**8. Versuche zur Ermittlung der Grössen-
ordnung der in Radiometern auftretenden Drucke;
von Wilhelm Donle.**

Bei einer Reihe von neueren Untersuchungen über Strahlung¹⁾ hat sich das passend abgeänderte Crookes'sche Radiometer als ein sehr brauchbares Messinstrument erwiesen. Bei Gelegenheit einer Untersuchung über Strahlung, welche aber vorläufig zurückgestellt werden musste, habe ich versucht, die in Radiometern vorkommenden Drucke der Grössenordnung nach durch directe Versuche zu bestimmen, da die bisherigen Messungen solcher Drucke meist nur auf indirectem Wege erfolgten.

Die älteren Versuche, die indess nur Schätzungen gestatten, rühren von Crookes²⁾, Schuster³⁾ und Riecke⁴⁾ her. Die beiden ersteren benutzten das nach Art einer Torsionswaage eingerichtete, bez. das biflar aufgehängte Radiometer, der letztere berechnete den Druck aus der constanten Winkelgeschwindigkeit der Radiometerflügel. Schuster fand für Kalklicht, dass der Druck auf 1 qcm Fläche 0,00003 g-Gewicht gleich 0,0294 Dynen betrug⁵⁾; auf die Resultate von Crookes und Riecke werde ich weiter unten zurückkommen.

Zu meinen Versuchen benutzte ich die *biflare Aufhängung*. Nach Crookes⁶⁾ soll eine solche für den vorliegenden Zweck nicht geeignet sein; nach vielen, allerdings sehr umständlichen und zeitraubenden Versuchen ist mir aber doch die Herstellung

1) E. F. Nichols, Wied. Ann. **60**. p. 401—417. 1897; A. Trowbridge, Wied. Ann. **65**. p. 595—620. 1898.

2) W. Crookes, Phil. Trans. **166**. p. 325—376. 1876/77, hier p. 370; Phil. Mag. (5) **2**. p. 145—151. 1876, hier p. 151; vgl. auch Wied. Beibl. **1**. p. 162. 1877.

3) A. Schuster, Phil. Trans. **166**. p. 715—724. 1876/77.

4) E. Riecke, Wied. Ann. **3**. p. 142—152. 1878.

5) Entfernung und Intensität der Lichtquelle hat Schuster in einer Abhandlung nicht angegeben; auch war bei seinen Versuchen der Lichtkegel mittels einer Linse so concentrirt, dass er die ganze Mühle traf.

6) W. Crookes, Phil. Trans. **165**. p. 519—547. 1875/76, hier p. 532.

einer zur Zufriedenheit functionirenden bifilaren Aufhängung gelungen, sodass dadurch eine directe Messung der Strahlungsdrucke möglich war.

Um die bei der Kleinheit der zu erwartenden Werthe mögliche Unsicherheit thunlichst zu beseitigen, habe ich mir Bifilarwaagen von verschiedenen Dimensionen und Anordnungen hergestellt. So wurde entweder ein etwa 1 mm breiter, 20 mm langer Balken aus dünnem Aluminiumblech oder Glimmer an beiden Enden mit kreisrunden oder quadratischen Scheiben versehen, oder es trug der Balken nur einseitig einen quadratischen Flügel aus Glimmer, am anderen Ende ein aus einem Glasfaden hergestelltes Gegengewicht. Die beiden Coconfäden der Aufhängung wurden an dem Balken mit kaltem Steinkitt befestigt, dann durch zwei in einem schmalen Blechstreifen in geringem Abstand eingestochene Löcher gezogen, in richtiger Länge zusammengeknüpft und durch ein Gewichtchen mehrere Tage gestreckt. Wurde dann in eine an der Mitte des Balkens angebrachte Oese aus feinem Draht ein kleiner Spiegel aus versilbertem Mikroskopdeckglas an Stelle des Gewichtchens eingehängt, so konnte durch geringe Längenänderung der beiden Coconfäden, oft allerdings erst nach vielen Versuchen, erreicht werden, dass die Bifilarwaage, in Schwingung versetzt, immer wieder in ihre mittels Scala und Fernrohr beobachtete Ruhelage zurückkehrte. Erst dann wurden die Coconfäden auch an dem schmalen Blechstreifen festgekittet, und ich erreichte so fast stets, dass die Bifilarwaage sowohl in Luft von gewöhnlichem Drucke als auch im hohen Vacuum dieselbe Ruhelage tage- und wochenlang nahezu unverändert beibehielt. Nach diesem Verhalten der Bifilarwaage ist wohl der Schluss gerechtfertigt, dass die von Crookes¹⁾ angegebenen Fehlerquellen bei meiner Anordnung fast vollständig vermieden waren.

Mittels des die Coconfäden tragenden Blechstreifens wurde dann die ganze Bifilarwaage, nach Ausführung der für die Druckbestimmung noch nothwendigen Messungen, an eine Oese eines mit Schliff versehenen Glasstöpsels eingehängt und dann letzterer in die das kugelige Radiometergefäß tragende Röhre eingesetzt. Der Schliff des Glasstöpsels wurde mit Quecksilber

1) W. Crookes, l. c. p. 532.

gedichtet. Die Beobachtung des Ablenkungswinkels mittels Spiegels und Scala geschah durch das 8 cm im Durchmesser betragende Radiometergefäß hindurch, da das Anbringen eines ebenen Fensters mit Rücksicht auf die anzustrebende hohe Luftverdünnung mir anfänglich nicht gerathen schien. Bei richtiger Auswahl der günstigsten Stelle des kugeligen Radiometergefäßes für die Durchsicht konnten genügend deutliche Scalenbilder erhalten werden. Bei den zuletzt ausgeführten Versuchen habe ich auch noch ein Radiometergefäß von nur 5,2 cm Durchmesser verwendet, wobei die Beobachtung der Ablenkung der Bifilarwaage durch ein Planfenster hindurch geschah, welches an der Seite eines kurzen, unterhalb des kugeligen Radiometergefäßes angebrachten Rohrstutzens mit ziemlich zähem Luftpumpenfett aufgesetzt war. Die Dichtung des Planfensters hielt für ein paar Stunden genügend gut, es konnte aber allerdings keine ganz so hohe Luftverdünnung erzielt werden, wie bei der anderen Anordnung. Bemerkt sei noch, dass die Silberschicht der Spiegel mit einem guten zusammenhängenden Lacküberzug versehen sein muss, da der nicht geschützte Silberbelag des Spiegels im hohen Vacuum nach wenigen Tagen offenbar durch Verdunstung des Silbers fast völlig verschwunden ist.

Für eine bifilare Aufhängung ist nach F. Kohlrausch, Leitfaden der praktischen Physik, das rücktreibende Drehungsmoment gegeben durch

$$P \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{4h} \cdot \sin \alpha = P \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{4h} \cdot \frac{n}{A},$$

wenn P das Gewicht des angehängten Körpers, e_1 und e_2 den oberen und unteren Horizontalabstand der beiden Fadenenden, h die mittlere Fadenlänge und α den Ablenkungswinkel, bez. n die Ablenkung an der Scala in Doppelmillimetern, A den Abstand von Spiegel und Scala in Millimetern bedeutet. Ist ferner D der Strahlungsdruck auf 1 qcm Fläche der am Balken angebrachten, einseitig berussten Scheibe der radiometrischen Bifilarwaage, f die Fläche der Scheibe in Quadratcentimetern, a der Abstand der Mitte der Scheibe von der Mitte der bifilaren Aufhängung, so ist das Drehungsmoment des Strahlungsdruckes $D \cdot f \cdot a$, sodass man hat

$$D \cdot f \cdot a = P \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{4h} \cdot \frac{n}{A}$$

oder

$$D = \frac{P}{f \cdot a} \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{4h} \cdot \frac{n}{A}.$$

Bei den zuerst ausgeführten Messungen mit dem Radiometergefäss von 8 cm Durchmesser wurden zwei verschiedene Bifilarwaagen, welche mit I und II bezeichnet werden sollen, verwendet.

Bei Bifilarwaage I trug der Balken zwei kreisrunde Scheiben aus dünnem Aluminiumblech, bei II waren der Balken und die beiden quadratischen Scheiben aus Glimmer. Bei den in diesem Jahre ausgeführten Versuchen mit den Radiometergefässen von 8 cm und 5,2 cm Durchmesser wurden zwei nahe identische Bifilarwaagen aus Glimmer mit nur einem quadratischen Flügel benutzt, welche III und IV genannt werden sollen. Die Ausmaasse und Gewichte sind für die verschiedenen Bifilarwaagen in nachfolgender Tabelle zusammengestellt, wobei D_1 den Strahlungsdruck für 1 qcm Fläche in Dynen für einen Doppelmillimeter Ablenkung bedeutet:

Bifilar- waage	I	II	III	IV
P	0,1462 g = 143,39 Dyn.	0,1071 g = 105,04 Dyn.	0,1133 g = 111,12 Dyn.	0,11695 g = 114,70 Dyn.
e_1	0,227 cm	0,2004 cm	0,2222 cm	0,1843 cm
e_2	0,2965 "	0,30498 "	0,1683 "	0,1905 "
h	16,20 "	15,85 "	15,80 "	15,80 "
f	0,585 ² π qcm	1 qcm	1 qcm	1 qcm
a	1,5 cm	1,49 cm	0,91 cm	0,91 cm
A	2400 mm	2400 mm	2155 mm	2295 mm
D_1	0,0000385 Dyn.	0,00002832 Dyn.	0,00003353 Dyn.	0,00003051 Dyn.

Bemerkt sei noch, dass die in vorstehender Tabelle angegebenen Längen für jede Bifilarwaage mittels einer Theilmaschine als Mittel aus einer grösseren Anzahl von Messungen bestimmt wurden. Geringere Gewichte P des Balkens der Bifilarwaage sammt dem angehängten Ablesespiegel als die angegebenen, die ja noch hätten erzielt werden können, getraute ich mir nicht anzuwenden, weil ich fürchtete, dass dann

die Coconfäden der bifilaren Aufhängung nicht genügend straff gespannt worden wären.

Der Glasballon, in welchem die Bifilarwaage sich befand, wurde mittels einer Töpler-Hagen'schen Quecksilberluftpumpe stets soweit luftleer gemacht, bis eine Druckmessung mit dem an der Pumpe angebrachten McLeod'schen Manometer nicht mehr möglich war. Dabei hatte der Luftraum des Manometers einen Kubikinhalt von 110 ccm, wovon 10 ccm in 0,1 ccm getheilt waren. Eine Druckdifferenz von 1 mm Quecksilbersäule würde demnach bei einer Compression des Luftvolumens von 110 ccm auf 0,3 ccm, was mit Sicherheit als kleinstes Volumen noch zu bestimmen war, einem Gasdruck im Radiometergefäß von 0,0027 mm Quecksilbersäule entsprochen haben. Es war somit die erreichte Luftverdünnung unter diesem Werthe gelegen, wenigstens bei Anwendung des Radiometergefäßes von 8 cm Durchmesser. Bei Benutzung des Radiometergefäßes von 5,2 cm Durchmesser mit Planfester konnte, da letzteres nur mit Luftpumpenfett aufgesetzt und eine Quecksilberdichtung nicht anwendbar war, die Luftverdünnung nur bis im Mittel 0,0038 mm Quecksilberdruck gebracht werden.

Die auf den Druck ihrer Strahlung untersuchten *Lichtquellen* waren bei den Versuchen mit den Bifilarwaagen I und II in dem Kasten einer Duboscq'schen Laterne untergebracht, bei den Versuchen mit den Bifilarwaagen III und IV dagegen frei ohne jedes Gehäuse aufgestellt, da sich ergeben hatte, dass der Werth des Druckes infolge der Erwärmung des Gehäuses, wenn auch langsam, zunahm. Eine Linse zur Concentration der Strahlung auf die berusste Scheibe der Bifilarwaage war bei den nachfolgend mitgetheilten Messungen nicht verwendet worden, da bei Anwendung einer Linse der resultirende Druck von der Durchlässigkeit, Oeffnung, Brennweite und Entfernung derselben abhängig geworden wäre. Die Lichtquellen befanden sich stets in einer Entfernung von 50 cm von der berusteten Scheibe der Bifilarwaage, während in etwa 2 cm Entfernung von der Wand des Radiometergefäßes ein doppelwandiger Blechschirm mit kreisrunder Oeffnung von etwa 1,5 cm Durchmesser aufgestellt war. Die Oeffnung dieses Schirmes konnte vom Standpunkte des Beobachters aus durch einen kleinen, doppelwandigen, blechernen Fallschirm nach

Belieben freigemacht oder geschlossen werden. Ausserdem war das Radiometergefäß zur Abhaltung störender Strahlungen von einem ziemlich eng umschliessenden cylindrischen Blechschirm mit entsprechenden Ausschnitten für den Zutritt der Strahlung und für die Beobachtung der Ablenkung umgeben.

Die optischen Helligkeiten der auf ihren Strahlungsdruck untersuchten Lichtquellen wurden in Ermangelung besserer Hilfsmittel sowohl mit einem Rumford'schen als auch mit einem Bunsen'schen Fettfleckphotometer mit der Hefnerkerze verglichen und ergaben als Mittel aus zahlreichen gut übereinstimmenden Versuchen:

Stearinkerze (6er)	bei 4,5—5 cm	Flammenhöhe =	1,71 H.-K.
Argandbrenner	„ 5—5,5 „	„	= 14,97 H.-K.
Auerbrenner			= 58,40 H.-K.

Die nachstehend aufgeführten Werthe der Strahlungsdrucke sind stets Mittelwerthe aus 8—10 Einzelbeobachtungen, welche unter sich gute Uebereinstimmung zeigten; bei jeder Einzelbeobachtung wurde überdies die für die Berechnung des Strahlungsdruckes zu Grunde gelegte Ablenkung der Bifilarwaage aus fünf aufeinanderfolgenden Umkehrpunkten in bekannter Weise ermittelt. Ferner geben die in der 3. Columnne der Tabellen stehenden Zahlen die an der Scala abgelesene Ablenkung in Doppelmillimetern, die Zahlen der 4. Columnne den radiometrischen Druck in Dynen pro qcm an.

Tabelle I.
Hefnerkerze.

Datum	Bifilarwaage	Ablenkung	Druck in Dynen	Mittel
20. II. 1899	III	2,59	0,0000868	} 0,0000826
23. II.	III	2,48	0,0000832	
24. II.	III	2,34	0,0000785	
27. II.	III	2,51	0,0000840	
28. II.	III	2,40	0,0000805	
2. III.	IV	2,49	0,0000761	} 0,0000763
3. III.	IV	2,55	0,0000779	
6. III.	IV	2,45	0,0000747	
7. III.	IV	2,41	0,0000735	
10. III.	IV	2,51	0,0000766	
18. III.	IV	2,59	0,0000790	

Tabelle II.
Stearinkerze.

Datum	Bifilarwaage	Ablenkung	Druck in Dynen	Mittel
16. V. 1898	I	3,56	0,000137	} 0,000129
30. VI.	I	3,19	0,000123	
4. VII.	I	3,78	0,000142	
6. VII.	I	3,01	0,000116	
8. VII.	I	3,33	0,000128	
13. VII.	II	3,99	0,000113	} 0,000107
14. VII.	II	3,49	0,0000988	
21. VII.	II	3,81	0,000108	
20. II. 1899	III	3,82	0,000128	} 0,000121
23. II.	III	3,52	0,000113	
24. II.	III	3,76	0,000126	
27. II.	III	3,64	0,000122	
2. III.	IV	3,64	0,000111	} 0,000103
3. III.	IV	3,87	0,000118	
6. III.	IV	2,64	0,0000806	
7. III.	IV	3,41	0,000104	
10. III.	IV	3,27	0,0000997	
18. III.	IV	3,39	0,000103	

Tabelle III.
Argandbrenner.

Datum	Bifilarwaage	Ablenkung	Druck in Dynen	Mittel
14. V. 1898	I	21,28	0,000819	} 0,000771
16. V.	I	18,84	0,000725	
30. VI.	I	19,96	0,000768	
16. VII.	II	25,50	0,000722	} 0,000745
18. VII.	II	27,01	0,000765	
20. VII.	II	26,20	0,000742	
21. VII.	II	26,52	0,000751	
20. II. 1899	III	21,17	0,000710	} 0,000741
23. II.	III	21,77	0,000730	
24. II.	III	23,24	0,000779	
27. II.	III	21,83	0,000732	
28. II.	III	22,56	0,000756	

Tabelle III. (Fortsetzung.)

Datum	Bifilarwaage	Ablenkung	Druck in Dynen	Mittel
2. III. 1899	IV	23,43	0,000715	0,000697
3. III.	IV	23,07	0,000704	
6. III.	IV	22,88	0,000698	
7. III.	IV	21,37	0,000653	
10. III.	IV	23,34	0,000712	
18. III.	IV	22,94	0,000700	

Tabelle IV.

Auerbrenner.

Datum	Bifilarwaage	Ablenkung	Druck in Dynen	Mittel
20. II. 1899	III	15,64	0,000524	0,000509
23. II.	III	15,43	0,000518	
24. II.	III	14,84	0,000497	
27. II.	III	14,90	0,000499	
2. III.	IV	16,55	0,000505	0,000458
6. III.	IV	15,30	0,000467	
7. III.	IV	14,36	0,000438	
10. III.	IV	13,88	0,000422	
18. III.	IV	15,06	0,000459	

Berücksichtigt man die Kleinheit der in Rede stehenden Druckgrössen und damit zusammenhängend die Schwierigkeit der Messung, ferner die an verschiedenen Versuchstagen wohl kaum vorhandene Gleichheit der Strahlungsquellen, so kann trotz der bei derselben Lichtquelle oft 20—25 Proc. erreichenden Verschiedenheit der Einzelwerthe in den Tabellen, doch die Uebereinstimmung im ganzen eine befriedigende genannt werden. Es ging aus meinen Versuchen ausserdem unzweifelhaft hervor, dass geringe, äusserlich kaum bemerkbare Unterschiede in Flammenhöhe und Leuchtkraft der Lichtquellen bei dem hochempfindlichen Radiometer schon bedeutende Unterschiede in den Druckgrössen veranlassen können.

Die Mittelwerthe der letzten Columnne in den Tabellen zeigen für die Bifilarwaage III durchweg grössere Druckwerthe wie für die Waage IV, trotz des engeren Gehäuses für letztere. Es liefert diese Verschiedenheit aber eine neue Bestätigung der schon von Crookes und anderen wiederholt gemachten

Beobachtung, dass die Empfindlichkeit der Radiometer um so geringer ist, je höher der noch vorhandene Luftdruck ist. Denn wie oben p. 310 bereits erwähnt wurde, konnte die Luftverdünnung bei Bifilarwaage IV wegen des am Gehäuse derselben nur mit Fett abgedichteten Planfensters nicht so hoch getrieben werden, als es in den anderen Fällen möglich war.

Die Uebereinstimmung der erhaltenen Drucke mit dem nach dem Versuche von Crookes¹⁾ berechneten Werth von 0,00075 Dynen pro qcm für eine Kerze von 50 cm Distanz dürfte mit Rücksicht auf die wahrscheinliche Verschiedenheit der Lichtquelle und der sonstigen Versuchsbedingungen (geringere Weite des Radiometergefässes, höheres Vacuum infolge andauernden Erhitzens des Gefässes) eine zufriedenstellende sein. Riecke fand l. c. für eine Gaslampe Drucke von 0,138 bez. 0,1505 Dynen und 0,0272 bez. 0,0483 Dynen pro qcm in 50 cm Entfernung. Dieselben sind etwa 40—60 mal grösser als die von mir gefundenen Drucke und, wenn man die Gasflamme, entsprechend der oben p. 311 gegebenen photometrischen Vergleichung, zu rund 10 Kerzen rechnet, etwa 20 mal bez. 4—7 mal grösser als der entsprechende Werth von Crookes. Woher dieser Unterschied der Riecke'schen Werthe kommt, lässt sich ohne Wiederholung seiner Versuche wohl nicht ermitteln. Druckwerthe von dieser Grössenordnung haben sich bei meinen Messungen für eine Bogenlampe ergeben, welche mit einer Stromstärke von 4—6 Amp., aber leider wegen mangelhafter Einrichtungen so ungleichmässig brannte, dass zuverlässige Messungen nicht gemacht werden konnten.

Nach den Versuchen von E. Dorn²⁾ einerseits über die Erwärmung durch Röntgenstrahlen, andererseits nach der von vielen Seiten, zuletzt von B. Walter³⁾ vertretenen Emissionstheorie der Röntgenstrahlen lässt sich eine Druckwirkung im Radiometer vermuthen, entweder infolge der Erwärmung der von Strahlen getroffenen Radiometerfläche oder, nach Analogie der mechanischen Wirkungen der Kathodenstrahlen, infolge des Aufpralles der Kathodenstrahlentheilchen, welche die Röntgenstrahlen ausmachen sollen. Ich habe nun unter den

1) Vgl. oben p. 306 W. Crookes, l. c.

2) E. Dorn, Wied. Ann. **63**. p. 160—176. 1897.

3) B. Walter, Wied. Ann. **66**. p. 74—82. 1898.

nöthigen Vorsichtsmaassregeln diesbezügliche Versuche mit meinen Bifilarwaagen angestellt; dieselben zeigten allerdings ein geringes Schwanken um ihre Gleichgewichtslage; einseitig vergrösserte Ausschläge, welche auf eine Druckwirkung hätten schliessen lassen, waren aber mit Sicherheit nicht zu constatiren. Nur ein schon vor mehreren Jahren hergestelltes pendelartiges Radiometer, bei welchem mittels eines langen Coconfadens eine berusste Glimmerscheibe in einer etwa 1,5 cm weiten Glasröhre aufgehängt war, und welches schon bei der Strahlung eines Argandbrenners ein sehr energisches Heraus-schleudern der Glimmerscheibe aus der Gleichgewichtslage zeigte, liess bei Auftreffen von Röntgenstrahlen eine verstärkte Schwingung erkennen gegenüber den Schwingungen bei Abblendung der Strahlen durch einen Bleischirm. Es dürfte somit vielleicht nicht ausgeschlossen sein, dass man mit besonders empfindlichen Anordnungen ein unzweideutiges Resultat erhalten wird.

Resultate.

In Zusammenfassung der Versuchsergebnisse ergibt sich daher:

1. Die Grössenordnung der Strahlungsdrucke kann für die Hefnerkerze auf rund $7 \cdot 10^{-5}$ — $8 \cdot 10^{-5}$ Dynen pro qcm, für die 6^{er} Stearinkerze auf $10 \cdot 10^{-5}$ — $14 \cdot 10^{-5}$ Dynen pro qcm, für den Argandbrenner auf $70 \cdot 10^{-5}$ — $80 \cdot 10^{-5}$ Dynen pro qcm, und für den Auerbrenner auf $40 \cdot 10^{-5}$ — $50 \cdot 10^{-5}$ Dynen pro qcm angesetzt werden.

2. Bei höherem Luftdruck im Radiometergefäss ist in Uebereinstimmung mit den Versuchsergebnissen anderer Forscher der Strahlungsdruck ein geringerer.

3. Eine Druckwirkung der Röntgenstrahlen war mit Sicherheit nicht nachweisbar.

München, Physikal. Inst. d. k. Mil.-Bild.-Anstalten, im
April 1899.

(Eingegangen 17. April 1899.)