1) wurde auf dem Schlitten zurückgezogen, von der Seite des auffallenden Lichtes wurde dicht vor dem Ballon ein Senkel aus dünnem Silberdraht aufgehängt, ein Fernrohr senkrecht zu den Flügelarmen in ca. 4 m Entfernung aufgestellt und der Senkel so lange verschoben, bis er mit dem Torsionsfaden zusammenzufallen schien; das Fernrohr hatte ein Ocularmikrometer, welches mit Hilfe eines dicht bei dem Ballon aufgestellten Maassstabes ausgewertet wurde; die scheinbare Entfernung des Scheibencentrums vom Senkel, welche der wahren Entfernung von der Rotationsaxe entspricht, konnte auf 0,5 mm genau bestimmt werden; die Grössen dieser Entfernungen lagen zwischen 9 und 11 mm.

Unter Zugrundelegen dieser Messungen wurden die beobachteten Ausschläge auf solche reducirt, welche für einen Axenabstand von genau 1 cm gelten würden. Für den Flügel der Tab. I beträgt der reducirte Doppelausschlag 29,9 Sct.

Um die Grösse des beobachteten Druckes, welchen das Licht auf den untersuchten Flügel ausübt, im absoluten Maasse

auszudrücken, wurde eine Messung der Directionskraft des Aufhängefadens mittels Schwingungsbeobachtungen ¹⁾ ausgeführt, indem die Schwingungsdauern aus je drei Beobachtungsreihen von je 10 Schwingungen erhalten wurden.

Tabelle II.

Halbe Schwingungsdauer:	Trägheitskörper:
Spiegel allein $\frac{\tau_1}{2} = 5,1 \pm 0,05 \text{ sec}$	Kupferdraht
Spiegel + Trägheitskörper $\frac{\tau_2}{2} = 29,4 \pm 0,1 \text{ sec}$	Länge = 4,0 cm
	Masse = 0,314 g
Directionskraft $D = 0,00494 \text{ Dynes-cm.}$	

Unter Zugrundelegen dieser Directionskraft erhalten wir für den Flügel der Tab. I die Grösse des Druckes bei *einseitiger* Belichtung in *Dynes* ausgedrückt:

$$p = 0,0000308 \text{ Dynes} \pm 0,0000017 \text{ Dynes.}$$

Um die von Maxwell und von Bartoli aufgestellte Beziehung zu prüfen, sind die Druckkräfte zu *berechnen*, welche die bei den Versuchen angewandte Lichtstrahlung nach Maxwell-Bartoli ausüben müsste, und diese Berechnung mit den Versuchsergebnissen zu vergleichen. Hierzu ist eine calorimetrische Energiemessung und eine photometrische Bestimmung des Reflexionsvermögens der untersuchten Flügel erforderlich.

Bei den Messungen mit dem ersten Calorimeter (Fig. 6) wurde in folgender Weise verfahren: der Spiegelapparat (Fig. 1) wurde auf dem Schlitten so weit zurückgezogen, dass der Flügelapparat durch das Calorimeterdiaphragma D ersetzt werden konnte. Hierauf wurde das Calorimeter während 5 Minuten belichtet und von Minute zu Minute das Thermometer (und inzwischen auch das Galvanometer) abgelesen, dann durch einen Schirm die Bestrahlung unterbrochen und während der folgenden 5 Minuten von Minute zu Minute der Rückgang des Thermometers (und die Nulllage des Galvanometers) beob-

1) Vgl. F. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, § 29 und Anm. 11 u. 12. B. G. Teubner, Leipzig 1901.

achtet. Eine vollständige Beobachtungsreihe umfasste fünf aufeinander folgende Belichtungen.

Alle Beobachtungen wurden graphisch behandelt, indem die Ablesungen des Thermometers auf Coordinatenpapier aufgetragen und durch eine möglichst glatte Curve verbunden wurden (Fig. 9); es ist ersichtlich, dass schon nach 10 Sec. der Gang des Thermometers die Bestrahlung oder die Abblendung durch einen Umkehrpunkt angiebt.

Die sehr grosse Abkühlungsgeschwindigkeit des Calorimeters erfordert eine besondere Behandlung, denn selbst im Intervalle einer Beobachtung ist weder die Erwärmungs- noch die Abkühlungsgeschwindigkeit eine Constante. Für eine be-

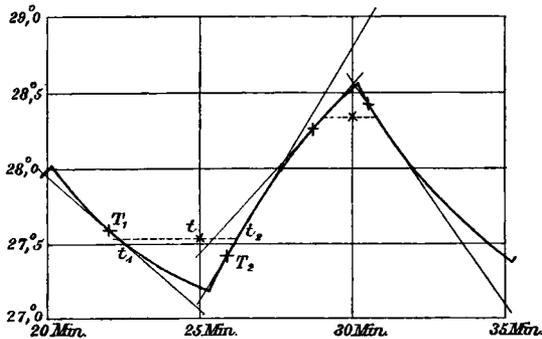


Fig. 9.

stimmte mittlere Temperatur der *Oberfläche* des Calorimeters haben beide Geschwindigkeiten constante Werte, welche durch Tangenten — die sich leicht in die Figur einzeichnen lassen — dargestellt werden: für diese constanten Werte geben die Schnittpunkte der Tangenten mit den Grenzzordinaten die Temperaturdifferenzen, welche in 5 Minuten erreicht sein *würden*, wenn beide Geschwindigkeiten constant *wären* und die Summe beider Differenzen giebt die totale, auf Verluste corrigirte Temperaturerhöhung des Calorimeters.

Hier tritt aber eine Unsicherheit in der Schätzung der wahren mittleren Temperatur der Oberfläche ein: das Thermometer bleibt etwas hinter dieser Temperatur zurück, indem es beim Belichten eine *niedrigere* Temperatur und beim Abkühlen eine *höhere* Temperatur angiebt. Die Thatsache, dass das Thermometer nach 10 Sec. einen Umkehrpunkt angiebt, lässt

als erste und für unsere Versuche genügende Annäherung die Annahme zu, dass das Thermometer um 20 Sec. nachgeht; für eine Oberflächentemperatur t würden demnach nicht die Curvenpunkte t_1 und t_2 zu vergleichen sein, sondern die um 20 Sec. zurück datirenden Curvenpunkte T_1 und T_2 .

Solche graphische Bestimmungen wurden für zwei Temperaturen bei jeder Erwärmung ausgeführt; Tab. III giebt eine Messungsreihe wieder.

Tabelle III.

Calorimeter I. Wasserwert = 3,13 g.

	Erwärmungs- geschwindig- keit	Abkühlungs- geschwindig- keit	Totale Erwärmung	Galvano- meter- ausschlag	Reducirte totale Erwärmung ($G = 100$)
I	1,67°	0,63°	2,30°	140 Sct.	1,64°
	1,49	0,80	2,29	128	1,79
II	1,44	0,85	2,29	128	1,79
	1,31	1,10	2,40	122	1,97
III	1,38	1,08	2,46	129	1,91
	1,00	1,37	2,37	126	1,88
IV	1,30	1,15	2,45	123	1,99
	1,04	1,45	2,49	127	1,96
V	1,26	1,27	2,54	129	1,97
	0,93	1,50	2,43	126	1,93

Totale Erwärmung in 5 Min. ($G = 100$) $1,88^\circ \pm 0,09^\circ$

Mit dem zweiten Calorimeter (Fig. 7) waren die Messungen viel einfacher: das Calorimeter wurde mit Aethyläther abgekühlt, hierauf bestrahlt und das Thermometer von Minute zu Minute (inzwischen das Galvanometer und die Temperatur des Bades) abgelesen. Die Beobachtungen wurden graphisch aufgetragen, der Punkt markirt, für welchen die Temperatur des Calorimeters mit der des Bades zusammenfällt (unter Berücksichtigung, dass das Thermometer um ca. 20 Sec. nachgeht) und für diesen Punkt sowohl die Tangente der wahren Erwärmungsgeschwindigkeit gezogen, als auch die Differenz der um 2,5 Min. abstehenden Thermometereinstellungen ge-

nommen. Eine solche Beobachtungsreihe wurde dreimal wiederholt; die Tab. IV giebt eine solche Messungsreihe wieder.¹⁾

Tabelle IV.
Calorimeter II. Wasserwert = 3,61 g.

	Temperaturerhöhung in 5 Minuten		Mittelwert	Galvanometerauschlag	Reducirte Temperaturerhöhung (G = 100)
	Tangenten	Differenzen			
I	2,40°	2,41°	2,40°	159 Sct.	1,51°
II	2,55	2,57	2,56	163	1,57
III	2,43	2,50	2,46	158	1,56

Mittlere Temperaturerhöhung in 5 Min. (G = 100) $1,55^\circ \pm 0,02^\circ$

Hieraus giebt sich die pro Secunde auffallende Energiemenge

$$E = \frac{1,55^\circ \cdot 3,61 \cdot 4,18 \cdot 10^7}{300} = 7,74 \cdot 10^5 \text{ Ergs.}$$

Die Strahlen fallen bei unseren Versuchen nicht parallel auf, sondern in einem convergenten Strahlenbüschel; die geringe Neigung der auffallenden Strahlen würde eine Correction²⁾ (von ca. 1 Proc.) erfordern, welche den übrigen Unsicherheiten der Messungen gegenüber zu vernachlässigen ist. Wir können die Berechnung hinreichend genau nach der von Maxwell und von Bartoli für ein Parallelstrahlenbündel geltenden Formel ausführen.

Für einen absolut schwarzen Körper würde sich unter Zugrundelegen des Wertes aus Tab. IV der Druck ergeben:

$$p = \frac{E \text{ (Ergs)}}{3 \cdot 10^{10}} = 0,0000258 \text{ Dynes.}$$

Um die gewonnenen Resultate übersichtlich zusammenzufassen, wurde als arbiträre *Einheit* der aus calorimetrischen Messungen berechnete Wert des Maxwell-Bartoli'schen Druckes für einen *absolut schwarzen Körper* gewählt und diese Einheit als „*MB-Einheit*“ bezeichnet.

1) Die Resultate der Tab. III und Tab. IV können *nicht* miteinander direct verglichen werden, da sie sich auf *verschiedene* Justirungen der Thermobatterie beziehen.

2) Vgl. L. Boltzmann, Wied. Ann 22. p. 292. 1884 bez. D. Goldhammer, l. c. p. 844.

In diesen Einheiten ausgedrückt würde das Resultat der Tab. I lauten:

$$p = \frac{0,000\,0308 \pm 0,000\,0017}{0,000\,0258} = (1,19 \bullet 0,07) MB.$$

Eine directe Messung des Reflexionsvermögens der angewandten Flügel wurde durch die Unebenheiten der dünnen Metallbleche vereitelt. Ich habe deshalb mit dem Photometer (Fig. 8) das Reflexionsvermögen von den Blechen bestimmt, aus welchen die Flügel verfertigt wurden; auch bei diesen machten sich die Unebenheiten stark geltend, sowie eine (namentlich bei Nickel) ausgeprägte Färbung des reflectirten Lichtes; das für 25° Einfallswinkel beobachtete Reflexionsvermögen ist deshalb ohne weitere Reductionen in der Tab. V angeführt und daraus die zu erwartenden Druckkräfte des Lichtes in *MB*-Einheiten berechnet. Zum Vergleiche ist das Reflexionsvermögen vollkommen spiegelnder Flächen für normale Incidenz ($\lambda = 600 \mu\mu$) nach Hagen und Rubens¹⁾ und die daraus berechneten Druckkräfte angegeben (wobei die Zahlen des Magnaliums für Aluminium eingesetzt sind).

Tabelle V.

	Photometrische Messungen		Nach Hagen und Rubens	
	ϱ	p	ϱ	p
Platin	0,5 \pm 0,05	1,5 <i>MB</i>	0,64	1,64 <i>MB</i>
Aluminium	0,6 \pm 0,05	1,6	0,83	1,83
Nickel	0,35 \pm 0,05	1,4	0,65	1,65

Für Glimmer habe ich die Berechnungen unterlassen, weil die Beobachtungen nur an einem Flügel gemacht wurden und eine Controle durch einen dickeren Flügel fehlt.

Im Folgenden sind die Resultate der einzelnen Versuchsreihen, welche ich mit den drei Flügelapparaten angestellt habe, angeführt. Als ich von den unregelmässig schwankenden Ergebnissen der Untersuchung bei Zimmertemperatur zu Messungen bei Abkühlung überging, hoffte ich keine so grosse Uebereinstimmung der Versuche mit den Berechnungen nach Maxwell-Bartoli zu erhalten, wie sie sich bei den ersten

1) E. Hagen u. H. Rubens, Ann. d. Phys. 1. p. 373. 1900.

Versuchen mit dem Apparat II ergab; ich glaubte anfangs, dass diese Uebereinstimmung eine zufällige sei und habe deshalb das Calorimeter I durch das Calorimeter II ersetzt und hierauf den Apparat II durch den Apparat III.

Die zahlreichen Bestimmungen, welche ich mit dem Apparate I bei Zimmertemperatur ausgeführt habe, stehen den späteren Messungen wesentlich nach und sind deshalb nicht angeführt. Nicht angeführt sind auch die Messungen mit dem Flügel (2) des Apparates II, weil eine nachträgliche mikroskopische Untersuchung eine ungenügende schwammige Platinirung erkennen liess. Mit dem Apparat III wurden leider nur zwei Messungsreihen ausgeführt, weil hernach die Anordnung durch einen Unfall zerstört wurde.

Die Resultate sind in *MB-Einheiten* ausgedrückt; es ist unter jedem Werte auch die mittlere Schwankung der Einstellung des Flügelapparates in den nämlichen Einheiten angegeben, wobei alle unter 0,15 *MB* betragenden Schwankungen durch 0,1 *MB*, alle unter 0,25 *MB* durch 0,2 *MB* etc. bezeichnet sind.

Resultate.

		I. App.		II. Apparat						III. Apparat		
		I. Calorimeter		II. Calorimeter								
		Weiss	Weiss	Weiss	Rot	Weiss	Blau	Weiss				
1	Dick platin. Flügel	1,8 ± 0,2	1,6 ± 0,1	1,5 ± 0,1	—	—	—	—	—	—	1,5 ± 0,1	1,4 ± 0,1
2	Dünn platin. Flügel	1,3 ± 0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	1,2 ± 0,1	1,1 ± 0,1
	Berechnet	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	1,1	1,0
3	Platin, dick . . .	—	1,8 ± 0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	Platin, dünn . . .	—	2,0 ± 0,1	1,9 ± 0,2	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,1	(1,8 ± 0,8)	1,7 ± 0,1	(1,5 ± 0,5)	—	1,7 ± 0,1	2,0 ± 0,1
5	Aluminium, dick . . .	—	—	2,3 ± 0,4	1,9 ± 0,1	—	—	—	—	—	—	—
6	Aluminium, dünn . . .	—	—	2,0 ± 0,1	2,3 ± 0,1	2,0 ± 0,2	(2,9 ± 0,8)	2,1 ± 0,1	(2,5 ± 0,5)	—	1,4 ± 0,2	1,7 ± 0,1
7	Nickel, dünn . . .	—	—	1,7 ± 0,3	1,2 ± 0,2	1,4 ± 0,1	(2,3 ± 0,5)	1,4 ± 0,2	(2,7 ± 0,9)	—	—	—
8	Glimmer	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,08 ± 0,05	0,13 ± 0,03

Zur Beurteilung der Genauigkeit der Schlussresultate mögen die folgenden Schätzungen dienen: Die Schwankungen der Ablenkung sind in der Tabelle angegeben; die aus der Ablenkung sich ergebende Grösse des Druckes im absoluten Maasse (Directionskraft des Fadens, Scalenabstand, Hebelarm des Flügels und Correctionen auf die bestrahlte Fläche) lassen sich mit einer Genauigkeit von ± 8 Proc. bestimmen; die Berechnung des absoluten Wertes der *MB*-Einheit aus calorimetrischen Messungen (Wasserwert, Temperaturerhöhung des Calorimeters und das nahe gleich 1 betragende Verhältnis des Diaphragmas zum Flügel) ist wohl auf ± 7 Proc. genau; die Unsicherheit in der Bestimmung des Reflexionsvermögens beträgt ca. 10 Proc. Diesen Unsicherheiten der Messungen superponiren sich noch die Ungenauigkeiten in der Einstellung des Flügels auf die Mitte des reellen Diaphragmenbildes und die Möglichkeit, dass die Wärmestrahlung eines belichteten Flügels durch die Ballonoberfläche auf andere Teile des Flügelapparates concentrirt wird und diese Erwärmung sich bei jeder Schwingung des Flügelapparates ändert. Für weisses Licht würde der noch zulässige absolute Fehler der Messung auf ca. ± 20 Proc. zu schätzen sein.¹⁾

Bei Versuchen mit rotem und blauem Lichte, wo die verfügbare Strahlungsenergie kaum ein Fünftel der bei weissem Lichte beträgt, sind die Störungen durch Convection die nämlichen und deshalb die Unsicherheiten entsprechend grösser; dasselbe gilt auch für die sehr kleinen (kaum 4 Sct. Doppelausschlag betragenden) Ablenkungen bei Glimmer. Diese Controlversuche genügen aber dennoch, um festzustellen, dass auch in diesen Fällen keine neue ponderomotorische Wirkung des Lichtes auftritt, welche mit den Maxwell-Bartoli'schen Kräften vergleichbar wäre.

Ausserdem habe ich mehrfach vergleichende Versuche mit dicken und dünnen Platin- und Aluminiumflügeln gemacht; es ist mir aber nicht gelungen, mit Sicherheit eine merkliche radiometrische Differenz festzustellen; innerhalb der Beobach-

1) Eine Verfeinerung der einzelnen Messungsmethoden würde die Sicherheit der erzielten Resultate nur dann wesentlich erhöhen, wenn in erster Linie die Bogenlampe durch eine andere constante Lichtquelle ersetzt sein würde.

tungsfehler ist deshalb die radiometrische Wirkung bei dünnen Metallflügeln gleich Null zu setzen.

Die erhaltenen Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Ein auffallendes Lichtbündel übt sowohl auf einen absorbirenden als auch auf einen reflectirenden Körper einen Druck aus; diese ponderomotorische Wirkung ist unabhängig von den bereits bekannten, secundären, durch Erwärmung hervorgerufenen Crookes'schen Kräften und den Erscheinungen der Convection.

2. Diese Druckkräfte des Lichtes sind der auffallenden Energiemenge direct proportional und unabhängig von der Farbe des Lichtes.

3. Diese Druckkräfte des Lichtes stimmen innerhalb der Versuchsfehler quantitativ mit den von Maxwell und von Bartoli berechneten ponderomotorischen Kräften der Strahlung überein.

Hierdurch ist die Existenz der Maxwell-Bartoli'schen Druckkräfte für Lichtstrahlen experimentell erwiesen.

Moskau, Physik. Laborat. d. Univ., im August 1901.

(Eingegangen 23. August 1901.)
