

**3. Die Lichtstärke des schwarzen Körpers
in Hefnerkerzen und die Strahlungskonstanten der
Glühlampenkohle;¹⁾
von H. Kohn.**

§ 1. Seit der Aufstellung des Kirchhoffschen Gesetzes und im besonderen seit der Entwicklung der Gesetze der schwarzen Strahlung und ihrer experimentellen Verwirklichung hat man sich daran gewöhnt, die Strahlung beliebiger Substanzen ihrer Größe und Eigenschaften nach sozusagen an der des schwarzen Körpers zu orientieren. Im Einklang hiermit läge es nahe, auch die Flächenhelligkeit des schwarzen Körpers bestimmter Temperatur als Normale der Lichtstärke einzuführen und die Flächenhelligkeit und somit auch die gesamte Lichtstärke beliebiger Substanzen auf diese zu beziehen. Bekanntlich steigt aber die Flächenhelligkeit so schnell mit der Temperatur an, daß man diese bei einem Werte von ca. 2300° abs., wie ihn unsere gebräuchlichen Lichtquellen haben, auf ca. 2° genau ermitteln müßte, um die Helligkeit des schwarzen Körpers auf 1 Proz., d. h. mit der gleichen Genauigkeit zu reproduzieren, wie es der Reichsanstalt bei der Hefnerkerze möglich ist.²⁾ Bereits das Konstanthalten der Temperatur innerhalb dieser Grenzen würde Schwierigkeiten bieten, weit größere jedoch die Feststellung dieser Temperatur, wozu, nach Warburg, energetische Messungen von einer Genauigkeit von 0,1—0,2 Proz. erforderlich wären. Durch diese Schwierigkeit wird also die wichtigste Eigenschaft der Normalen, nämlich ihre Reproduzierbarkeit, in Frage gestellt, und man ist daher bis heute bei der auf die Helligkeit der Hefnerlampe begründeten Einheit der Hefnerkerze geblieben.

§ 2. Um nun aber die Flächenhelligkeit und Leistungsfähigkeit unserer gebräuchlichen Lichtquellen mit derjenigen

1) Vorgetragen in der Sitzung der Schles. Ges. für vaterl. Kultur am 13. Juli 1917.

2) Nach E. Warburg, Über eine rationelle Lichteinheit, Verh. d. D. Physik. Ges. 19. p. 3—10. 1917.

des schwarzen Körpers vergleichen und auf Grund der Gesetze der schwarzen Strahlung Aussagen über die Ziele und Grenzen der Leuchttechnik in der Einheit der Hefnerkerze machen zu können, bedarf es einer Eichung des schwarzen Körpers in Hefnerkerzen. Wenngleich diese auch dieselben Schwierigkeiten bietet wie die Einführung der Helligkeit des schwarzen Körpers als Normale, so brauchen wir von ihr für die genannten Zwecke doch nicht den hohen Grad der Genauigkeit wie von einer Normale zu fordern.

Diese Eichung ist zum ersten Male von Lummer und Pringsheim¹⁾ mit dem Lummer-Kurlbaumschen schwarzen Körper²⁾ ausgeführt worden; später hat sie Nernst³⁾ mit einem anderen schwarzen Körper bis zu höheren Temperaturen ausgedehnt. Seitdem findet sich in der Literatur nur bisweilen der Wunsch nach einer Wiederholung der Messungen ausgesprochen.

Die vorliegende Arbeit gibt eine Wiederholung der Messungen mit dem Lummer-Kurlbaumschen schwarzen Körper. Die Angabe der zu den gemessenen Lichtstärken gehörigen Temperaturwerte erfolgt auf Grund der verschiedenen Temperaturskalen, die sich je nach dem gewählten Werte der Strahlungskonstanten ergeben, um einen Vergleich mit früheren Messungen am schwarzen Körper und an anderen Lichtquellen bekannter Temperatur zu ermöglichen.

Der elektrisch geheizte Lummer-Kurlbaumsche schwarze Körper wurde mit dem Lummer-Brodhunschen Photometer gegen eine in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt auf horizontale Hefnerkerzen geeichte Kohlefadenlampe mit U-förmigem Bügel photometriert.⁴⁾ Vor dem schwarzen Körper war eine kleine kreisförmige Blende angebracht, deren Größe und Abstand von der Öffnung des schwarzen Körpers so gewählt waren, daß sie als die eigentliche strahlende schwarze Fläche angesehen werden kann. Sie war so justiert, daß die Spitze des durch ihren Rand und den Photometerschirm begrenzten Strahlenkegels im schwarzen Körper an den Ort

1) O. Lummer u. E. Pringsheim, *Physik. Zeitschr.* 3. p. 97—100. 1902.

2) O. Lummer u. F. Kurlbaum, *Ann. d. Phys.* 5. p. 829. 1901.

3) W. Nernst, *Physik. Zeitschr.* 7. p. 380. 1906.

4) Diese Messungen habe ich zum Teil gemeinsam mit Hrn. cand. phil. F. Conrad ausgeführt.

der Lötstelle des Thermoelementes zu liegen kam. Die gemessene Lichtstärke ist die horizontale Lichtstärke einer ebenen schwarzen Kreisfläche von der Größe der Blende, senkrecht zu dieser beobachtet. Die mittlere sphärische Lichtstärke beträgt den vierten Teil der horizontalen, was sich ohne weiteres ergibt, wenn wir uns die von dieser Kreisfläche in den Halbraum ausgehende Lichtmenge gleichmäßig auf die Oberfläche einer Kugel vom gleichen Radius verteilt denken; auf die Einheit dieser Kugelfläche entfällt nur der vierte Teil derjenigen Lichtmenge, die auf die Einheit der ebenen Kreisfläche kommt.

Die Messungen wurden mit zwei Blenden verschiedener Größe ausgeführt und der Abstand zwischen Blenden und schwarzer Körperöffnung etwas variiert, um die Genauigkeit der oben angegebenen Justierung zu prüfen. Es ergaben sich dabei z. B. die folgenden Werte der Lichtstärke, wo mit *A* und *B* die mit zwei verschiedenen Blenden, mit *I* und *II* die in zwei um 15 cm verschiedenen Abständen vorgenommenen Messungen bezeichnet sind.

Tabelle 1.

Messung	Lichtstärke
<i>A II</i>	0,01974 HK/mm ²
<i>A II</i>	0,01972
<i>A I</i>	0,02005
<i>A I</i>	0,01974
<i>B II</i>	0,02008
<i>B I</i>	0,02027

Bei den einzelnen Helligkeitsmessungen, ebenso bei der Ausmessung der Blenden unter der Teilmaschine betragen die äußersten Abweichungen ca. 0,5 Proz.

Blende *A* hat einen Durchmesser von 5,149, Blende *B* von 10,063 mm.

§ 3. Das im schwarzen Körper befindliche Pt-PtRh-Thermoelement, durch welches die zu den Helligkeitsmessungen gehörigen Temperaturen des schwarzen Körpers angezeigt werden, ist ein in der Reichsanstalt auf Grund der Holborn-Dayschen¹⁾ Skala geeichtes. Bei dieser Eichung sind die

1) L. Holborn u. A. Day, Wied. Ann. 68. p. 817. 1899 und Ann. d. Phys. 2. p. 505. 1900.

Temperaturen bekanntlich nur bis zum Goldschmelzpunkte, 1064° C, auf gasthermometrische Messungen begründet; von da ab ist die Skala nach einer empirisch gewonnenen Formel extrapoliert. Die Werte dieser Skala stimmen nahezu mit denjenigen der strahlungstheoretischen Temperaturskala überein, die sich, an die monochromatische Intensität des schwarzen Körpers bei 1064° anknüpfend, bei Benutzung des Wertes $1,46 \text{ cm. grad}^1)$ für die Konstante c_2 der Wienschen Spektralgleichung ergibt. Immerhin beträgt gemäß den Messungen von Warburg, Leithäuser, Hupka und Müller²⁾ am Palladiumschmelzpunkt, der sich nach gasthermometrischen Messungen zu $1549,2^{03})$ ergibt, der Unterschied dieser beiden Skalen ca. 5 Grad. Wir machen die Annahme, daß der Unterschied der beiden Skalen der Temperaturdifferenz proportional ist und erhalten so, durch Inter- und Extrapolation die Korrekturen, die an den auf der Eich-tabelle angegebenen Temperaturen für das Intervall zwischen 1064 und 1549° und für höhere Temperaturen anzubringen sind. Der bei der Interpolation gemachte Fehler dürfte jedenfalls sehr gering sein. Der Übergang von der auf den Wert $c_2 = 1,46$ aufgebauten Temperaturskala zu den auf anderen gemessenen Werten der Konstanten beruhenden ergibt sich auf Grund der Wienschen Spektralgleichung.

Ist T_1 die Ausgangstemperatur, T_2 die nach der Wienschen Gleichung aus dem Intensitätsanstieg zu berechnende höhere Temperatur, so ist

$$dT_2 = - \frac{T_2(T_2 - T_1)}{T_1} \frac{dc_2}{c_2}.$$

In Tab. 2 sind die auf Grund verschiedener gemessener Werte der Strahlungskonstanten c_2 in dieser Weise berechneten Temperaturskalen angegeben.

Nach der auf den Wert $c_2 = 1,437$ aufbauenden Skala stimmt der Palladiumschmelzpunkt mit dem durch gasthermo-

1) O. Lummer u. E. Pringsheim, Verh. d. D. Physik. Ges. 3. p. 36—46. 1901.

2) E. Warburg, G. Leithäuser, E. Hupka u. C. Müller, Ber. d. Berl. Akad. II, 35—43. 1913; vgl. auch Ann. d. Phys. 1913.

3) A. Day u. R. Sossmann, Sill. Journ. (4) 29. p. 93. 1910; vgl. auch „La mesure des températures élevées par le thermomètre à gaz“, Journ. de Phys. (5) 2. 727—749, 831—844, 899—911. 1912.

Tabelle 2.

Temperatur nach Holborn u. Day	Temperatur entsprechend $c_2 =$			
	1,460	1,450	1,440	1,437
1400 absol.	1401	1401,5	1401,9	1402,6
1500	1502	1503,2	1504,5	1504,9
1600	1603	1605,2	1607,4	1608,0
1700	1704	1707,2	1710,4	1711,4
1800	1805	1809,3	1813,7	1815,0
1900	1906	1911,5	1917,1	1918,8
2000	2007	2013,9	2020,8	2022,9
2100	2108	2116,4	2124,8	2127,3
2200	2209	2218,9	2228,8	2232,0
2300	2310	2321,5	2333,0	2336,5
2400	2411	2424,3	2437,6	2441,6
2500	2512	2527,2	2542,4	2547,0
2600	2613	2630,1	2647,2	2652,3
2700	2714	2733,2	2752,4	2758,2

metrische Messungen erhaltenen gemäß Warburg usw.¹⁾ auf 1,4⁰ überein.

Die gemessenen Werte der horizontalen und mittleren sphärischen Lichtstärke (HK_0) des schwarzen Körpers sind in der folgenden Tabelle den auf Grund dieser verschiedenen Skalen erhaltenen Temperaturwerten zugeordnet.

Tabelle 3.

Absolute Temperatur für c_2				Lichtstärke in	
$= 1,460$	$= 1,450$	$= 1,440$	$= 1,437$	$\frac{HK_{hor.}}{cm^2}$	$\frac{HK_0}{cm^2}$
1295	1295	1295	1295	0,06	0,015
1586	1588	1590	1591	2,00	0,500
1731	1735	1738	1739	7,71	1,928

Diese Werte sind nach den oben gemachten Angaben auf ± 1 Proz. genau. Etwaige Temperaturschwankungen während der Helligkeitsmessungen sind hierin inbegriffen. Die Absolutwerte hängen noch von der Genauigkeit der Eichung des Thermoelementes und der Vergleichsglühlampe ab.

1) l. c. p. 323.

§ 4. Von diesen gemessenen Werten der Lichtstärke H_1 bei der Temperatur T_1 ausgehend, soll die Lichtstärke H_2 bei der Temperatur $T_2 = 2000^\circ$ abs. berechnet werden, um einen Vergleich mit den von Lummer und Pringsheim gemessenen Werten vornehmen zu können.

Dies kann nach der Lummer-Kurlbaumschen Potenzgleichung¹⁾

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^\alpha,$$

oder einfacher nach einem auf die Raschsche Gleichung²⁾

$$\lg \left(\frac{H_2}{H_1} \right) = \alpha \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \lg e$$

begründeten Extrapolationsverfahren geschehen. Die Raschsche Gleichung ergibt sich aus der Potenzgleichung, wenn

$$\alpha = x \cdot T$$

gesetzt wird.

Der Wert von α zeigt sowohl nach verschiedenen Messungen des Anstieges der Helligkeit mit der Temperatur wie nach den Berechnungen derselben eine geringe Abhängigkeit von der Temperatur.³⁾ Innerhalb eines begrenzten Temperaturintervalles kann man jedoch mit genügender Genauigkeit einen konstanten Wert von α benutzen. Aus den von Lummer und Kohn³⁾ berechneten Werten der Helligkeit des schwarzen Körpers (in relativem Maße) ergibt die Rechnung für α den Wert 24860 zwischen 1500° und 2000° . Der Berechnung der hier benutzten Helligkeitswerte liegt der Wert 1,45 der Konstante c_2 zugrunde. Setzt man in der Raschschen Gleichung

$$\alpha = c_2 / \lambda,$$

so stimmt sie mit der Wienschen Gleichung in logarithmischer Form

$$\lg \left(\frac{H_{2\lambda}}{H_{1\lambda}} \right) = \frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \lg e$$

überein. Dies besagt⁴⁾, daß der Anstieg der Gesamthelligkeiten

1) O. Lummer u. F. Kurlbaum, Verh. d. D. Physik. Ges. 2. p. 89—92. 1900.

2) E. Rasch, Ann. d. Phys. 14. p. 193—203. 1904.

3) O. Lummer u. H. Kohn, Jahresber. d. Schles. Gesellsch. für vaterl. Kultur 1915. M. Pirani u. H. Miething, Verh. d. D. Physik. Gesellsch. 17. p. 219. 1915.

4) M. Pirani u. H. Miething, l. c.

in einem begrenzten Temperaturintervall, in welchem α konstant zu nehmen ist, der gleiche ist wie der der monochromatischen Intensitäten für eine gewisse Wellenlänge

$$\lambda = \frac{c_2}{\alpha}.$$

Beim Übergang zu einem anderen c_2 -Wert und somit zu einer anderen Temperaturskala, wird sich also der Wert von α und der Wert des Verhältnisses $\lg \left(\frac{H_2}{H_1} \right)$ in gleicher Weise wie c_2 selbst ändern. Mit den gemäß dieser Überlegung für die verschiedenen Temperaturskalen berechneten Werten für α sind die in Tab. 4 angegebenen horizontalen und mittleren sphärischen Lichtstärken des schwarzen Körpers bei 2000°

Tabelle 4.
Lichtstärke des schwarzen Körpers bei 2000° abs.

Temperaturskala entsprechend $c_2 =$							
1,460		1,450		1,440		1,437	
Ausgangs- temperatur	$\frac{HK_{hor.}}{cm^2}$	Aus- gangs- temp.	$\frac{HK_{hor.}}{cm^2}$	Aus- gangs- temp.	$\frac{HK_{hor.}}{cm^2}$	Aus- gangs- temp.	$\frac{HK_{hor.}}{cm^2}$
1586	52,3	1588	50,3	1590	48,3	1591	47,5
1731	53,8	1735	51,8	1738	49,6	1739	49,0
Mittelwert:	53,05		51,05		48,95		48,25
	$\frac{HK_0}{cm^2}$		$\frac{HK_0}{cm^2}$		$\frac{HK_0}{cm^2}$		$\frac{HK_0}{cm^2}$
	13,26		12,76		12,24		12,06

Tabelle 5.
(Nach Lummer-Pringsheim.)

Temperaturskala entsprechend $c_3 =$							
1,460		1,450		1,440		1,437	
Ausgangs- temperatur	$\frac{HK_{hor.}}{cm^2}$	Aus- gangs- temp.	$\frac{HK_{hor.}}{cm^2}$	Aus- gangs- temp.	$\frac{HK_{hor.}}{cm^2}$	Aus- gangs- temp.	$\frac{HK_{hor.}}{cm^2}$
1449	48,7	1450	46,9	1451	44,8	1452	43,9
1603	48,6	1605	46,9	1607	45,0	1608	44,3
1712	52,0	1715	50,1	1718	47,9	1719	47,3
Mittelwert:	49,77		47,97		45,87		45,17
	$\frac{HK_0}{cm^2}$		$\frac{HK_0}{cm^2}$		$\frac{HK_0}{cm^2}$		$\frac{HK_0}{cm^2}$
	12,44		11,99		11,47		11,29

gewonnen. In Tab. 5 sind zum Vergleich die in genau derselben Weise auf Grund der Lummer-Pringsheimschen Messungen¹⁾ extrapolierten Lichtstärken des schwarzen Körpers bei 2000° angeführt.

Der tiefste gemessene Helligkeitswert bei 1295° (vgl. Tab. 3) ist hier nicht als Ausgangspunkt herangezogen, da bei ihm infolge der geringen Lichtstärke die Meßgenauigkeit geringer als bei den beiden anderen Punkten war.

Zwischen den neugemessenen Werten und denen von Lummer und Pringsheim besteht eine relativ gute Übereinstimmung.

§ 5. Mit Hilfe der neugewonnenen Daten wurde für den Vergleich der Leistungsfähigkeit unserer gebräuchlichen Lichtquellen mit derjenigen des schwarzen Körpers, im besonderen gleicher Temperatur, die mittlere räumliche Hefnerkerzenzahl berechnet, die bei der Temperatur von 2000° abs. auf *ein* Watt gesamter *ausgestrahlter* Energie entfällt. Diese Größe ist identisch mit der „technischen Ökonomie“

$$= \frac{\text{Lichtstärke}}{\text{zugeführte Energie}} \quad 2)$$

derjenigen Lichtquellen, bei welchen alle *zugeführte* in *ausgestrahlte* Energie umgewandelt wird, wie z. B. mit großer Annäherung bei den Kohlefadenglühlampen (vgl. p. 332).

Die Wahl des Wertes für die Konstante σ im Stefan-Boltzmannschen Gesetze, nach welchem wir die Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers zu berechnen haben, wird in gewissem Sinne durch die einmal zugrunde gelegte Temperaturskala, d. h. durch den für die Konstante c_2 gewählten Wert vorgeschrieben.

Nach dem Stefan-Boltzmannschen und dem Planckschen Gesetze ist das Konstantenpaar c_2 und σ durch die Gleichungen

$$c_2 = c \cdot \frac{h}{k},$$

$$\sigma = \frac{12\pi^5}{15} \frac{k^4}{c^2 h^3}$$

gegeben. Es besteht also eine gewisse Abhängigkeit zwischen c_2 und σ , welche durch die gemeinsame Abhängigkeit von

1) l. c. p. 321.

2) O. Lummer u. H. Kohn, l. c. p. 325

dem universellen Konstantenpaar h und k hervorgerufen ist. (h ist das Plancksche Wirkungsquantum, k die für die kinetische Energie der Moleküle charakteristische Konstante, c die Lichtgeschwindigkeit; α hat den Zahlenwert 1,0823.) Auf Grund dieser Abhängigkeit können wir also das eine Konstantenpaar aus den experimentell ermittelten Werten des anderen berechnen. Die experimentelle Bestimmung von h und k erfolgt z. B. durch Messung des photoelektrischen Effektes und des Elementarquantums e der Elektrizität. Nach den neuesten Messungen von Millikan¹⁾ beträgt $e = 4,77 \cdot 10^{-10}$ elektrost. Einh., übereinstimmend mit dem Mittelwerte aus einer Anzahl neuerer Messungen, die untereinander im übrigen jedenfalls besser als die verschiedenen gemessenen Werte von σ übereinstimmen²⁾, woraus sich die Werte

$$h = 6,58 \cdot 10^{-27} \text{ (erg.sec) und} \\ k = 1,368 \cdot 10^{-16} \text{ erg/grad}$$

ergeben.

Mit Hilfe dieser Werte folgen nach den obigen Gleichungen für die Strahlungskonstanten die Werte

$$\sigma = 5,60 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2 \cdot \text{grad}^4} \text{ und} \\ c_2 = 1,4440 \text{ cm} \cdot \text{grad}$$

Diese voneinander abhängigen Werte stehen jedenfalls in gutem Einklang mit den experimentell nach völlig voneinander unabhängigen Methoden gewonnenen Werten von σ und c_2 , z. B. mit den Mittelwerten aus allen neueren Messungen derselben.

$$\sigma = 5,76 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2} \text{ und} \\ c_2 = 1,4400 \text{ cm} \cdot \text{grad}$$

In dem Bestreben, die Zahl der physikalischen Konstanten möglichst zu verringern, ist es jedenfalls zweckmäßig, mit diesen Werten zu rechnen.

Wollen wir jedoch direkt experimentell gewonnene Werte von σ und c_2 benutzen, so dürfen wir jedenfalls wegen der gemeinschaftlichen Abhängigkeit der Konstanten vom Elementarquantum e nicht beliebige Werte kombinieren. Aus

1) R. A. Millikan, Phys. Review 7. p. 18. 1916.

2) Vgl. z. B. R. Pohl, Zeitschr. d. Radioakt. u. Elektr. 8. p. 406. 1911.

Tabelle 6.

Beobachter von σ	$\sigma \cdot 10^{13}$ Watt $\text{cm}^2 \cdot \text{grad}^{-1}$	c_3 nach	1,420	1,435	1,437	1,440	1,450	1,460
			Holborn u. Valentiner ⁸⁾	Holborn u. Valentiner	Warburg usw. ¹⁰⁾		Paschen ¹¹⁾ Wanner ¹²⁾	Lummer u. Pringsheim ¹³⁾
			$e \cdot 10^{10}$	$e \cdot 10^{10}$	$e \cdot 10^{10}$	$e \cdot 10^{10}$	$e \cdot 10^{10}$	$e \cdot 10^{10}$
Bauer u. Moulin ¹⁾ 1909	5,30			$h \cdot 10^{27}$	$h \cdot 10^{27}$	$h \cdot 10^{27}$	$h \cdot 10^{27}$	$h \cdot 10^{27}$
Kurlbaum ²⁾ . . 1898	5,32							
Kurlbaum . . . 1912	5,45		4,34 5,89	4,48 6,14	4,51 6,18	4,53 6,23	4,62 6,40	4,72 6,58
Westphal ³⁾ . . . 1912	5,54		4,45 6,03	4,59 6,29	4,61 6,33	4,64 6,38	4,73 6,56	4,83 6,74
Valentiner ⁴⁾ . . 1910	5,58							
Shakespeare ⁵⁾ . . 1911	5,67		4,55 6,18	4,70 6,44	4,72 6,48	4,75 6,53	4,85 6,72	4,95 6,90
Gerlach ⁶⁾ . . . 1916	5,85							
Féry ⁷⁾ 1909	6,30		4,77 6,48	4,92 6,76	4,95 6,79	4,98 6,85	5,08 7,04	5,19 7,24
Féry u. Dreesq ⁸⁾ 1911	6,51		5,13 6,98	5,30 7,28	5,33 7,32	5,36 7,38	5,47 7,68	5,59 7,80

1) E. Bauer u. M. Moulin, Journ. d. Phys. 9, p. 468. 1910.

2) F. Kurlbaum, Wied. Ann. 65, p. 746. 1898 und Verh. d. D. Physik. Ges. 14, p. 576. 1912.

3) W. H. Westphal, Verh. d. D. Physik. Ges. 14, p. 987. 1912.

4) S. Valentiner, Ann. d. Phys. 31, p. 275. 1910.

5) G. A. Shakespeare, Proc. Roy. Soc. 86, A, p. 180. 1911.

6) W. Gerlach, Ann. d. Phys. 50, p. 259. 1916.

7) Ch. Féry, Bull. Soc. Trans. Phys. (2) 4, 1909.

8) Ch. Féry u. M. Dreesq, Journ. d. Phys. (1) 5, p. 551. 1911.

9) L. Holborn u. S. Valentiner, Ann. d. Phys. 22, p. 1. 1907.

10) E. Warburg, G. Leithäuser, E. Hupka u. C. Müller, Ber. d. Berl. Akad. II, p. 35–43. 1913; vgl. auch Ann. d. Phys. 1913.

11) F. Paschen, Ber. d. Berl. Akad. p. 405–959. 1899.

12) H. Wanner, Ann. d. Phys. 2, p. 141. 1900.

13) O. Lummer u. E. Pringsheim, Verh. d. D. Physik. Ges. 3, p. 36–46. 1901.

Tab. 6 ist zu ersehen, zu welchen Werten von e und h die Kombination je zweier gemessenen Werte von σ und c_2 gemäß den Gleichungen p. 327 u. 328 führt. Durch doppeltes Unterstreichen sind diejenigen Kombinationen gekennzeichnet, aus denen sich e - und h -Werte ergeben, die fast vollkommen mit den gemessenen Werten dieser Konstanten übereinstimmen. Durch einfaches Unterstreichen sind die noch einigermaßen mit dem Experiment in Einklang stehenden Werte hervorgehoben.¹⁾

Unter Benutzung der in Tab. 3 gegebenen Lichtstärken und der nach Tab. 6 zu den verschiedenen c_2 -Werten gehörigen σ -Werte, erhält man somit für die Hefnerkerzenzahl pro Watt des schwarzen Körpers bei 2000° die folgenden Werte (Tab. 7), welche ganz erheblich von einander abweichen und viele Unstimmigkeiten in der Literatur erklären.

Tabelle 7.

c_2	$\sigma \cdot 10^{12} \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2}$	$\frac{HK_0}{\text{Watt}}$
1,460	5,32	0,156
1,450	5,40	0,148
1,440	5,60	0,137
1,437	5,67	0,133

§ 6. Es soll ferner mit Hilfe der neugewonnenen Werte der Lichtstärke des schwarzen Körpers die Konstante im Gesamtstrahlungsgesetze der Glühlampenkohle und ihr Absorptionsvermögen ermittelt werden; im besonderen interessiert hierbei die sogenannte unpräparierte Kohle, für welche keine direkten Bestimmungen der genannten Konstanten vorliegen.

Nach den Untersuchungen von Lummer¹⁾, die sich ihrer Methode nach auf das sichtbare Spektrum und auf das kurzwellige ultrarote Gebiet ca. bis 5 μ erstrecken und sich über das Temperaturintervall von ca. 1300—2500° abs. ausdehnen, strahlt die Glühlampenkohle innerhalb dieser Grenzen wie ein grauer Körper; d. h. ihr Absorptionsvermögen A_λ ist unabhängig von der Wellenlänge = A , ihr Emissionsvermögen

1) Vgl. a. S. Valentinær, Ann. d. Phys. 31. p. 275. 1912.

2) O. Lummer, Jahresber. d. Schles. Gesellsch. f. vaterländ. Kultur 1913 und „Verflüssigung der Kohle und Herstellung der Sonnentemperatur“, Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1914.

zeigt den gleichen Verlauf wie beim schwarzen Körper gleicher Temperatur; ihr Gesamtstrahlungsgesetz ist, abgesehen vom Zahlenwert der Konstante, das gleiche wie beim schwarzen Körper. Die Lummerschen Untersuchungen, im besonderen auch die daran anschließenden von E. Benedict¹⁾, bringen ihrer Methode nach auch den Beweis, daß in dem betrachteten Temperaturintervall das Absorptionsvermögen unabhängig von der Temperatur ist.²⁾ Die genannten Resultate sind an sogenannter präparierter Kohle gewonnen; es werde die Annahme gemacht, daß sie auch für die unpräparierte Kohle Geltung haben.

Es seien $S_\lambda d\lambda$, S , σ das Emissionsvermögen, die Gesamtstrahlung und die Konstante im Gesamtstrahlungsgesetze des schwarzen Körpers, $E_\lambda d\lambda$, E und μ die entsprechenden Größen für die Kohle; dann folgt auf Grund des Kirchhoffschen Gesetzes:

$$E = \mu T^4 = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = A \int_0^\infty S_\lambda d\lambda = A \sigma T^4 = A S,$$

$$E = A \cdot S,$$

$$\mu = A \cdot \sigma.$$

In gleicher Weise folgt für die Beziehung der Gesamthelligkeiten H_S und H_E des schwarzen und grauen Körpers:

$$H_E = \int_{\lambda \text{ viol.}}^{\lambda \text{ rot.}} \varepsilon_\lambda E_\lambda d\lambda = A \int \varepsilon_\lambda S_\lambda d\lambda = A \cdot H_S,$$

$$H_E = A \cdot H_S;$$

hier bedeutet ε_λ die Helligkeitsempfindlichkeit der Netzhautzapfen. Das Integral wird über das sichtbare Spektralgebiet erstreckt. Daß das Auge die monochromatischen Helligkeiten $\varepsilon_\lambda S_\lambda d\lambda$ zu der Gesamthelligkeit integriert, hat die Übereinstimmung zwischen gemessenen und auf die angegebene Weise berechneten Helligkeitswerten ergeben.³⁾

Bei einundderselben Temperatur ist also das Verhältnis der Gesamthelligkeit zur Gesamtstrahlung oder in besonderen Einheiten die HK₀-Zahl pro 1 Watt ausgestrahlter Energie

1) E. Benedict, Dissert. Breslau 1915; vgl. auch Ann. d. Phys. 47. p. 641. 1915.

2) Vgl. auch E. P. Hyde, Astrophys. Journ. 36. p. 89. 1912.

3) O. Lummer u. H. Kohn, l. c. p. 325.

für den schwarzen Körper die gleiche wie für den grauen Strahler, und andererseits folgt aus dem Verhältnis der Hefnerkerzenzahl oder auch der Gesamtstrahlung (pro Flächeneinheit) beider Strahler bei gleicher $\frac{HK_0}{\text{Watt}}$ -Zahl (d. h. gleicher Temperatur) unmittelbar, ohne Kenntnis der Temperatur das Absorptionsvermögen und die Konstante im Gesamtstrahlungsgesetze des grauen Körpers.

Nach verschiedenen Untersuchungen¹⁾ wird bei den Kohlefadenglühlampen mit U-förmigem Bügel die zugeführte Energie mindestens bis auf 2 Proz. in ausgestrahlte übergeführt, so daß wir die *ausgestrahlte* Energie durch die *zugeführte* ersetzen können und die für die Bestimmung der Konstanten benötigte $\frac{HK_0}{\text{Watt}}$ -Zahl einfach durch Messung der mittleren sphärischen Lichtstärke in HK_0 und der zugeführten Watts erhalten. Um den Vergleich mit dem für den schwarzen Körper erhaltenen Wert vornehmen zu können, ist noch eine Erhöhung der gemessenen HK_0 -Zahl um 9 Proz. infolge des Verlustes durch Reflexion an der Glasglocke der Lampe anzubringen, außerdem die Fadenoberfläche zu bestimmen, um die Lichtstärke pro Flächeneinheit zu ermitteln.

Bei 1735° abs., d. h. $0,0394 \frac{HK_0}{\text{Watt}}$ hat der schwarze Körper gemäß Tab. 3 eine mittlere sphärische Lichtstärke von

$$1,928 \frac{KH_0}{\text{cm}^2},$$

die Messungen an einem sogenannten unpräparierten Faden ergaben

$$1,49 \frac{HK_0}{\text{cm}^2} (\text{red.}),$$

die an einem präparierten Faden

$$1,01 \frac{HK_0}{\text{cm}^2} (\text{red.}).$$

Demnach ergibt sich das Absorptionsvermögen der unpräparierten Kohle zu

$$A_0 = 0,773,$$

das der präparierten zu

$$A_1 = 0,524.$$

1) E. P. Hyde, Cady, Worthing, Transactions III. Eng. Soc. 6. p. 238. 1911, im besondern auch nach einer im Druck befindlichen Dissertation von Hrn. cand. phil. F. Conrad.

Hieraus ergeben sich für die Konstante im Gesamtstrahlungsgesetze die Werte $\mu_0 = 1,034 \cdot 10^{-12} \text{ g-Cal/cm}^2 \text{ sec. grad}^4$

$$\mu_1 = 0,701$$

,,

Die Lummerschen direkten Messungen der Kohlekonstanten μ_1 für präparierte Kohle durch Vergleich mit einem (präparierten) Kohlekasten¹⁾ haben den Wert $\mu_1 = 0,725$ ergeben, welchem der Wert $A_1 = 0,548$ entspricht. Die Abweichungen von ca. 4 Proz. können natürlich aus der verschiedenen Art der Bestimmung hervorgehen; im besonderen kann der Wert der Fadenoberfläche, welcher bei der indirekten Methode direkt eingeht, nur auf ca. 2 Proz. genau ermittelt werden. Wahrscheinlich ist aber auch, daß die Strahlungseigenschaften der Präparierung zufolge von Lampe zu Lampe etwas verschieden sind.

Auf Grund der gleichen Betrachtungen können wir die Werte für die Konstanten der unpräparierten Kohle auch aus den von Lummer direkt für die präparierte Kohle gefundenen Werten ermitteln. Für beide Lampentypen wurden für verschiedene Glühzustände, d. h. $\frac{\text{Watt}}{\text{HK}_{\text{hor.}}}$ -Werte die $\frac{\text{HK}_{\text{hor.}}}{\text{cm}^2}$ ermittelt. Das hiernach berechnete Helligkeitsverhältnis H_0/H_1 beider Fäden bei gleicher $\frac{\text{Watt}}{\text{HK}_{\text{hor.}}}$ -Zahl ist in der vierten Vertikalreihe der Tab. 8 eingetragen, im übrigen auch aus Fig. 1 zu entnehmen.

Tabelle 8.

Watt pro $\text{HK}_{\text{hor.}}$	$\frac{\text{HK}_{\text{hor.}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{\text{HK}_{\text{hor.}}}{\text{cm}^2}$	$\frac{H_0}{H_1}$
300	0,050	0,034	1,470
200	0,084	0,058	1,458
100	0,220	0,150	1,467
80	0,290	0,200	1,450
60	0,423	0,285	1,484
40	0,755	0,510	1,480
30	1,13	0,770	1,467
25	1,45	0,990	1,465
20	1,92	1,31	1,466
15	2,90	1,99	1,457
10	5,30	3,60	1,472
7,5	7,98	5,58	1,451
5,0	14,55	10,00	1,455
4,0	20,30	14,00	1,450
3,0	32,30	22,00	1,455

Mittel: 1,463

1) O. Lummer, l. c. p. 330.

Das Verhältnis H_0/H_1 ist in einem weiten Intervall (Temperaturgebiet) konstant, woraus folgt, daß wenn eine Änderung des Absorptionsvermögens oder auch der Umsetzung der zugeführten in ausgestrahlte Watts mit der Temperatur vorliegen sollte, diese Änderung jedenfalls für beide Fadentypen die gleiche ist.

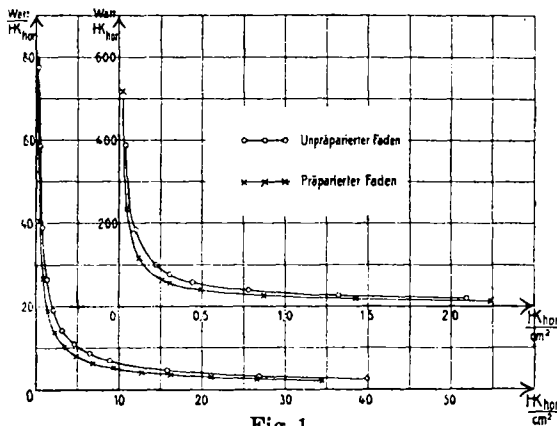


Fig. 1.

Aus dem Mittelwerte $H_0/H_1 = 1.463$ und den Konstanten für die präparierte Kohle nach Lummer ergeben sich für die unpräparierte Kohle die Werte $A_0 = 0.793$;

$$\mu_0 = 1,060 \cdot 10^{-12} \frac{\text{g-Cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}^4}.$$

In Tab. 9 werden die verschiedenen Werte der Konstanten noch einmal zusammengestellt.¹⁾

Tabelle 9.

	A_1	A_0	$\frac{\mu_1 \cdot 10^{12}}{\text{g-Cal}} \cdot \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}^4}$	$\frac{\mu_0 \cdot 10^{12}}{\text{g-Cal}} \cdot \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{grad}^4}$
Direkte Messung	0,548		0,725	
durch Beziehung auf die präparierte Kohle . .		0,793		1,060
durch Beziehung auf den schwarzen Körper . .	0,524	0,773	0,700	1,034

1) Diese Werte stehen in Einklang mit den von H. Senftleben und E. Benedict in einer im Druck befindlichen Arbeit erhaltenen Resultaten (Ann. d. Phys. 1917).

Aus den Watts, welche bei den in der Tab. 8 zugrundeliegenden Messungen den Lampen zugeführt wurden, sind nach der von Lummer angegebenen Methode¹⁾ unter Benutzung der mit Beziehung auf den schwarzen Körper gefundenen Konstanten μ_0 und μ_1 die zugehörigen Fadentemperaturen berechnet worden. Die Resultate sind in den Tabb. 10 und 11 vermerkt.

Tabelle 10.

Präparierter Kohlefaden	
Watt HK _{hor.}	Absol. Temperatur
517,6	1307°
233,4	1399
117,3	1474
64,94	1546
57,82	1562
40,74	1617
26,87	1680
18,92	1741
13,74	1801
10,40	1862
8,16	1918
6,44	1971
5,23	2023
4,25	2071
3,69	2124
3,09	2172
2,67	2220
2,27	2270

Tabelle 11.

Unpräparierter Kohlefaden	
Watt HK _{hor.}	Absol. Temperatur
909,1	1250°
387,3	1357
184,4	1430
98,37	1500
77,48	1526
58,47	1566
38,96	1628
26,46	1687
19,01	1743
14,18	1798
10,90	1850
8,68	1901
6,98	1947
4,73	2040
3,31	2128
2,64	2215

Die $\frac{\text{Watt}}{\text{HK}_{\text{hor.}}}$ -Werte als Funktion der Temperatur sind in Fig. 2 dargestellt. Wie es die zugrundegelegten Betrachtungen verlangen, ergibt sich für beide Fadentypen innerhalb der Fehlergrenzen eine einheitliche $\frac{\text{Watt}}{\text{HK}_{\text{hor.}}}$ -Temperaturkurve.²⁾

1) O. Lummer, l. c. p. 330.

2) Diese Kurve stimmt mit der in der Lummerschen Broschüre (l. c. p. 330) gegebenen gut überein, obwohl jene auf Grund des Wertes $\mu_1 = 0,725$, diese mit $\mu_1 = 0,701$ gewonnen ist; es scheint also in der Tat zwischen der Präparierung der beiden Fäden (vgl. die Bemerkung p. 333) ein kleiner Unterschied bestanden zu haben. Sehr stark weichen beide Kurven von einer von Lummer und Kohn (Sitzungsber. d. Schles. Gesellsch. f. vaterländ. Kultur 1915) gegebenen ab, worauf ich zuerst

Zusammenfassung: Die Lichtstärke des schwarzen Körpers in $\frac{HK_0}{\text{cm}^2}$ wird bei verschiedenen Temperaturen gemessen, wobei die Temperaturwerte in den verschiedenen strahlungstheoretischen Temperaturskalen angegeben werden. Aus der

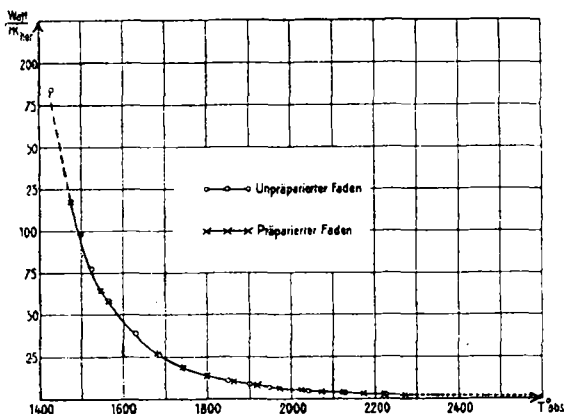


Fig. 2.

Beziehung zwischen Flächenhelligkeit und Temperatur wird hiernach die Lichtstärke bei 2000° abs. extrapoliert. Auf Grund dieses Wertes wird, als Bezugswert, die $\frac{HK_0}{\text{Watt}}$ -Zahl des schwarzen Körpers bei 2000° abs. berechnet, wobei Tabellen für die in den verschiedenen Temperaturskalen zusammengehörigen Werte der Strahlungskonstanten gegeben werden. Schließlich werden unter Benutzung der gemessenen Lichtstärke und Ökonomie des schwarzen Körpers die Strahlungskonstanten der Glühlampenkohle ermittelt.

Zu der vorliegenden Arbeit wurde ich angeregt bei meiner Teilnahme an Untersuchungen, die für die demnächst erscheinende Neubearbeitung der „Ziele der Leuchttechnik“ von O. Lummer erforderlich waren.

Breslau, Physikal. Institut der Universität, Juli 1917.

durch Hrn. Dr. A. R. Meyer, Berlin, in dankenswerter Weise brieflich aufmerksam gemacht wurde. Jene Kurve ist an unpräparierter Kohle gewonnen, für welche seinerzeit unrichtiger Weise die Konstante der präparierten Kohle benutzt wurde.

(Eingegangen 10. August 1917.)