5. *Das Lummer-Pringsheimsche Spektral-Flickerphotometer als optisches Pyrometer*[1]; *von E. Thürmel.*

§ 1. Ältere Untersuchungen und Folgerungen aus der J. v. Kriesschen Theorie.[2])

Verringert man in einem normalen Spektrum die Intensität für alle Wellenlängen in demselben Verhältnis, so bleibt bis zu einer gewissen Grenze die Helligkeitsverteilung dieselbe. Unterhalb dieser Grenze tritt das sogen. Purkinjephänomen[3]) auf, d. h. die Helligkeitskurve verändert ihre Gestalt und zwar verschiebt sich das Helligkeitsmaximum nach dem kurzwelligen Ende zu. Die relative Empfindlichkeit des Auges für verschiedene Farben ändert sich also im allgemeinen mit der Intensität.[4]) Diese Tatsache ergibt sich aus verschiedenen älteren Untersuchungen, auf die hier wegen ihrer Konsequenzen kurz eingegangen werden soll.

Die relative Empfindlichkeit für Spektralfarben bei möglichst *schwachen* Intensitäten ist mittels der Schwellenmethode[5]) von H. Ebert[6]), A. Pflüger[7]) und A. König[8]) bestimmt worden.[9]) Bei sehr schwachen Intensitäten hat danach die

1) Auszug aus der gleichnamigen Breslauer Dissertation 1910.

2) Die Angaben darüber sind z. T. dem Buche von K. Schaum, Photochemie und Photographie 1. 1908 entnommen.

3) O. Lummer, „Die Lehre von der strahlenden Energie", p. 395, 401, 402. 1907. (Müller-Pouillet-Pfaundler Bd. II.)

4) J. v. Kries, Nagels Handb. 3. p. 176. 1905.

5) Über Schwellenwerte vgl. J. v. Kries, l. c. p. 19 u. K. Schaum, l. c. p. 67.

6) H. Ebert, Wied. Ann. 33, p. 136. 1888.

7) A. Pflüger, Ann. d. Phys. 9. p. 185—208. 1902.

8) A. König, Beitr. z. Psych. u. Phys. der Sinnesorg. p. 309—388. Hamburg 1891; Königs ges. Abh. zur phys. Optik p. 144—213. 1903.

9) Die Resultate finden sich bei K. Schaum, l. c.

Empfindlichkeitskurve bei verschiedenen Personen ihr Maximum zwischen 495—530 $\mu\mu$ (vgl. Fig. 1).

A. König erweiterte das Gebiet seiner Messungen, indem er die Empfindlichkeit auch bei größeren Intensitäten bestimmte. Er verglich die Helligkeit zahlreicher Spektralgebiete eines Dispersionsspektrums mit einem Vergleichsfelde, dessen Farbe der Wellenlänge $\lambda = 535\,\mu\mu$ entsprach. Indem er die Intensität des Vergleichsfeldes alle möglichen Werte durchlaufen ließ, konnte er den Vergleich bei verschiedenen Helligkeitsstufen ausführen, von denen einige hier nach Schaum[1]) angegeben sind:

Helligkeitsstufe	Helligkeit des Vergleichsfeldes in Meterkerzen
A	0,00072
B	0,012
D	0,74
H	191

Für die Helligkeitsstufen *A*, *D* und *H* fand er das Empfindlichkeitsmaximum bei 509 (Fig. 1), 530 und 555 $\mu\mu$ (Fig. 1).

Wie man sieht, verschiebt sich das Maximum mit zunehmender Helligkeit nach größeren Wellenlängen zu. Bei großer Helligkeit liegt es ungefähr bei 555 μ.

S. P. Langley[2]) hat die Empfindlichkeit bei einer Helligkeitsstufe, die etwa der Königschen Stufe *B* entspricht[3]), mittels der Sehschärfenmethode gemessen. Nach den Messungen von A. König sollte man das Maximum zwischen 509 und 530 $\mu\mu$ erwarten. Langley hat zwar nur sechs Punkte bestimmt und die Lage des Maximums ist daher nicht genau zu ermitteln, jedoch zeigt die Kurve in Fig. 1, daß es in der Nähe von 550 $\mu\mu$ und zwar eher nach dem roten Ende zu liegt, wie man aus dem Anstieg der Werte sieht.

---

1) Die Resultate finden sich bei K. Schaum, l. c.

2) S. P. Langley, Amer. Journ. **36.** p. 359. 1888; Phil. Mag. p. 1 bis 23. 5. Juli 1889.

3) Nach K. Schaum, l. c. p. 72.

Dieses abweichende Resultat läßt sich an Hand der J. v. Kriesschen Duplizitätstheorie erklären. Danach sind die lichtempfindlichen Organe des Auges die Stäbchen und Zapfen.[1]) Während die Stelle der Retina, mit der wir die Gegenstände beim deutlichen Sehen fixieren — also die *fovea centralis* und die ihr nächstliegenden Teile der *macula lutea* —

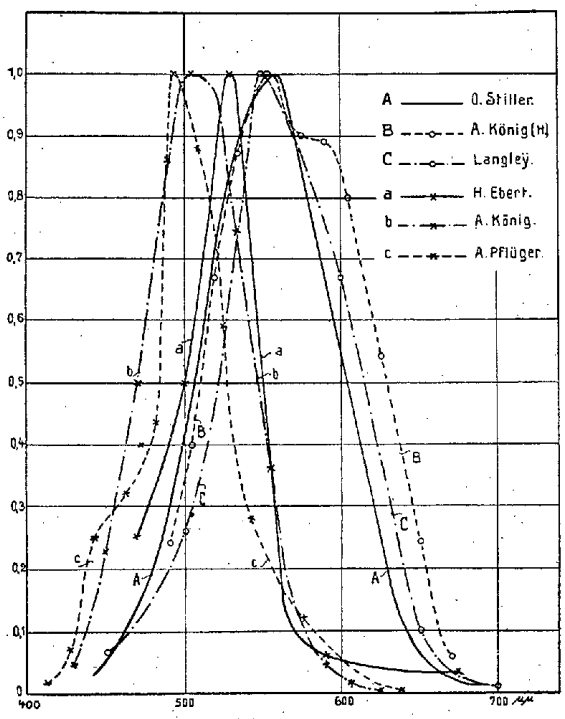

Fig. 1.

nur Zapfen enthält, befinden sich auf den der macula benachbarten Teilen auch Stäbchen, die in den peripheren Teilen der Netzhaut die Zapfen an Anzahl weit übertreffen. Nach J. v. Kries bilden die Zapfen den farbentüchtigen „Hellapparat", die Stäbchen[2]) hingegen den totalfarbenblinden „Dunkelapparat" des Auges.[3]) Bei großen Helligkeiten vermitteln die Zapfen das Sehen, bei schwachen hingegen die Stäbchen. Die Emp-

1) O. Lummer, l. c. p. 339. 1907.
2) und eventuell der Sehpurpur. J. v. Kries, l. c. p. 267.
3) J. v. Kries, l. c. p. 185—188.

findlichkeit der letzteren nimmt im Dunkeln außerordentlich zu (Dunkeladaptation). Die Zapfen zeigen die Eigenschaft der Adaptation in weit geringerem Maße. Eine experimentelle Stütze hat die Theorie durch Versuche von O. Lummer[1]) erhalten.

Vom Kriesschen Standpunkte aus müssen im allgemeinen, d. h. wenn nicht gerade *foveal* beobachtet wird, die Empfindlichkeitskurven für schwache Intensitäten die Stäbchenempfindlichkeit wiedergeben, während die Empfindlichkeit der Zapfen durch die Königsche H-Kurve dargestellt wird. Die Zapfen sind also am empfindlichsten für Licht von der Wellenlänge 555 $\mu\mu$ ungefähr, die Stäbchen für Wellenlängen zwischen 495 und 530 $\mu\mu$.

Da Langley auf das Deutlichwerden kleiner Buchstaben einstellte, *mußte er foveal*, d. h. mit den Zapfen beobachten. Er erhielt also *trotz der geringen Intensität die Kurve, wie sie großen Helligkeiten entspricht*, weil die Empfindlichkeitskurve für große Helligkeiten zugleich die Empfindlichkeitskurve der Zapfen ist.

Wir sehen hieraus, daß wir uns vom Purkinjephänomen frei machen können, wenn wir nur mit der Fovea beobachten. Wir erzielen damit zugleich Unabhängigkeit vom Adaptationszustande.[2])

Sowohl bei der Ermittelung der Schwellenwerte[3]) als auch bei der Königschen Methode[4]) der heterochromen Photometrie stellen sich der genauen Bestimmung der Helligkeitsempfindlichkeitskurve erhebliche Schwierigkeiten entgegen. Ein höherer Grad der Genauigkeit wurde erst durch Einführung des Flickerprinzipes[5]) ermöglicht. Während aber die bisher konstruierten Flickerphotometer sich nur zum Photometrieren von Mischfarben eignen, setzt uns das Spektral-Flickerphotometer von

---

1) O. Lummer, Verh. d. Deutsch. Physik. Ges. **6.** Nr. 2. 1904; Verh. d. Phys. Ges. Berlin **16.** 1897.

2) J. v. Kries, l. c. p. 182, 183.

3) J. v. Kries, l. c. p. 21.

4) J. v. Kries, l. c. p. 258.

5) O. N. Rood, Am. Journ. of Sc. **46.** p. 173. 1893; Polimanti, Zeitschr. f. Psych. u. Phys. d. Sinnesorg. **19.** p. 263.

O. Lummer und E. Pringsheim[1]) in den Stand, die Helligkeitsverteilung im Spektrum zu messen.

§ 2. Plan der eigenen Untersuchung.

O. Lummer und E. Pringsheim haben in der unten zitierten Veröffentlichung gezeigt, daß das Spektral-Flickerphotometer unter gewissen Bedingungen als optisches Pyrometer benutzt werden könne. Hat man nämlich mittels des Flickerphotometers die Empfindlichkeit des Auges festgestellt, und hat man gezeigt, daß diese Empfindlichkeit konstant ist, so kann man mit dem neuen Apparate die Temperatur leuchtender „schwarzer" Temperaturstrahler messen.

Im Prinzip wird die *Empfindlichkeit* folgendermaßen bestimmt. Nachdem das Flickerphotometer justiert und geeicht ist, photometriert man damit das Spektrum eines „schwarzen Körpers"[2]) und erhält so die relative Helligkeitsverteilung dieses Spektrums, wie es von dem Prisma des Flickerphotometers entworfen wird. Da die Temperatur des „schwarzen Körpers" mit dem zugehörigen Thermoelement gemessen werden kann, so ergibt sich aus der Planckschen Gleichung die Intensitätsverteilung für ein normales Spektrum. Ein Hauptfortschritt der Methode gegenüber den älteren besteht in dieser Benutzung der genau bekannten Energieverteilung des schwarzen Körpers. Reduziert man die Helligkeitsverteilung auf das Normalspektrum, so wird die Empfindlichkeit für jede Spektralfarbe in willkürlichem Maße gemessen, indem man das Verhältnis des Helligkeitswertes zum Intensitätswert an dieser Stelle bildet.

Kennt man so die Empfindlichkeit, so kann man die schwarze Temperatur eines leuchtenden Körpers folgendermaßen bestimmen. Mittels des Flickerphotometers stellt man zunächst das Helligkeitsverhältnis für zwei Farben im Normalspektrum des zu untersuchenden Körpers fest; da die Empfindlichkeit bekannt ist, so kennt man auch das Intensitäts-

---

1) O. Lummer u. E. Pringsheim, Jahresber. d. Schles. Ges. f. vaterl. Kultur 1906; Beibl. 1907. p. 466.

2) O. Lummer u. F. Kurlbaum, Verh. d. Phys. Ges. 17. p. 9.

verhältnis. Aus diesem kann man dann die Temperatur mit Hilfe der Planckschen Gleichung berechnen.

§ 3. Beschreibung des Apparates.

Das Flickerphotometer besteht aus einem gewöhnlichen Spektralapparat, dessen Kollimatorrohr zwei nebeneinander stehende vertikale Spalte trägt, die zur optischen Achse symmetrisch liegen und von derselben Lichtquelle gleichstark beleuchtet werden. Im Beobachtungsfernrohr entstehen dann zwei Spektren, die sich teilweise überdecken und gleich hell sind. Vor den Kollimatorspalten ist ein um seine horizontale Achse drehbarer Blechzylinder angebracht. Die Achse verläuft parallel zur Spaltebene, so daß der Zylindermantel an den beiden Spalten in ihrer Längsrichtung vorbeirotiert. Der Blechmantel ist so mit Ausschnitten versehen, daß beide Spalte abwechselnd mit Licht beschickt werden. Die beiden Spektren werden also jetzt nicht gleichzeitig, sondern abwechselnd erzeugt. Die Okularblende ist dementsprechend in beliebig schnellem Wechsel mit Licht von zwei verschiedenen Wellenlängen ausgefüllt.

Die Anordnung des rotierenden Zylinders bringt es mit sich, daß man das Licht nicht direkt von der Lichtquelle zu den Spalten führen kann. Man läßt es parallel zur Zylinderachse auf zwei im Innern des Hohlzylinders befindliche totalreflektierende Prismen und von da auf die Spalte fallen.

Blickt man bei einer beliebigen Fernrohrstellung ins Okular, so sieht man bei sehr langsamer Umdrehung des Zylinders den Okularspalt abwechselnd hintereinander mit zwei verschiedenen Farben ausgefüllt. Bei schneller werdender Rotation kann man die einzelnen Farben nicht mehr unterscheiden, sondern man sieht ein Flickern. Durch Veränderung der Breite des einen der beiden Kollimatorspalte jedoch läßt sich erreichen, daß das Flickern schwächer wird und schließlich ganz verschwindet. Nach dem Flimmerprinzip tritt dies ein, wenn die beiden zu vergleichenden Farben die gleiche Helligkeit besitzen. Nach dem Vierordtschen Prinzip verhalten sich dann die Helligkeiten dieser Farben bei *gleichen* Spaltbreiten umgekehrt wie die Kollimatorspaltbreiten, bei denen das Flickern verschwindet.

Durch Drehen des Beobachtungsfernrohres kann man bei einem bestimmten Spaltabstande jede Farbe des einen Spektrums mit einer ganz bestimmten des anderen zum Vergleich bringen. Um den Bereich der zu vergleichenden Spektralbezirke zu erweitern, ist dafür gesorgt, daß der Abstand der Spalte, dessen kleinster Wert 2 mm beträgt, auf 4, 6 usw. bis 12 mm vergrößert werden kann. Außerdem sind dem Apparat mehrere Prismen von verschiedener Dispersion beigegeben. Der Raum zwischen den Spalten ist durch Blenden verschlossen. Die Breite der Spalte wird durch Schrauben mit Trommelablesung reguliert. Einer Umdrehung gleich 100 Skt. entspricht eine Spaltbreite von 0,25 mm. Der vom Beobachter aus links liegende Spalt soll in folgendem mit I, der rechte mit II bezeichnet werden.

Prisma und Beobachtungsfernrohr können so umgelegt werden, daß die von den Spalten I und II ausgehenden Strahlen ihre Rollen genau vertauschen. (Rechts- und Linksstellung.) Diese Vorrichtung gestattet es, das Photometer so einzustellen, daß beide Spalte gleich stark beleuchtet werden. Macht man nämlich beide Spalte gleich breit, so kann man jetzt durch Drehen des Fernrohres einmal bei Rechts-, das andere Mal bei Linksstellung die beiden Wellenlängen aufsuchen, für die das Flickern verschwindet. Ergeben sich beide Male dieselben Wellenlängenpaare als gleich hell, so ist das Photometer richtig eingestellt. Das zu einer bestimmten Fernrohrstellung gehörige Wellenlängenpaar kann aus Dispersionskurven[1]) entnommen werden.

Die Einstellung des Fernrohres auf einen bestimmten Wellenlängenbezirk wird durch eine Schraube mit Trommel bewirkt und kann auf einer Skala abgelesen werden. Die Trommel gestattet, hundertstel Skalenteile zu messen. Die Eichung des Instrumentes geschieht folgendermaßen. Beide Kollimatorspalte werden möglichst schmal gemacht und mit homogenem Licht von bekannter Wellenlänge beleuchtet. Der eine Spalt wird zunächst durch einen Sektor des Zylindermantels verdeckt und die vom anderen Spalt entworfene Spek-

1) Diese sind von Hrn. O. Stiller im Physik. Institut zu Breslau bestimmt worden.

trallinie wird durch Drehen des Fernrohres in die Mitte des Okularspaltes gebracht. Die zugehörige Fernrohrstellung wird als Abszisse in einem orthogonalen Koordinatensystem abgetragen, die betreffende Wellenlänge als Ordinate. Dasselbe geschieht alsdann für den anderen Spalt. Wird dieses Verfahren noch für genügend viel andere Wellenlängen ausgeführt, so erhält man zwei Dispersionskurven, die um so mehr gegeneinander verschoben sind, je weiter die Kollimatorspalte auseinander liegen. Es genügt, das Photometer für die engste Spaltstellung (2 mm) zu eichen. Für die übrigen Spaltabstände können die Einstellungen berechnet werden, wenn man die Fernrohrstellung z. B. für eine Natriumlinie kennt. Da das Okular kein Fadenkreuz enthält, so geschieht die Einstellung der Spektrallinien auf die Mitte des Spaltes nach Schätzung. Die hierdurch hervorgerufene Ungenauigkeit beträgt ungefähr 2 Trommelteile. Dem entspricht ein möglicher Fehler in der Einstellung der Wellenlänge von ungefähr 0,5 $\mu\mu$ im roten Ende und von 0,1—0,2 $\mu\mu$ im kurzwelligen Ende, entsprechend der größeren Dispersion im Violett.

§ 4. Bestimmung der Helligkeitsverteilung im Spektrum der Nernstlampe.

Am vorteilhaftesten wäre es gewesen, die Strahlung des elektrisch geglühten „schwarzen Körpers" nach Lummer-Kurlbaum[1]) direkt mit dem Flickerphotometer zu untersuchen. Die Kollimatorlinse des Photometers wurde jedoch nicht von der Strahlung des dem Verfasser zur Verfügung stehenden „schwarzen" Körpers" ausgefüllt. Diesem Mangel hätte man durch Einschalten einer Blende abhelfen können. Hauptsächlich Sparsamkeitsgründe — der „schwarze Körper" erfordert Stromstärken von 70—80 Amp. und mehr — führten dazu, einen indirekten Weg einzuschlagen.

Als Lichtquelle wurde eine 220 Volt-Nernstlampe gewählt, deren Strahlung durch eine vorgeschaltete Mattscheibe diffus gemacht wurde. Es wurde also die Helligkeit der Mattscheibe untersucht. Absorptionsmessungen ergaben, daß die Wellen-

1) O. Lummer u. F. Kurlbaum, Verh. d. Phys. Ges. 17. p. 9.

längen von 460—680 $\mu\mu$ von der Scheibe in demselben Verhältnis geschwächt wurden.

Der Strahlengang von der Nernstlampe bis zur Mattscheibe verlief in einem geschwärzten Hohlraum. Vor der Mattscheibe war eine kreisrunde Blende von 2,5 cm Durchmesser angebracht. Von hier aus fielen die Lichtstrahlen auf die beiden totalreflektierenden Prismen. Die Entfernung der Mattscheibe von diesen Prismen wurde so gewählt, daß die Kollimatorlinse von beiden Spalten völlig und gleichmäßig beleuchtet wurde. Da es nicht gelang, die Scheibe so einzustellen, daß beide Spalte *genau* gleich viel Licht erhielten, so wurde die Helligkeitsverteilung sowohl bei Rechts- als auch bei Linksstellung gemessen und aus beiden Werten das Mittel genommen.

Um die Strahlung der Nernstlampe möglichst konstant zu halten, wurde diese nicht bei voller Belastung, sondern bei 200 Volt gebrannt.

Der rotierende Zylinder wurde durch einen kleinen Elektromotor betätigt. In den Tabellen ist unter einer besonderen Rubrik die mittlere Tourenzahl pro Minute angegeben, bei der für je ein Wellenlängenpaar das Flickern gerade verschwand.

Die Ausführung der Messungen gestaltete sich nun folgendermaßen. Zunächst wurden die beiden Kollimatorspalte gleich breit gemacht und das Fernrohr wurde auf das Wellenlängenpaar eingestellt, für das das Flickern verschwand. Die Helligkeit der so ermittelten gleich hellen Wellenlängen wurde als Einheit gewählt. Die Resultate sind in der Tab. 1 (für 2 mm Spaltabstand) wiedergegeben.[1]) Um eine etwa vorhandene Ungenauigkeit in der Nullstellung der Spalte möglichst zu eliminieren, wurde jede Messung bei zwei Spaltbreiten ausgeführt. Es sind immer die Mittel aus je fünf Einzeleinstellungen angegeben. Der mittlere Einstellungsfehler ist in $\mu\mu$ eingetragen.

---

1) Alle Messungen, die bei 2 mm Spaltabstand ausgeführt wurden, wurden auch bei einem Spaltabstand von 6 mm angestellt; die zugehörigen Tabellen sind aber hier, um Raum zu sparen, nicht angeführt.

Tabelle 1.

Rechtsstellung.

Spaltbreite in Skt. I	Spaltbreite in Skt. II	Einstellung des Beobachtungsfernrohres		Gleich helle Wellenlängen in $\mu\mu$	Mittlerer Fehler in $\mu\mu$ ausgedrückt	Tourenzahl in der Minute
10	10	36,88	36,76	$\lambda_I = 608$	$\Delta\lambda_I = 1{,}0$ $\Delta\lambda_{II} = 0{,}7$	264
25	25	36,65		$\lambda_{II} = 568$	$\Delta\lambda_I = 1{,}7$ $\Delta\lambda_{II} = 1{,}5$	275
				Linksstellung.		
10	10	21,81	21,88	$\lambda_I = 569$	$\Delta\lambda_I = 0{,}5$ $\Delta\lambda_{II} = 0{,}5$	296
25	15	21,95		$\lambda_{II} = 612$	$\Delta\lambda_I = 0{,}6$ $\Delta\lambda_{II} = 0{,}5$	340

Schon während der Vorarbeiten wurden zum Vergleiche Einstellungen auf gleiche Helligkeit auch ohne Flickern gemacht. Der rotierende Zylinder wurde dabei so in Ruhestellung gebracht, daß der Okularspalt zur Hälfte mit der einen, zur Hälfte mit der anderen Farbe ausgefüllt war. In der ersten Zeit wurden noch ziemlich große Unterschiede konstatiert. Die Übung brachte es aber bald mit sich, daß die Einstellungen mit und ohne Flickern annäherud gleiche Resultate ergaben. In einigen Tabellen sind die Einstellungen auf gleiche Helligkeit *ohne* Flickern angegeben. Die Werte für diese Angaben wurden durchweg nur mit einer einzigen Einstellung gewonnen, können also keinen Anspruch auf Genauigkeit erheben.

Von diesen beiden als gleich hell ermittelten Wellenlängen wurde nun im Spektrum nach beiden Seiten etappenweise vorgegangen. Aus der Dispersionskurve wurde abgelesen, wie das Fernrohr eingestellt werden mußte, damit z. B. die Farbe, die vorher in Spalt II war, nach Spalt I kam. Die Dispersionskurve ergab dann zugleich die neue Wellenlänge in Spalt II. Nachdem diese Farben photometriert waren, wurde dasselbe Verfahren wiederholt usw., bis das ganze Spektrum durchlaufen war. Da bei diesen Einstellungen die Fernrohrstellung für jedes Wellenpaar beibehalten werden mußte, so wurde das Flickern jetzt durch Verändern der Kollimatorspaltbreite zum Verschwinden gebracht.

Tabelle 2. Rechtsstellung.

Fernrohr	λ_1	λ_2	Spaltbreite		I/II oder II/I			Tourenzahl pro Min.	Veränderl. Spalt ohne Flickern	Bemerkungen
			I	II	Fehler in %		Mittel			
38,95	662	608	35 70	6,9 12,6	1,7 2,2	0,197 0,180	0,189	258 275	6,5	leicht
36,76	608	568	10 25	9,7 25,1	3,5 6,6	0,970 1,004	1,000*	282 275	12,0	ungenau*
34,50	568	535	12,8 20,3	25 40	1,6 1,6	0,512 0,508	0,510	252 240	12,0	leicht
32,50	535	508	5,2 10,2	15 30	1,9 3,9	0,341 0,340	0,340	188 189	5,5	leicht
30,00	508	485	7,2 12,9	30 60	1,7 2,5	0,240 0,215	0,227	167 170	8,0	zl. schwer**
27,70	485	467	16,1 22,6	50 75	4,7 2,3	0,322 0,301	0,316	154 150	15,0	schwer } ***
25,40	467	451	16,6 24,1	50 75	8,9 5,6	0,332 0,321	0,327	125 128	16,0	schwer } ***
23,15	451	437	23,0 62,0	75 200	3,6 5,0	0,307 0,310	0,308	107 111	27,0	schwer } ***
40,15	700	635	150 200	5,0 6,1	0,0 2,6	0,030 0,030	0,030	250 250	5,0	leicht. Sehr breite Spalte } Ergänzungsmessungen
37,90	635	588	20 30	9,9 14,1	1,2 1,3	0,495 0,470	0,482	248 297	11,0	leicht } Ergänzungsmessungen
35,70	588	551	10,8 21,2	15 30	1,5 1,0	0,720 0,707	0,713	303 300	11,0	leicht } Ergänzungsmessungen
33,40	551	521	9,1 16,6	20 40	0,9 1,6	0,455 0,415	0,435	267 255	9,0	leicht } Ergänzungsmessungen
31,10	521	496	9,3 13,0	40 60	2,8 1,5	0,232 0,217	0,224	253 255	10,0	zl. schwer** } Ergänzungsmessungen

Tabelle 2. Linksstellung.

Fernrohr	λ_2	λ_1	Spaltbreite I	Spaltbreite II	I/II oder II/I Fehler in %	I/II oder II/I	I/II oder II/I Mittel	Tourenzahl pro Min.	Veränderl. Spalt ohne Flickern	Bemerkungen
19,55	672	612	6,8 8,3	50 65	0,6 2,2	0,136 0,128	0,132	257 281	7,5	leicht
21,88	612	569	10 25	9,9 25,8	0,8 1,0	0,990 1,032	1,000*	298 335	8,5	ungenau*
24,20	569	534	25 40	12,0 18,9	1,5 0,9	0,480 0,472	0,476	285 302	10,5	leicht
26,60	534	506	30 50	7,9 13,0	1,8 0,9	0,263 0,260	0,262	291 325	8,0	leicht
29,00	506	482	50 75	9,8 14,4	3,3 1,9	0,196 0,192	0,194	247 238	8,2	zl. schwer**
31,45	482	462	50 75	13,6 18,9	5,3 5,0	0,272 0,252	0,262	201 205	16,0	schwer***
33,95	462	447	75 100	20,8 25,4	4,0 5,0	0,277 0,254	0,266	160 117	20,0	schwer***
36,35	447	435	100 150	22,1 32,8	5,8 4,1	0,221 0,119	0,220	96 94	20,0	
18,35	710	640	4,5	200	5,0	0,023	0,023	220	5,0	leicht. Breiter Spalt — Ergänzungsmessungen
20,65	640	590	8,8 13,1	20 30	1,8 1,7	0,440 0,437	0,438	287 306	9,5	zl. leicht — Ergänzungsmessungen
23,00	590	551	13,1 19,7	20 30	1,5 2,7	0,652 0,657	0,654	267 266	13,0	leicht — Ergänzungsmessungen
25,40	551	520	7,7 11,2	20 30	2,3 3,0	0,357 0,373	0,365	254 258	8,5	leicht — Ergänzungsmessungen
27,77	520	494	6,0 10,2	30 50	2,0 3,5	0,200 0,204	0,202	240 257	5,8	zl. schwer** — Ergänzungsmessungen

Die Messungen sind in den Tabb. 2 wiedergegeben. In der ersten Spalte findet man die Mikrometereinstellung des Fernrohres, in der zweiten und dritten die aus den Dispersionskurven ermittelten zugehörigen Wellenlängen. Die Werte für den veränderlichen Spalt sind die Mittel aus je fünf Einstellungen. Für jedes Wellenlängenpaar sind die zugehörigen Spaltbreiten I und II in Skalenteilen angegeben, ferner das Verhältnis I/II oder II/I, das nach dem Vierordtschen Prinzip das Helligkeitsverhältnis darstellt. Der mittlere Fehler ist in Prozenten dieses Verhältnisses angegeben. Der festgehaltene Spalt ist daran kenntlich, daß keine Dezimalen angegeben sind.

Die Sterne in der Rubrik „Bemerkungen" deuten auf besondere Einstellungsschwierigkeiten, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Um noch mehr Punkte der Helligkeitskurve zu finden und vor allem, um die Lage des Helligkeitsmaximums festzustellen, wurde aus den schon gefundenen Werten der Helligkeit dieselbe für eine neue Wellenlänge rechnerisch interpoliert. Diese Wellenlänge wurde dann wieder mit den benachbarten, aus den Dispersionskurven ablesbaren Wellenlängen photometriert. Diese Ergänzungsmessungen sind in Tab. 2 kenntlich gemacht. Die daraus sich ergebende Helligkeitsverteilung ist in Tab. 3 wiedergegeben. In ein orthogonales Koordinatensystem wurden als Abszissen die Wellenlängen, als Ordinaten die Logarithmen der zugehörigen Helligkeitswerte abgetragen. Aus den so erhaltenen Rechts- und Linkskurven wurde die Mittelwertkurve gebildet, die noch auf das Normalspektrum reduziert werden mußte. Dazu wurden die von O. Stiller ermittelten Dispersionskurven benutzt. Bezeichnet man die auf der Fernrohrskala abgelesene Einstellung des Beobachtungsfernrohres mit n (in den Dispersionskurven als Abszissen abgetragen), so ist die reduzierte Helligkeit H_r dem gefundenen Helligkeitswerte H direkt und dem Anstieg der Dispersionskurve $d\lambda/dn$ umgekehrt proportional. Da es sich um relative Helligkeiten handelt, kann der Proportionalitätsfaktor gleich 1 gesetzt werden.

$$H_r = H \cdot \frac{dn}{d\lambda} = H \,.\, R \,.$$

Tabelle 3.

Helligkeitsverteilung im Spektrum der Nernstlampe (200 Volt).

Rechtsstellung		Linksstellung	
λ	Logarithm. der Helligkeit	λ	Logarithm. der Helligkeit
662	3,277	672	3,121
608	4,000	612	4,000
568	4,000 [1])	569	4,000
535	3,708	534	3,678
508	3,239	506	3,096
485	2,595	482	2,384
467	2,095	462	1,802
451	1,609	447	1,227
437	1,098	435	0,569
588	4,039 [2])	590	4,055 [2])
700	2,199	710	2,058
635	3,722	640	3,696
551	3,892	551	3,870
521	3,530	520	3,432
496	2,880	494	2,738

Der Reduktionsfaktor $R = dn/d\lambda$ wurde folgendermaßen bestimmt. Es seien λ_1 und λ_2 ($\lambda_2 > \lambda_1$) zwei Wellenlängen mit den zugehörigen Fernrohreinstellungen n_1 und n_2; dann ist angenähert

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{n_2 - n_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

für die Wellenlänge $\lambda_1 + \lambda_2/2$, wenn $\lambda_2 - \lambda_1$ nicht zu groß gewählt wird. Auf diese Weise wurde der Reduktionsfaktor graphisch aus den Dispersionskurven ermittelt, indem $\lambda_2 - \lambda_1$ gleich 10 $\mu\mu$ gewählt wurde.

Aus der obigen Formel ergibt sich

$$\log H_r = \log H + \log R\,.$$

Nach dieser Formel wurde die reduzierte Helligkeitsverteilung bestimmt, wie sie in Tab. 4 wiedergegeben ist.

1) Die Helligkeit der beiden Farben ist nicht gleich 1, sondern gleich 10000 gesetzt, um negative Ordinaten zu vermeiden.

2) Interpoliert.

Tabelle 4.

Helligkeitsverteilung im Normalspektrum der Nernstlampe.

λ	$\log H_r$	λ	$\log H_r$
440	1,689	600	4,034
60	2,250	20	3,867
80	2,747	40	3,566
500	3,243	60	3,182
20	3,689	80	2,668
40	3,925	700	2,042
60	4,049		
80	4,083		

Die bei einem Spaltabstand von 6 mm gefundenen Werte fallen mit den bei 2 mm Spaltabstand gefundenen zusammen.

§ 5. Bestimmung der Empfindlichkeit des Auges.

Zunächst mußte die Verteilung der Intensität im Spektrum der Nernstlampe festgestellt werden. Zu diesem Zweck wurde die Strahlung der Mattscheibe mit der Strahlung des „schwarzen Körpers" mittels des Spektralphotometers von König-Martens[1]) verglichen.

Für das *sichtbare* Gebiet kann man die Intensitätsverteilung im Normalspektrum des schwarzen Körpers bei der Temperatur T aus der Wienschen Gleichung

$$S_\lambda = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \tag{1}$$

berechnen. Die Konstante c_1 hängt von der Versuchsanordnung ab. Da diese während der Messungen nicht verändert wurde und da es sich nur um Intensitäts*verhältnisse* handelte, so konnte

$$c_1 = 1$$

gesetzt werden; c_2 hat nach den Versuchen von Lummer-Pringsheim[2]) den Wert 14600. Hierbei muß λ in μ, T absolut gemessen werden.

1) F. F. Martens u. F. Grünbaum, Ann. d. Phys. 12. p. 984. 1903.

2) O. Lummer u. E. Pringsheim, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 1901. p. 42.

Die Einrichtung des Spektralphotometers von König-Martens wird als bekannt vorausgesetzt. Das eine Feld erhielt Licht vom schwarzen Körper (Intensität S_λ), das andere von der Mattscheibe (J_λ). Der Winkel, um den das Nicol gedreht werden mußte, um beide Felder gleich hell zu machen, sei mit α bezeichnet, dann besteht die Beziehung

$$J_\lambda = \frac{S_\lambda}{\mathrm{tg}^2\,\alpha}\,.\ ^{1)}$$

Die so ermittelte Intensitätsverteilung ist in Tab. 5 wiedergegeben. Die Logarithmen der Intensität wurden um 9,969 vergrößert, um für die Wellenlänge 600 die Intensität gleich der Helligkeit zu machen.

Tabelle 5.

J_λ = Intensität, H_λ = Helligkeit, E_λ = Empfindlichkeit.

λ	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	$\log J_\lambda$	$\log J_\lambda + 9{,}969$	$\log H_\lambda$	$\log E_\lambda$	E_λ	E_λ
440	0,026—7	2,995	1,689	0,694—2	4,9	3,1
60	0,238—7	3,207	2,250	0,043—1	10,1	6,9
80	0,392—7	3,361	2,747	0,386—1	24,3	15,1
500	0,520—7	3,489	3,243	0,754—1	56,8	35,3
20	0,660—7	3,629	3,689	0,060	114,8	71,5
40	0,780—7	3,749	3,925	0,176	150,0	93,3
60	0,874—7	3,843	4,049	0,206	160,7	100,0
80	0,960—7	3,929	4,083	0,154	142,6	88,7
600	0,065—6	4,034	4,034	0,000	100,0	62,2
20	0,131—6	4,100	3,867	0,763—1	57,9	36,3
40	0,198—6	4,167	3,566	0,399—1	25,1	15,6
60	0,254—6	4,223	3,182	0,959—2	9,1	5,7
80	0,361—6	4,330	2,668	0,338—2	2,2	1,4

Ein Maß für die relative Helligkeitsempfindlichkeit des Auges erhält man, wenn man für die verschiedenen Farben das Verhältnis der Helligkeit und der zugehörigen Intensität bildet. In Tab. 5 sind die gefundenen Werte der Empfindlichkeit in Kolumne 4 und 5 wiedergegeben. In Kolumne 6 ist die Stelle größter Empfindlichkeit gleich 100 gesetzt.

1) F. F. Martens u. F. Grünbaum, l. c.

Die bei einem Spaltabstande von 6 mm gefundenen Resultate stimmen recht gut mit den hier angegebenen Werten überein. In Fig. 2 ist die Empfindlichkeit (Kolumne 6) als Funktion der Wellenlänge eingezeichnet. Mit Erlaubnis des

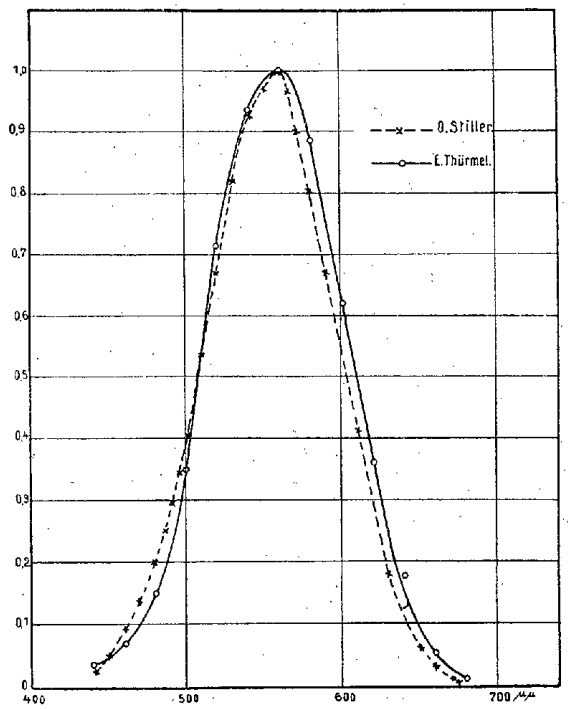

Fig. 2.

Hrn. O. Stiller bringe ich in den Figuren zum Vergleich die von ihm für sein Auge bestimmte Empfindlichkeitskurve.[1])

Die Figg. 1 und 2 zeigen nach dem in der Einleitung Gesagten, daß die Kurven der Fig. 2 die Helligkeitsempfindlichkeit der Zapfen darstellen, d. h. daß bei der hier angewandten Beobachtungsmethode hauptsächlich die Zapfen in Funktion treten, wie bei direkter Beobachtung kleiner Felder zu erwarten war. Wie schon in der Einleitung erwähnt ist, können wir infolgedessen bei unserer Versuchsanordnung sicher sein, daß das Purkinjephänomen unsere Resultate nicht fälschend

1) Die Stillerschen Messungen sind vor den meinigen ausgeführt worden, aber noch nicht veröffentlicht.

beeinflussen wird, wenn wir uns jetzt an die optische Bestimmung hoher Temperaturen machen.

§ 6. Das Spektral-Flickerphotometer als optisches Pyrometer.[1])

Bildet man aus der Wienschen Gleichung

$$S_\lambda = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \tag{1}$$

das Verhältnis der Intensitäten für zwei Wellenlängen bei derselben Temperatur, so ergibt sich

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 e^{\frac{c_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)} \tag{2}$$

und durch Logarithmieren

$$\log \frac{S_1}{S_2} = 5 \log \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \left[\frac{c_2 \log e}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\right]. \tag{3}$$

Gleichung (3) gestattet uns, T zu berechnen, wenn wir S_1/S_2 kennen. Nun setzt uns das Flickerphotometer in den Stand, das Verhältnis der Helligkeiten zweier Spektralbezirke zu bestimmen. Ist die Empfindlichkeitskurve des Beobachters bekannt, so ist damit auch das Verhältnis der Intensitäten gegeben.

Nach dieser in kurzem Umriß angegebenen Methode wurde die Temperatur des „schwarzen Körpers" bestimmt. Da gleichzeitig die Temperatur mit dem Thermoelement gemessen wurde, konnte das Resultat auf seine Richtigkeit geprüft werden.

Da der „schwarze Körper" nicht direkt photometriert werden konnte, so wurde wieder das alte Verfahren eingeschlagen. Bei diesen Messungen wurde eine neue Nernstlampe bei 200 Volt und die alte bei 180 Volt benutzt, so daß bei verschiedenen Helligkeiten gemessen wurde.

Zunächst wurde die Helligkeitsverteilung im Spektrum der Nernstlampe (200 Volt) mit dem Flickerphotometer gemessen. Mittels der bekannten Empfindlichkeitskurve ergab sich die Intensitätskurve für die Nernstlampe. Durch Photometrieren der Nernstlampe und des „schwarzen Körpers" mittels des Martens-Königschen Photometers wurde die In-

1) O. Lummer u. E. Pringsheim, l. c.

tensitätsverteilung in der Strahlung des schwarzen Körpers bestimmt und zwar bei zwei Temperaturen (Tabb. 6 und 7). Die berechneten Temperaturen ergaben sich (Tabb. 8 und 9) zu 1496° und 1723°, während mit dem Thermoelement 1477° und 1698° abs. gemessen wurden, d. h. die auf photometrischem Wege ermittelte Temperatur war um 1,3 bzw. 1,5 Proz. zu hoch.

Tabelle 6.

(Nernstlampe und schwarzer Körper mittels des Photometers von Martens-König verglichen. Temperatur des schwarzen Körpers 1477°, mit dem Thermoelement gemessen.)

λ	$\log J_\lambda$ [1]	$2 \log \operatorname{tg} \alpha$	$\log S_\lambda$
660	4,213	0,131	4,344
500	3,510	0,371—1	2,881
480	3,394	0,244—1	2,638

Tabelle 7.

Dasselbe bei 1698°.

λ	$\log J_\lambda$	$2 \log \operatorname{tg} \alpha$	$\log S_\lambda$
660	4,213	0,651	4,864
500	3,510	0,151	3,661
480	3,394	0,094	3,488

Tabelle 8.

Berechnung der absoluten Temperatur des schwarzen Körpers aus dem Intensitätsverhältnis zweier Farben (Tab. 6).

Vergleichs-wellenlängen	Temperatur		Abweichung	
	optisch gemessen	mit dem Thermoelem.	in ° C.	in Proz.
660/480	1502°	1477°	+25	1,7
660/500	1489		+12	0,8
Mittel	1496°	1477°	+19	1,3

1) J_λ ist die Intensität der Nernstlampe, S_λ die des schwarzen Körpers.

Tabelle 9.

Dasselbe nach Tab. 7.

Vergleichs-wellenlängen	Temperatur		Abweichung	
	optisch gemessen	mit dem Thermoelem.	in ° C.	in Proz.
660/480	1742°	1698°	+44°	2,6
660/500	1703		+ 5	0,3
Mittel	1723°	1698°	+25°	1,5

Dieselben Messungen wurden auch noch bei einem Abstand der Kollimatorspalte von 6 mm ausgeführt. Die berechnete Temperatur des schwarzen Körpers ergab sich zu 1466° und 1691°, also um 0,8 und 0,5 Proz. zu niedrig.

Nebenbei konnte die *schwarze* Temperatur der Nernstlampe (bzw. der Mattscheibenstrahlung) zu 2333° abs. bestimmt werden. Die wirkliche Temperatur muß höher liegen, da die Strahlung der Nernstlampe nicht „schwarz" ist. Es möge nochmals erwähnt werden, daß dieser Wert für 200 Volt gilt.

Zuletzt wurde noch eine Messung bei geringerer Helligkeit ausgeführt. Die erste Nernstlampe brannte bei 180 Volt. Um festzustellen, ob mit einer geringeren Anzahl von Einstellungen auch brauchbare Resultate erzielt werden können, wurden statt je fünf Einstellungen nur zwei gemacht. Die Messungen sind bei 6 mm Spaltabstand ausgeführt.

Die Temperatur ergab sich zu 1678° abs., während die mit dem Thermoelement gemessene Temperatur 1709° betrug. Die berechnete Temperatur war also um 31° bzw. 1,9 Proz. der gemessenen zu niedrig.

Für die schwarze Temperatur der Nernstlampe bei 180 Volt erhielt man 2123° absolut.

Die Abweichungen der optisch bestimmten Temperaturen von den thermoelektrisch gemessenen Werten betragen 0,5 bis 1,9 Proz. Sie dürften sich auf 1 Proz. reduzieren lassen, wenn größere Helligkeiten zur Verfügung stehen; denn im violetten Ende wurde die Genauigkeit der Einstellungen nicht nur durch Fluoreszenzerscheinungen im Auge, sondern auch durch die geringe Helligkeit beeinträchtigt. Gerade während der Messungen, bei denen der Fehler die Größe von 1,9 Proz. er-

reicht, brannte die Nernstlampe bei 180 Volt, gab also wenig Licht. Die Einstellungen im kurzwelligen Teile des Spektrums waren infolgedessen sehr ermüdend. Außerdem steht zu vermuten, daß bei größerer Helligkeit die störenden Fluoreszenzerscheinungen nicht mehr so in den Vordergrund treten werden.

Hätte der „schwarze Körper" direkt photometriert werden können, so hätte man bei viel größeren Helligkeiten messen können, weil dann die stark absorbierende Mattscheibe in Wegfall gekommen wäre. In der Praxis, bei der Messung von Hochofentemperaturen, kann die strahlende Öffnung groß genug gemacht werden, so daß genügende Helligkeit vorhanden ist. Eine Bedingung für die Brauchbarkeit dieses Pyrometers ist, daß die Empfindlichkeit des Beobachters konstant ist. Um über diesen Punkt Aufschluß zu erhalten, stellte der Verfasser Kontrollmessungen an, die sich über die Zeitdauer der übrigen Messungen verteilten. Es wurden an verschiedenen Tagen, und am selben Tage zu verschiedenen Zeiten, ein und dieselben Messungen ausgeführt; es zeigte sich, daß die Empfindlichkeit sich mit der Zeit nicht änderte. So ergab z. B. die Einstellung bei gleich breiten Spalten auf gleiche Helligkeit folgende Resultate:

am 1. 10. 09	568,0 $\mu\mu$	608,4 $\mu\mu$	Rechtsstellung
„ 2. 10. 09	567,0 $\mu\mu$	607,0 $\mu\mu$	
„ 3. 10. 09	569,7 $\mu\mu$	613,6 $\mu\mu$	Linksstellung
„ 4. 10. 09	570,0 $\mu\mu$	614,0 $\mu\mu$	

Dabei dürfen natürlich nicht die Resultate für Rechtsstellung mit denen für Linksstellung verglichen werden.

§ 7. Zusammenfassung der Resultate.

1. Es wurde die Helligkeitsempfindlichkeit des Auges für Spektralfarben unter Benutzung der genau bekannten Intensitätsverteilung des elektrisch geglühten „schwarzen Körpers" ermittelt. Die Anwendung des Flickerprinzipes auf Spektralfarben nach Lummer und Pringsheim gestattete gegenüber den bei früheren Untersuchungen angewandten Methoden eine große Genauigkeit bei den photometrischen Einstellungen. Dieser Teil der Arbeit ist im wesentlichen

eine Wiederholung der noch nicht veröffentlichten Untersuchungen von O. Stiller. Ferner wurde gezeigt, daß die erhaltene Kurve die Empfindlichkeitskurve der Zapfen darstellt, daß man bei der vorliegenden Versuchsanordnung also von der Helligkeit unabhängig ist, d. h., daß das Purkinje-Phänomen die Messungen nicht störend beeinflußt. Ebenso wurde nachgewiesen, daß die Helligkeitsempfindlichkeit des Auges (für die fovealen Teile) sich von einem Tage zum andern nicht merklich ändert. Daraus folgte — bei Anwendung kleiner Felder — die Brauchbarkeit des Lummer-Pringsheimschen Flickerphotometers als Pyrometer.

2. Es wurde bei zwei verschiedenen Helligkeitsstufen die Temperatur des „schwarzen Körpers" auf optischem Wege und gleichzeitig mit dem Thermoelement bestimmt. Die aus den photometrischen Einstellungen berechneten Temperaturen wichen von den thermoelektrisch gemessenen um 0,5—1,9 Proz. ab. In der Praxis — bei der Bestimmung von Hochofentemperaturen — dürfte sich der Fehler auf 1 Proz. reduzieren lassen.

Ich möchte nicht verfehlen, auch an dieser Stelle den Herren Professoren O. Lummer und E. Pringsheim meinen aufrichtigen Dank zu sagen für das rege Interesse, mit dem sie meine Arbeit förderten.

Breslau, Physik. Inst. d. Univ., im August 1910.

(Eingegangen 2. September 1910.)