

ANNALEN  
DER  
PHYSIK UND CHEMIE.

BEGRÜNDET UND FORTGEFÜHRT DURCH

F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF.

NEUE FOLGE.

BAND 65.

DER GANZEN FOLGE 301. BAND.

UNTER MITWIRKUNG

DER PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT ZU BERLIN

UND INSBESONDERE VON

M. PLANCK

HERAUSGEGEBEN VON

G. UND E. WIEDEMANN.

MIT FÜNF FIGURENTAFELN.



LEIPZIG, 1898.

VERLAG VON JOHANN AMBROSIOUS BARTH.

4. *Ueber eine Methode zur Bestimmung der Strahlung in absolutem Maass und die Strahlung des schwarzen Körpers zwischen 0 und 100 Grad<sup>1)</sup>; von F. Kurlbaum.*

(Mittheilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

Die gebräuchliche, an Langley sich anlehrende Anordnung bolometrischer Messungen ermöglicht nur vergleichende Bestimmungen. Durch das folgende, wesentlich geänderte Verfahren habe ich die von dem Bolometer absorbirte Wärmemenge direct auf eine Stromwärmemenge zurückgeführt und somit absolut messbar gemacht. Die Methode wird angewandt auf die Messung der von einem absolut schwarzen Körper ausgesandten Strahlung.

Das Princip der Methode ist kurz folgendes: Drei Zweige einer Wheatstone'schen Brücke bestehen aus dicken Drähten, während nur der vierte einen Bolometerstreifen enthält. Da das Bolometer durch den Strom erheblich erwärmt wird, so hängt sein Widerstand von der Stromstärke ab, welche zur Messung benutzt wird, während die dicken Drähte ihren Widerstand nicht ändern. Zunächst wird der Widerstand  $W_1$  des Bolometerstreifens bei einer Stromstärke  $J_1$  gemessen, dann wird das Bolometer bestrahlt und sein Widerstand  $W_2$  gemessen. Darauf wird die Strahlungsquelle entfernt und die Stromintensität bis zu einem solchen Betrage  $J_2$  vergrößert, dass das Bolometer durch die Stromwärme allein denselben Widerstand  $W_2$  erreicht. Die im ersten Fall durch Strahlung aufgenommene Wärmemenge ist also gleich der im zweiten Fall durch Strom erzeugten Wärmemenge und also gleich  $(W_2 J_2^2 - W_1 J_1^2) C$ , worin  $C$  das electrothermische Aequivalent bedeutet. Es dient also der Strom, welcher den Bolometerstreifen während der Messung seines Widerstandes durchläuft, auch dazu, den Streifen auf eine gewünschte Temperatur zu bringen.

1) Vgl. F. Kurlbaum, Wied. Ann. 51. p. 591, 1894.

## Apparate.

Bolometer, Galvanometer und Hülfs widerstände sind die gleichen, wie die in einer früheren Arbeit benutzten.<sup>1)</sup> Es ist nur eine Aenderung für den vorliegenden Zweck an den Bolometern angebracht. Die Oberflächengrösse eines aus schmalen Streifen bestehenden Bolometers lässt sich nicht genau messen, da die Breite eines Streifens nicht wesentlich genauer als auf 0,01 mm bestimmt werden kann. Breite Streifen zu benutzen ist aus anderen Orts erwähnten Gründen unvortheilhaft. Deshalb wurden zwei Bolometer so hintereinander gestellt, dass von der Strahlungsquelle aus gesehen die Intervalle des vorderen Bolometers durch die Streifen des hinteren vollkommen ausgefüllt wurden.

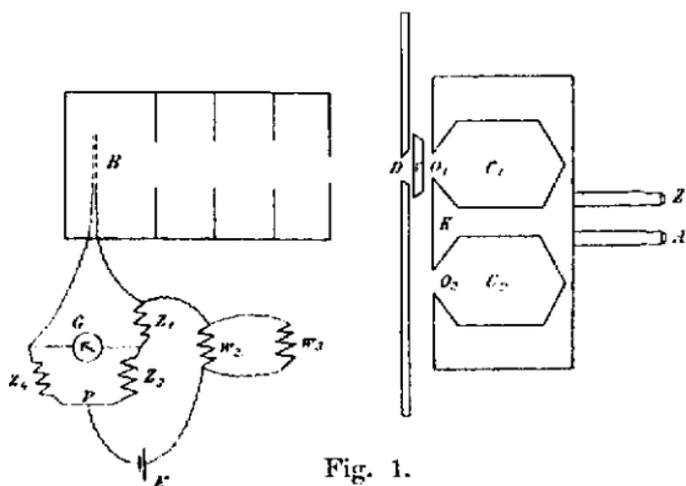


Fig. 1.

Das hintere Bolometer hat daher einen Streifen weniger und als Gesamtfläche gilt einfach die Fläche des vorderen Bolometers einschliesslich der Fläche der Intervalle, während das vordere Bolometer auch allein maassgebend für den Abstand von der Strahlungsquelle ist.

Die Strahlungsquelle war ein schwarzer Körper, welcher nach dem von den Herren W. Wien und O. Lummer<sup>2)</sup> an-

1) F. Kurlbaum, Wied. Ann. 61. p. 420. 1897, hier mit l. c. bezeichnet. Die Herstellung der Bolometer entspricht Wied. Ann. 46. p. 204 bis 224. 1892 und Verhandl. d. physik. Gesellsch. zu Berlin, 14. Juni 1895.

2) W. Wien u. O. Lummer, Wied. Ann. 56. p. 451—56. 1895; vgl. auch E. St. John, Wied. Ann. 56. p. 450. 1895; C. Christiansen, Wied. Ann. 21. p. 364—69. 1884; L. Boltzmann, Wied. Ann. 22. p. 35. 1884; O. Lummer u. E. Pringsheim, 63. p. 395—410. 1897.

gewandten Princip in möglichst einfacher Form hergestellt ist. Fig. 1 zeigt den Körper in einem Horizontalschnitt,  $C_1$  und  $C_2$  sind zwei Messingcylinder mit trichterförmigem Boden, welche nur bei  $O_1$  und  $O_2$  Oeffnungen besitzen.  $C_1$  ist innen blank,  $C_2$  mit einem aus Russ hergestellten Mattlack überzogen. Die Cylinder befinden sich in einem Messingkasten, in den der Dampf siedenden Wassers bei  $Z$  eingeleitet werden kann, während Dampf und Condenswasser bei  $A$  in einen Kühlraum abfließen. Die Stelle  $K$  des Kastens ist äusserlich gleichfalls geschwärzt, die Strahlungsgefässe können auch auf die Temperatur des schmelzenden Eises gebracht werden.

Ein Fallverschluss  $V$  mit innerer Wasserspülung befindet sich vor der Cylinderöffnung, er besitzt auf einer Seite einen Ueberzug aus Sammt und verschliesst hiermit die Oeffnung  $O_1$ , um das Eindringen von kalter Luft zu verhüten.

Zwischen dem Bolometer  $B$  und der Strahlungsquelle ist eine Reihe von Diaphragmen aus geschwärzter Pappe eingeschaltet, welche alle überflüssigen Strahlen abblenden und selbst möglichst wenig reflectiren sollen. Das eigentliche Messdiaphragma  $D$  von 1 cm Radius steht unmittelbar vor dem Fallbrett  $V$ , lässt nur Strahlen aus dem Inneren des Cylinders zum Bolometer gelangen und wird selbst nur bei aufgezogenem Fallverschluss bestrahlt, sodass Strahlung durch Eigenwärme ausgeschlossen ist. Bekanntlich ist dann das Diaphragma zugleich der Ort der Strahlungsquelle und wirkt so, als wäre es mit der Masse des strahlenden Körpers belegt.

In der Wheatstone'schen Brücke wird der Zweig  $Z_1$ , der ebenso wie  $Z_2$  und  $Z_4$  aus dicken Manganindrähten besteht, stets dem Bolometer  $B$  gleich gemacht, nur die letzte feinste Abgleichung findet auf dem Brückendraht  $P$  statt. Zum Ballastwiderstand  $w_2$  kann ein Widerstand  $w_3$  parallel gelegt und damit die Stromstärke variirt werden.

#### Strahlungsgleichung.

Die Grösse der Strahlung  $s$  werde gleich der durch sie erzeugten Wärmemenge gesetzt, nach obigem ist

$$s = (W_2 J_2^2 - W_1 J_1^2) C.$$

$W_1$  und  $W_2$ , die Widerstände des Bolometers vor und während der Erwärmung, dürfen hier gleich gesetzt werden,

da die Erwärmung weniger als 0,1 Grad und die Widerstandsänderung bei dem Temperaturcoefficienten 0,0034 nur etwa drei Zehntausendstel beträgt. Daher ist  $s = (J_2^2 - J_1^2) W_1 C$ .

Es erscheint nun als das Nächstliegende, die erreichte Gleichheit der durch Strahlung und durch Strom hervorgerufenen Erwärmung aus den zugehörigen Widerstandsänderungen nach einer Nullmethode zu beurtheilen. Bei den Messungen stellte sich jedoch heraus, dass es viel vortheilhafter ist, die Widerstandsänderungen durch Ausschläge zu messen. Deshalb wurde der Strom  $J_2$  so gewählt, dass er denselben Ausschlag wie die Strahlung bewirkte. Da aber die Intensitäten des Messstromes in beiden Fällen verschieden sind, so sind nun die durch Strahlung und Strom erzeugten Wärmemengen nicht gleich, sondern sie verhalten sich umgekehrt wie die Stromstärken, daher ist:

$$(1) \quad s = (J_2^2 - J_1^2) W_1 C \frac{J_2}{J_1}.$$

Dies setzt voraus, was auch experimentell bewiesen ist, dass die Erwärmung des Bolometers innerhalb der vorkommenden Strahlungsgrössen angenähert proportional den zugeführten Wärmemengen ist.<sup>1)</sup>

Die zum Bolometer gelangende Strahlung  $s$  verhält sich angenähert zu der ganzen vom schwarzen Körper nach dem Cosinusetz ausgesandten Strahlung wie  $f : \pi r_1^2$ , wenn  $f$  die Fläche des Bolometers und  $r_1$  der Radius der Kugeloberfläche ist, welche den Mittelpunkt  $M$  des als punktförmig angesehenen Diaphragmas  $D$  zum Centrum hat und durch die vier Ecken des Bolometers geht. Streng genommen ist nicht die Fläche  $f$  einzusetzen, sondern die bei den vorliegenden Daten nur um  $\frac{1}{2}$  Proc. grössere Fläche  $f'$ , welche entsteht, wenn man  $f$  zunächst von  $M$  aus auf die Kugeloberfläche projecirt und diese Projection senkrecht auf die Diaphragmenebene projecirt.

Das Resultat der zweimaligen Projection ist für  $f = ab$ , wo  $a$  und  $b$  die Seitenlängen des Bolometers sind, und für

$$r_1 = \sqrt{e^2 + \frac{a^2}{4} + \frac{b^2}{4}},$$

wo  $e$  der Abstand des Bolometers vom Diaphragma ist,

1) l. c. p. 425.

$$F = f + \varphi(a, b) + \varphi(b, a)$$

$$\varphi(a, b) = \left( \frac{r_1^2}{\sqrt{c^2 + \frac{a^2}{4}}} \arcsin \frac{b}{2r_1} - \frac{b}{2} \right) a.$$

Die Annahme, dass das Diaphragma punktförmig ist, verursacht einen Fehler, der kleiner als ein Promille ist und vernachlässigt wird.

Die zum Bolometer gelangende Strahlung  $s$  multiplicirt mit  $\pi r_1^2 / F$  ergibt also die gesammte vom Diaphragma ausgehende Strahlung, diese dividirt durch die Diaphragmenfläche  $= \pi r_2^2$  die von der Flächeneinheit ausgehende Gesamtstrahlung

$$(2) \quad S = (J_2^2 - J_1^2) W_1 C \frac{J_2}{J_1} \frac{r_1^2}{F r_2^2}.$$

Dabei ist

$$2 J_1 = \frac{E}{w_1 + w_2},$$

wenn  $E$  die Spannung der Accumulatoren,  $w_1$  der gesammte Widerstand im Stromkreis ausser dem Ballast  $w_2$  ist und der gleiche Strom in allen Brückenzweigen fliesst.

$$2 J_2 = \frac{E}{w_1 + \frac{w_2 w_3}{w_2 + w_3}},$$

wenn  $w_3$  zu  $w_2$  parallel geschaltet wird.

#### Untersuchung des schwarzen Körpers.

Es fragt sich, wie nahe der benutzte schwarze Körper dem idealen kommt. Deshalb wurden vier Strahlungsgrössen an dem beschriebenen Messinggefäss relativ gemessen. Es wurde gefunden, die Strahlung des geschwärzten Hohlcyinders gleich 100 gesetzt:

#### Die Emission

der blanken Messingwand	des blanken Hohlcyinders <sup>1)</sup>	der geschwärzten Messingwand	des geschwärzten Hohlcyinders
8,9	46,9	88,6	100

1) Es lässt sich die Strahlung eines blanken Hohlcyinders der des schwarzen Körpers viel näher bringen, wenn man die Oeffnung sehr klein macht. Hier waren die Oeffnungen noch gross, weil die Strahlung für

Die Strahlungen beziehen sich auf die Siedegefässtemperatur von  $100^{\circ}$  und die Bolometerteremperatur von  $16^{\circ}$ . Die Ausschläge, die auf Proportionalität corrigirt sind, geben, als relative Ausschläge und da die Wellenlängengemische in den vier Fällen wohl gleiche sind, die Intensitäten hinreichend genau wieder, jedenfalls genauer als sich die Oberfläche eines blanken und eines geschwärzten Messings reproduciren lässt.

Die Strahlung des blanken Messings steigt in dem blanken Hohlcyliner durch die hinzukommende Reflexion auf den fünffachen Werth an. Die Strahlung des geschwärzten Messings steigt im Hohlcyliner nur noch um ein Achtel ihres Betrages. Mit den Daten lässt sich berechnen, dass dieser schwarze Körper dem idealen bis auf ungefähr 1 Proc. nahe kommt.

#### Hülfsmessungen.

1. *Längenmessungen.* Der mittlere Durchmesser  $2r_2$  des Messdiaphragmas wurde gemessen, indem vier verschiedene Durchmesser mit der Theilmaschine auf 0,01 mm genau gemessen wurden. Die vier Durchmesser des nicht ganz kreisrunden Diaphragmas sind 1,994, 1,993, 1,992, 1,994, das Mittel 1,993 cm.

Die Seitenlängen der Bolometer sind gleichfalls auf der Theilmaschine gemessen und zwar, indem die Länge jedes Streifens und jedes Intervalles, und die gesammte Breite an verschiedenen Stellen gemessen, und die Mittel gebildet wurden.

Bolometer  $B_1$  besteht aus 10 Streifen von

$$35 \times 2 \times 0,001 \text{ mm}$$

mit 1 mm breiten Intervallen und dahinter stehenden 9 Streifen.

Die Flächendimension  $f_1$  wurde

$$f_1 = a_1 b_1 = 34,54 \times 29,03 = 1003 \text{ qmm}$$

gefunden.

Bolometer  $B_2$  besteht aus 5 Streifen von

$$35 \times 4 \times 0,001 \text{ mm}$$

mit 3 mm breiten Intervallen und dahinter stehenden 4 Streifen.

Die Flächendimension ist

$$f_2 = 35,33 \times 31,96 = 1129 \text{ qmm.}$$

---

die absoluten Messungen sonst zu gering gewesen wäre. Alle diese relativen Messungen sind natürlich mit vier gleichen Bolometerzweigen ausgeführt und daher sehr genau.

Der Abstand des Diaphragmas vom Bolometer ist in einer Stellung mit Hilfe eines Stichmaasses auf 0,1 mm genau gemessen, indem sowohl gegen das Diaphragma wie gegen den Bolometerrahmen Platten bekannter Dicke gelegt wurden. Andere Stellungen des Bolometers sind darnach direct an einem Maassstab, an dem das Bolometer entlang geschoben werden konnte, abgelesen.

2. *Widerstands- und Strommessungen.* Bei  $17^{\circ}$  ist der Widerstand von Bolometer  $B_1$  ohne jede Zuleitung gleich 33,87 Ohm, der von  $B_2 = 8,095$  Ohm, der Temperaturcoefficient ist = 0,0034.

Die Stromintensität wurde aus Widerstand und electromotorischer Kraft bestimmt, die jedesmalige Spannung der Accumulatoren durch Vergleichung mit einem Cadmiumelement gemessen.

Das electrothermische Aequivalent ist gleich

$$0,240 \frac{\text{g-Cal.}}{\text{cm}^2 \text{sec}}$$

gesetzt.

#### Strahlungsmessungen.

Es sollte die Strahlung gemessen werden, welche der schwarze Körper bei  $100^{\circ}$  einem Körper von  $0^{\circ}$  zusendet. Da es unbequem gewesen wäre, das Bolometer auf die Temperatur von  $0^{\circ}$  zu bringen, so wurde es vorgezogen, das Bolometer einmal durch den schwarzen Körper von der Temperatur  $100^{\circ}$  bestrahlen und das andere Mal zum schwarzen Körper von der Temperatur  $0^{\circ}$  strahlen zu lassen und diese Strahlungsgrößen zu addiren.

Bolometer und Diaphragma waren so justirt, dass sie auf der Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte senkrecht standen, dann wurde die Temperatur im Innern des Bolometerkastens abgelesen und die grosse Quantität Wasser, welche durch das Fallbrett circuirte auf die gleiche Temperatur gebracht, das Strahlungsgefäss durch Dampf geheizt, der stationäre Zustand abgewartet und die Temperatur nach dem Barometerstand bestimmt. Die Brücke war so abgeglichen, dass die Ruhelage des Galvanometers bei geöffnetem Strom und bei der Stromstärke  $J_1$  im stationären Zustand die gleiche war.

Nun wurde das Fallbrett aufgezogen, der Ausschlag bei einer Stromstärke  $J_1$  gemessen und ein ähnlich grosser Ausschlag ohne Bestrahlung durch blosse Stromänderung hervorgerufen. Darauf wurde der Abstand von Bolometer und Strahlungsquelle geändert, und wieder der durch Strahlung bewirkte Ausschlag gemessen und durch Interpolation derjenige Abstand gefunden, welcher denselben Ausschlag durch Strahlung wie durch Stromwärme ergeben hätte.

Ausschläge in Millimeter, verursacht durch		
Strahlung bei der Entfernung $e = 188,0$ mm	Stromwärme bei Nebenschluss $w_3 = 570$ Ohm	Strahlung bei der Entfernung $e = 196,3$ mm
137,0	134,5	126,0
136,2	134,5	126,0
136,9	135,1	126,4
	135,0	
	134,8	
Mittel 136,7	134,9	126,1

Interpolation ergibt Ausschlagsgleichheit bei der Entfernung  $e = 189,4$  mm.

Nr.	Bolometer	Temp. des Bolometers	Temp. des schwarzen Körpers	Abstand $e$ mm	Widerstand $w_1$ Ohm	Ballast $w_2$	Nebenschluss $w_3$	$E$ Volt	$\frac{\text{g-Cal.}}{\text{cm}^2 \text{ sec}}$ 0,0	$\sigma \cdot 10^{12}$	Abweichung
1	$B_1$	18,7	100,1	192,4	42,1	500	570	4,059	1577	1,299	+ 22
2	$B_1$	18,2	99,0	186,9	42,1	500	570	4,095	1513	1,265	- 12
3	$B_1$	18,1	99,8	190,2	42,1	500	570	4,076	1551	1,278	+ 1
4	$B_1$	16,7	99,9	192,3	42,1	500	571,2	4,074	1572	1,279	+ 2
5	$B_2$	16,7	99,8	188,3	29,2	250	229,4	4,072	1559	1,271	- 6
6	$B_2$	17,0	99,9	189,9	29,2	250	230	4,072	1579	1,284	+ 7
7	$B_2$	16,9	100,1	188,5	29,2	250	230	4,069	1550	1,260	- 17
8	$B_2$	17,2	99,7	189,4	29,2	250	230	4,065	1566	1,283	+ 6

Mittel 1,277

Die vorstehende Tabelle giebt die Beobachtungsdaten zur Berechnung der Strahlungsgrösse  $S$ , wie sie mit Bolometer  $B_1$  und  $B_2$  gefunden wurden. Die Tabelle ist nach den Gleichungen

p. 750 und nach der Figur p. 747 verständlich. In der vorletzten Columne ist nach dem Stefan'schen Gesetz  $\sigma = S/(T_2^4 - T_1^4)$  berechnet, wobei  $T_2$  und  $T_1$  die absoluten Temperaturen des schwarzen Körpers und des Bolometers bezeichnen.

Die Messung des anderen Theiles, der Strahlung bei  $0^\circ$ , lässt sich nun auf das Vorige zurückführen. Es wurde nämlich das Verhältniss der Strahlung bei  $100$  und  $0^\circ$  relativ, also wieder mit vier Bolometerzweigen, genau gemessen, während abwechselnd ein schwarzer Körper von  $100^\circ$  und ein gleicher von  $0^\circ$  das Bolometer bestrahlte.

Temp. des Bolometers	Temp. des schwarzen Körpers	Ausschlag	Intensität des Messstromes	Strahlung $S$ in willkürlicher Einheit	$\frac{S}{T_2^4 - T_1^4}$
18,73°	0°	5,97	583,8	500,3	2960
	100,44°	6,17	83,9	3602	2951

Da die Zahlen der letzten Columne auf  $\frac{1}{3}$  Proc. gleich sind, so erscheint das Stefan'sche Gesetz für dies Intervall erfüllt und es ist gestattet,  $S_{100} - S_0$  aus dem Intervall  $100^\circ$  bis  $18^\circ$  mit Hülfe des für  $\sigma$  gefundenen Mittelwerthes gleich 1,277 zu berechnen. Darnach ist

$$S_{100} - S_0 = 0,01763 \frac{\text{g-Cal.}}{\text{cm}^2 \text{ sec.}}$$

#### Fehlerquellen.

Es ist noch nicht genau untersucht, wie weit das Bolometer absolut schwarz ist. Wenn Platinmoor auch innerhalb der sichtbaren Strahlen angenähert ebensoviel wie ein schwarzer Körper absorbiert, so kann doch in dem Gebiet der hier in Betracht kommenden langen Wellen leicht eine Abweichung von einigen Procenten vorhanden sein. Daher ist das Absorptionsvermögen des Platinmoores entweder durch besondere Versuche zu ermitteln, oder der Fehler durch Construction eines schwarzen Bolometers nach Analogie des schwarzen Körpers zu vermeiden.

Zwei mögliche Fehlerquellen sind genauer an anderer Stelle<sup>1)</sup> besprochen, erstens der Umstand, dass die Temperatur-

1) l. c. p. 432.

vertheilung in einem Bolometer eine verschiedene ist, je nachdem das Bolometer durch Strahlung oder durch Strom erwärmt wird. Wie Versuche ergeben haben, ist jedoch die Temperaturdifferenz zwischen dem Innern und der Oberfläche eines Bolometerzweiges jedenfalls kleiner als 1 Proc. der Temperaturdifferenz zwischen Bolometer und Umgebung. Zweitens könnte die in der Zimmerluft vorhandene Kohlensäure einen Theil der Strahlung absorbiren, dies ist aber auch zu vernachlässigen.

Bei zwei hintereinander stehenden Bolometern werden nicht alle Theile von der Strahlung getroffen, während die Stromwärme in allen Theilen erzeugt wird. Dies ist jedoch gleichgültig, da die Widerstandsänderung bei den kleinen Temperaturdifferenzen die gleiche ist, ob dieselbe Wärmemenge auf beide Streifen, oder nur auf einen vertheilt wird. Es ist aber nicht erlaubt, beliebige Stücke aus dem Bolometer abzublenden, da ja die Wärmeableitung nicht überall die gleiche ist, z. B. ist dieselbe an den Streifenenden, wo dieselben am Schiefer aufliegen, viel grösser als in der Mitte.

Die Diaphragmen, welche zwischen Bolometer und Strahlungsquelle eingeschaltet sind, können insofern schädlich wirken, als sie durch diffuse Reflexion Strahlen zum Bolometer gelangen lassen und zwar könnte dies soviel ausmachen, dass das Bolometer nicht dem Entfernungsgesetz entsprechende Ausschläge zeigte. Deshalb ist die Entfernung variirt und der zugehörige Ausschlag gemessen.

Entfernung $e$	Ausschlag $a$	$e^2 \cdot a \cdot 10^{-1}$
48,25 cm	9,55 cm	2223
38,25	15,16	2218
28,25	27,72	2212

Die Ausschläge sind auf Proportionalität corrigirt, und da die Zahlen der letzten Columne nahezu constant sind, so hat also keine merkliche Reflexion stattgefunden.

Frühere Bestimmungen von  $\sigma$ .

Es liegen keine quantitativen Bestimmungen der Strahlung des schwarzen Körpers vor, obgleich schon Christiansen<sup>1)</sup> den von Kirchhoff definirten absolut schwarzen Körper praktisch hergestellt hat. Er bohrte in einen Messingwürfel conische Löcher, versilberte die Seitenwände und Löcher, und erhielt beim Erhitzen des Würfels aus dem Innern der Löcher eine 32 mal so grosse Strahlung, als von den ebenen Seiten. Christiansen sagt deshalb, dass die Löcher wie „vollkommen schwarze Flecken“ wirkten.

Der für  $\sigma$  gefundene Werth kann aber doch mit dem von Lehnobach<sup>2)</sup> und Graetz<sup>3)</sup> an Glas gemessenen Werthen verglichen werden.

Durch die Arbeiten von De la Provostaye und Desains<sup>4)</sup> ist festgestellt, dass Glas 10 Proc. der dunkeln Wärmestrahlen reflectirt, und dass sein Reflexionsvermögen bei ganz schräger Incidenz noch bedeutend zunimmt. Hieraus folgt, dass sein Emissionsvermögen kleiner als das des schwarzen Körpers sein muss. Dasselbe Resultat habe ich erhalten, indem ich den schwarzen Körper, Glas und berusstes Glas bei 100° und senkrechtem Austritt der Strahlen zum Bolometer strahlen liess.

Emissionsvermögen des		
schwarzen Körpers	Glases	berussten Glases
100	90,9	95,5

Dass Hr. Lehnobach keinen Unterschied zwischen Glas und berusstem Glas gefunden hat, dürfte seinen Grund in der Schwierigkeit seiner Methode haben. Die Annahme, Glas sei ein schwarzer Körper, hat bei der Methode einen Fehler verursacht, der am besten an den Versuchen von Hrn. Graetz,

1) Christiansen, Wied. Ann. 21. p. 364—369. 1884; vgl. Lummer und Kurlbaum, Sitzungsber. d. physik. Gesellsch. zu Berlin, 6. Mai 1898, wo die Christiansen'schen Versuche kurz erwähnt sind.

2) Lehnobach, Pogg. Ann. 151. p. 96—108. 1874.

3) Graetz, Wied. Ann. 11. p. 913—930. 1880.

4) De la Provostaye u. Desains, Pogg. Ann. 90. p. 623—626. 1853. Compt. rend. 37. p. 168. 1853.

welche die genauesten sind und den Fall am reinsten zeigen, erörtert wird.

Der Einfachheit wegen sei unter der Ausstrahlung stets nur derjenige Theil der Ausstrahlung verstanden, welchen der Körper durch seine höhere Temperatur mehr ausstrahlt als er zurückerhält, ferner werde angenommen, dass im betrachteten Temperaturintervall Emissions- und Reflexionsvermögen sich nicht ändern.

Hr. Graetz lässt eine Thermometerkugel in einer evairten Hohlkugel aus Glas strahlen oder umgekehrt von der Hohlkugel bestrahlt werden, indem er diese entweder auf eine sehr niedrige oder sehr hohe constante Temperatur bringt, und aus dem Gang des Thermometers und aus seiner Wärmecapacität die Emission des Glases bestimmt. Hiernach berechnet er mit Hilfe des Stefan'schen Gesetzes die Strahlungsconstante  $\sigma$ .

Es werde angenommen, Hohlkugel und Thermometerkugel seien concentrisch und die Thermometerkugel sei die heissero, dann muss das Emissionsvermögen zu klein gefunden werden, denn die Hohlkugel reflectirt einen Theil der ausgesandten Strahlen zur Thermometerkugel zurück.<sup>1)</sup> Ist das Emissionsvermögen des schwarzen Körpers gleich 1 und das des Glases gleich  $e$ , so ist das Reflexionsvermögen  $r = 1 - e$ . In obiger Situation erscheint dann  $e$  um  $e^2(r + r^3 + \dots + r^{2n-1})$  verkleinert.<sup>2)</sup> Diese Grösse stellt die Summe der zur Thermometerkugel zurückreflectirten und von ihr wieder absorbirten Strahlungen dar. Wird  $e$  für Glas gleich 0,9 gesetzt, so wird sein scheinbares Emissionsvermögen gleich 0,82, d. h. die Versuchsanordnung bringt einen Fehler von ungefähr 9 Proc. hervor.

Strahlt die Hohlkugel zur Thermometerkugel, so scheint auf den ersten Blick die Hohlkugel als schwarzer Körper zu wirken und in der That herrscht in der Hohlkugel bei genügend kleiner Thermometerkugel infolge der zahlreichen Reflexionen angenähert die Strahlungsdichtigkeit des schwarzen Körpers, nur nicht für die Thermometerkugel, da sie selbst alle Strahlen,

1) vgl. E. Lecher, Wied. Ann. 17. p. 481 u. f. 1882.

2) Hat die Hohlkugel ein anderes Reflexionsvermögen  $r_0$ , so ist für  $r^{2n-1}$  zu setzen  $r_0^n r^{n-1}$ .

die durch einmalige Reflexion zu ihr gelangen könnten, abblendet, und ein Strahl, der einmal an ihr vorbeigegangen ist, sie nie wieder erreichen kann. Sie empfängt also, obgleich sie sich in einem angenähert schwarzen Körper befindet, nur die dem Emissionsvermögen des Glases entsprechende Strahlung. Der Fehler ist also derselbe wie im obigen Fall. Hr. Graetz war so freundlich, mir auf eine Anfrage mitzutheilen, dass bei seinen Versuchen die Kugeln concentrisch waren. Hieraus erklärt sich die grosse Differenz zwischen seiner und meiner Bestimmung von  $\sigma$ .

Rückt die Thermometerkugel aus dem Centrum der Hohlkugel heraus, so empfängt sie nicht nur die Strahlung des Glases, sondern noch dazu die von den Wänden zu ihr reflectirten Strahlen, d. h. angenähert die Strahlung des schwarzen Körpers. Das Emissionsvermögen des Glases würde dann trotzdem richtig gefunden werden, da ja die Thermometerkugel von der Emission des schwarzen Körpers doch nur den richtigen Bruchtheil absorbiren würde. Strahlt die Thermometerkugel, so erhält man gleichfalls den richtigen Werth, da sie nun nicht mehr im Brennpunkt ihrer eigenen Ausstrahlung steht.

Wird das Glas berusst, so muss selbst bei concentrischen Kugeln aus drei Gründen das Emissionsvermögen grösser gefunden werden, erstens weil es an sich grösser ist, zweitens weil die Strahlung empfangende Kugel mehr absorbirt, drittens weil der Hohlraum sich dem schwarzen Körper mehr nähert, indem zur Emission noch die diffuse Reflexion hinzukommt. Hr. Lehnebach hat keinen Unterschied zwischen Glas und berustem Glas gefunden, seine Methode unterscheidet sich von der Graetz'schen nur dadurch, dass er statt des Quecksilberthermometers ein mit Wasser gefülltes Thermometergefäss als Eiscalorimeter benutzt und die Hohlkugel nicht vollkommen evacuirt, sondern Correctionen für die Wärmeleitung der Luft anbringt. Er findet die Wärmemenge, welche Glas von  $100^{\circ}$  zu Glas von  $0^{\circ}$  strahlt,

$$h_{100} - h_0 = 0,0152 \frac{\text{g-Cal}}{\text{cm}^2 \text{sec}},$$

Kundt und Warburg<sup>1)</sup> finden gelegentlich der Bestimmung der Wärmeleitung der Gase dieselbe Grösse gleich 0,014.

1) Kundt u. Warburg, Pogg. Ann. 156. p. 207—208. 1875.

Hr. Christiansen<sup>1)</sup> hat einen ganz andern Weg zur Bestimmung der Strahlung des schwarzen Körpers eingeschlagen, er leitet eine Gleichung für den Fall ab, dass eine kreisförmige Scheibe gegen eine parallele, unendlich grosse Wand strahlt, und zwar unter Berücksichtigung der dabei auftretenden Reflexionen. Dann bestimmt er experimentell den Strahlungsverlust einer geschwärzten Kupferscheibe, welche gegen eine grosse Wand strahlt und im Innern ein Thermoelement enthält, dessen zeitlicher Gang beobachtet wird. Er findet  $h_{100} - h_0 = 0,0167$ .

Die Werthe der verschiedenen Beobachter sind:

Beobachter	g-Cal cm <sup>2</sup> sec	
	$h_{100} - h_0$	$\sigma \cdot 10^{12}$
Lehnebach 1874	0,0152	1,10
Kundt und Warburg 1875	0,014	1,01
Graetz 1880		1,11
Christiansen 1883	0,0167	1,08
Kurlbaum 1898	0,0176	1,21
		1,28

Durch die Methode der früheren Beobachter war als Strahlungseinheit die Gramm-Calorie gegeben, doch stecken in den verschiedenen Gramm-Calorien, sowie in den benutzten specifischen Wärmen noch erhebliche Unsicherheiten. Bei der vorliegenden Methode ist es natürlicher, das in den letzten Jahren ausgezeichnet definirte Watt als Einheit zu wählen, welches aber auch einen genauen Anschluss an die Gramm-Calorie gestattet. Darnach ist

$$\sigma = 5,32 \cdot 10^{-12} \text{ Watt} \quad \text{und} \quad S_{100} - S_0 = 0,0731 \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2}.$$

In Vorliegendem glaube ich eine Methode gegeben zu haben, nach welcher eine beliebige Strahlung genau gemessen

1) Christiansen, Wied. Ann. 19. p. 267—283. 1883.

2) 1,01 ist aus  $h_{100} - h_0 = 0,014$  berechnet, 1,11 ist von Graetz aus dem Beobachtungsmaterial von Kundt u. Warburg berechnet.

werden kann. Inzwischen ist eine grössere Anzahl von Bolometerzweigen hergestellt, aus denen sich ein Apparat mit acht vollkommen gleichen Zweigen zusammensetzen lässt, der in einfacherer und sicherer Weise absolute Strahlungsmessungen innerhalb weniger Minuten auszuführen gestattet, sobald einmal die Constanten des Apparates bestimmt sind.<sup>1)</sup>

---

1) l. c. p. 432.

(Eingegangen 14. Juni 1898.)

---