Über eine lichtelektrische Methode zur Prüfung des Wien-Planckschen Strahlungsgesetzes im Bereich ultravioletter Strahlung ¹⁾.

Von **Eduard Steinke** in Königsberg i. Pr.

Mit sieben Abbildungen. (Eingegangen am 29. Sept. 1922.)

§ 1. Einleitung und Ziele der Arbeit. Die von Planck für die Energieverteilung im Normalspektrum eines schwarzen Körpers aufgestellte Formel ²⁾)

$$E_\lambda = \frac{C}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

(E_λ Strahlungsintensität einer bestimmten Wellenlänge λ , T absolute Temperatur des schwarzen Körpers, C und c_2 universelle Konstanten) hat seit ihrer Aufstellung den Gegenstand zahlreicher und eingehender Untersuchungen gebildet, die im wesentlichen eine Bestätigung dieses Gesetzes für $\lambda T = 50$ bis $\lambda T = 100\,000$ und $\lambda = 0,486\mu$ bis $\lambda = 52\mu$ erbracht haben ³⁾). Kürzere Wellen konnten bei allen diesen Versuchen nicht verwandt werden, da dann wegen der zu geringen Strahlungsintensität das Bolometer und die Thermosäule versagten. Als einzige Arbeit auf ultraviolettem Gebiet liegt nur aus neuerer Zeit die Arbeit von Baisch ⁴⁾) vor, der die Versuche bis $\lambda = 0,334\mu$ ausdehnte und dabei die Intensität aus der Schwärzung einer photographischen Platte bestimmte. Da Baisch aber wegen der experimentellen Schwierigkeiten nicht genügend viele Punkte aufnehmen konnte, um den von dem Gesetz für kleine λT verlangten linearen Verlauf der Isochromaten festzustellen, verglich er nur die aus seinen Versuchen sich ergebende Konstante c_2 mit den bisher gefundenen Werten und fand annähernde Übereinstimmung.

Auf Veranlassung von Herrn Professor Dr. W. Kaufmann habe ich nun eine Methode ausgearbeitet, mit deren Hilfe man noch kürzere Wellen zur Prüfung des Strahlungsgesetzes heranziehen kann. Diese Methode beruht auf der Verwendung Elster- und Geitelscher Alkaliphotozellen als Photometer für kurzwellige Strahlung. Mangels

¹⁾ Gekürzte Königsberger Dissertation.

²⁾ M. Planck, Ann. d. Phys. **4**, 553, 1901.

³⁾ Eingehende Literaturangaben hierüber siehe: W. Coblentz, Scientific Pap. of the Bur. of Stand. Nr. 406, 1920; Nernst und Wulf, Verh. d. D. Phys. Ges. **21**, 294, 1919. Vgl. hierzu: Rubens und Michel, Sitzungsber. d. Preuß. Akad. d. Wiss. 1921, S. 590; G. Michel, ZS. f. Phys. **9**, 285, 1922.

⁴⁾ E. Baisch, Ann. d. Phys. **35**, 543, 1911.

geeigneter Filter — spektrale Zerlegung des Lichts konnte bisher wegen zu geringer Intensität nicht angewandt werden, ist aber für die späteren Versuche in Aussicht genommen — und wegen der Absorption durch das Uviolglas der Zelle bin ich bisher nur bis zu $\lambda = 0,316 \mu$ gekommen. Ein weiteres Vordringen wird möglich sein, sobald Quarzzellen verfügbar sind. Die Vorbereitungen dazu sind in Angriff genommen.

Ermüdungserscheinungen der Zelle und Abweichungen von der Proportionalität zwischen Lichtstrom und lichtelektrischem Strom erforderten umfangreiche Voruntersuchungen.

I. Teil. Untersuchung der Photozelle.

§ 2. Beschreibung der Schaltung und der Apparate. Zur Untersuchung der Zelle und Messung der Photoströme wurde als empfindlichste Methode die Messung der Aufladezeiten angewandt.

Die Schaltung war dabei die folgende (Fig. 1).

Fig. 1.

Von der 80-Voltbatterie B_1 ging die Spannung über den Umschalter U_1 an die beiden Schneiden S_1 und S_2 des Elektrometers. Im Nebenschluß hierzu lag ein in der Mittegeerdeter Widerstand W_1 von 80000Ω . Der Elektrometerfaden F war mit dem Platinring A der Zelle Z verbunden, während die Erdungsringe R der Zelle an Erde und die Kaliumbelegung K über den als Sicherung gegen Kurzschluß dienenden Silitwiderstand W_2 von 10000Ω an den negativen Pol der Hochspannungsbatterie B_2 angeschlossen waren. Der andere Pol der Batterie lag an Erde. Die Spannung konnte mit Hilfe eines

Zellenschalters von 2 zu 2 Volt verändert werden und wurde mittels eines Präzisionsspannungsmessers von Siemens & Halske auf ihre Konstanz geprüft. Bei M befand sich ein elektromagnetischer Schlüssel, durch den der Elektrometerfaden sich entweder an Erde legen oder durch die Batterie B_3 von 2 Volt, den Umschalter U_2 und den Abzweigwiderstand W_3 von 1000Ω zwecks Kontrolle der Empfindlichkeit auf

bekannte Spannung aufladen ließ. Elektrometer, Erdschlüssel und Zelle befanden sich in geerdeten lichtdichten Metallgehäusen; sämtliche Kontakte waren entweder gelötet oder bestanden aus Platin oder Quecksilber. Als Isolierungsmaterial wurde Bernstein benutzt. Die Kapazität des ganzen Systems wurde mit Hilfe eines von Herrn Professor Dr. G. Hoffmann mir freundlichst zur Verfügung gestellten Zylinderkondensators von 0,334 cm Kapazität zu 11,7 cm festgestellt.

Das Elektrometer war ein nach dem System der Lutz-Edelmanschen Saiteninstrumente selbstgebautes Instrument mit einem Wollastondraht von 3μ Dicke, mit dem sich Empfindlichkeiten bis zu 100 Skalenteilen/Volt erzielen ließen. Es erwies sich für diese Messungen als praktisch, das Instrument mit geringer Empfindlichkeit zu benutzen, um Nullpunktsschwankungen zu verhüten. Die Ablesung

Fig. 2.

geschah objektiv durch Projektion des Fadens und Okularmikrometers auf eine Mattglasscheibe.

Die Photozelle war eine von der Firma Günther und Tegetmeyer in Braunschweig gelieferte Kaliumzelle Nr. 4737 aus Uviolglas mit Argonfüllung von mir unbekanntem Gasdruck. Das Entladungspotential lag etwa bei 212 Volt. Sie war nach den neuesten Erfahrungen hergestellt, innen bis auf eine kleine Öffnung zum Lichteintritt völlig verspiegelt und mit mehreren Schutzringen versehen. Die Trocknung erfolgte mit Schwefelsäure. Die Durchführungen durch den lichtdichten Kasten B (Fig. 2), in dem sich die Zelle befand und der direkt mitsamt dem elektromagnetischen Erdschlüssel auf das Elektrometer gesetzt werden konnte, bestanden aus Bernstein und waren noch lichtdicht verkleidet.

Zur Belichtung der Zelle diente ein seitlicher Fortsatz an dem Kasten, der mit einer Flußspatscheibe A abgedichtet war und

durch einen mittels Zugvorrichtung vom Beobachtungsplatz aus zu betätigenden Schieber S lichtdicht abgeschlossen werden konnte. An diesen schloß sich dann eine Vorrichtung F zum Einsetzen von Filtern und hieran endlich eine Klappvorrichtung K , die es mit Hilfe eines um die Achse a drehbaren Spiegels Sp möglich machte, daß die Zelle schnell nacheinander von einer Milch- oder Mattglasscheibe M oder von einer Lampe L beleuchtet werden konnte, die sich in einem mit K direkt verbundenen Metallgehäuse befand. Der Spiegel wurde durch eine Schnappvorrichtung so festgehalten, daß er immer nur eine der beiden Lagen einnehmen konnte und dann gleichzeitig das Licht der anderen Lichtquelle vollständig abblendete. Die Lichtwege von L bzw. M bis zur Zelle verliefen völlig lichtdicht abgeschlossen.

Die Milchglasscheibe oder die später verwendete Mattglasscheibe M , die zur vollständigen Zerstreuung des darauf fallenden Lichtes auf beiden Seiten mattgeschliffen war, wurde mittels einer kleinen 4-Volt-3-Kerzenlampe k beleuchtet, die meist mit erheblicher Unterspannung gebrannt wurde. Die Spannung wurde durch ein Präzisionsvoltmeter gemessen und mit Regulierwiderständen immer auf ganze Skalenteile eingestellt. Gespeist wurde die Lampe von einer großen Akkumulatornbatterie von 6 Volt. Ein Nachregulieren war, nachdem die Lampe sich einmal eingebraunt hatte, kaum erforderlich.

Die kleine Lampe k befand sich auf einer Photometerbank von 250 cm nutzbarer Länge. Indem sie bei konstanter Helligkeit in verschiedene Abstände von der die Zelle erleuchtenden Milch- oder Mattglasscheibe gebracht wurde, konnte die Lichtstärke des leuchtenden Objekts — der Milch- oder Mattglasscheibe — in beträchtlichem Maße (etwa 1:200) und auf genau meßbare Art variiert werden, ohne daß die optischen Verhältnisse von dem leuchtenden Objekt bis zur Zelle sich irgendwie änderten. Die Photometerbank war durch Tücher und Schirme möglichst verkleidet; ferner wurde das Zimmer, in dem sich der Aufbau befand, völlig verdunkelt. Vorversuche ergaben, daß die Abblendung der Photometerbank genügend und das im Zimmer etwa noch vorhandene Licht auf die Zelle nicht mehr wirksam war.

Zum Ablesen der Stoppuhr, der Meßinstrumente und der Entfernung auf der Photometerbank konnten kleine rote Lämpchen eingeschaltet werden.

§ 3. Die Untersuchung der Photozelle und ihre Ergebnisse. Die Photozellen lassen sich nur dann zum Photometrieren verwenden, wenn zwischen dem Lichtstrom und dem lichtelektrischen Strom ein bekannter Zusammenhang besteht. Die meisten Arbeiten

auf diesem Gebiet¹⁾ schienen zu bestätigen, daß ein solcher vorhanden ist, und zwar höchst einfacher Art, daß nämlich zwischen Lichtstrom und Photostrom Proportionalität herrscht. Vorversuche bei meiner Zelle ergaben jedoch Abweichungen hiervon, und es mußte infolgedessen erst nach dem Zusammenhang zwischen Licht- und Photostrom für diese Zelle gesucht werden.

Es war von vornherein klar, daß zur Messung der ganz geringen Intensitäten, wie sie für die Prüfung des Planckschen Gesetzes im Ultravioletten notwendig war, die Empfindlichkeit der Zelle auf das Äußerste gesteigert werden mußte. Dies ließ sich aber nur, wie schon Kreusler²⁾ gezeigt hat, durch möglichste Steigerung der beschleunigenden Spannung und dadurch erzielte Stoßionisation erreichen. Ich studierte deshalb zunächst das Verhalten meiner Zelle in der Nähe des Entladungspotentials.

Es zeigte sich nun, daß es nicht möglich war, eine solch hohe Spannung auf einmal an die Zelle anzulegen, weil dann sofort leuchtende Entladung auftrat, sondern die Spannung konnte nur im Laufe von Stunden und Tagen allmählich gesteigert werden. Der Dunkeleffekt, der bei dem ersten Anlegen der höheren Spannung mitunter so groß wurde, daß der Faden sich ruckweise über die ganze Skale bewegte, ließ allmählich nach und wurde praktisch gleich Null, um bei einem neuen Erhöhen der Spannung wieder aufzutreten und allmählich zu verschwinden. Nach mehrtägigem Steigern wurde schließlich die Spannung 210 Volt erreicht, bei der der Dunkeleffekt auch nach tagelangem Stehenlassen mit angelegter Spannung nicht mehr verschwand. Als dann die Spannung auf 212 Volt erhöht wurde, trat leuchtende Entladung ein, und das Entladungspotential sank auf 162 Volt, d. h. es war nicht möglich, an die Zelle mehr als 160 Volt anzulegen, ohne Entladung zu erhalten. Es sei ausdrücklich hervorgehoben, daß Belichtungen dabei nicht erfolgten. Erst nachdem die Spannung abgenommen war, erholte sich die Zelle in einigen Tagen so weit, daß die beschleunigende Spannung wieder bis auf 200 Volt gesteigert werden konnte. Die Gründe für dies Verhalten dürften vielleicht auf Ladungen im Innern oder Bildung von Doppelschichten zurückzuführen sein, können aber genauer erst nach Untersuchung verschieden gebauter Zellen angegeben werden.

¹⁾ Eine Zusammenstellung der wichtigsten lichtelektrischen Arbeiten siehe Hallwachs, Handbuch der Radiologie, Band 3. Vgl. besonders Elster u. Geitel, Phys. ZS. 14, 741, 1913.

²⁾ Kreusler, Verh. Berl. Phys. Ges. 17, 86 bis 91, 1898.

Weitere Versuche zeigten, daß neben dieser „Gewöhnung“ der Zelle noch andere, erheblich schneller verlaufende Änderungen in der Zelle auftraten. Einer der Versuche sei hier eingehend beschrieben.

Die Schaltung war die vorher angegebene (Fig. 1). An der Zelle lag seit mehreren Tagen eine Zellspannung von 200 Volt. Zur Belichtung diente eine in der erwähnten Weise (§ 2) lichtdicht mit der Zelle verbundene Lampe *L* von 110 Volt 16 Kerzen, von der ein kleines Stück ausgeblendet und die mit 55,0 Volt und 0,220 Ampere gebrannt wurde. Spannung und Stromstärke wurden durch Drehspuleninstrumente kontrolliert und durch Widerstände feinstufig reguliert. Gespeist wurde die Lampe von einer großen Institutsbatterie von 120 Volt, die nur zu diesem Zwecke gebraucht wurde. Ein Nachregulieren war, nachdem die Lampe sich eingebrannt hatte, auch hier kaum erforderlich. Endlich wurde durch ein Gelatinefilter ($\lambda = 462 \mu\mu$) ein kleiner Teil des Spektrums ausgeblendet. Zur Zeit $t = 0$ wurde der Schieber *S* geöffnet und die Zelle der Belichtung ausgesetzt. Mit der Stoppuhr wurde die Zeit gemessen, die der Elektrometerfaden zum Wandern von Teilstrich 85 bis 65 der Skale gebrauchte. (Die Ruhelage war bei 86,2; die Empfindlichkeit des Elektrometers wurde ständig kontrolliert und selbst während langer Versuchsreihen konstant gefunden, da mit einer ganz geringen Empfindlichkeit gearbeitet wurde.) Die Belichtung der Zelle dauerte konstant fort. In gewissen Zeitabständen wurde der Faden geerdet und die Aufladezeit von neuem gemessen. Die Ergebnisse der Versuchsreihe sind in Tabelle 1 enthalten. Man sieht deutlich eine starke

Tabelle 1. Ermüdung als Funktion der Belichtungszeit.
(200 Volt Zellspannung, Kohlenfadenlampe 110 Volt 16 Kerzen, an 55,0 Volt, Violettfilter $462 \mu\mu$, Aufladung Teilstrich 85 — 65.)

Dauer der Belichtung	Aufladezeit sec	Dauer der Belichtung	Aufladezeit sec
0' 6"	5,4	15' 10"	8,4
1 30	7,6	20 10	8,4
2 10	7,7	30 10	8,4
3 10	7,8	45 10	8,4
5 10	8,0	60 10	8,4
8 10	8,1	68 10	8,4
12 10	8,3	75 10	8,4

Ermüdung, die schnell ansteigt und allmählich einen Grenzwert erreicht. Das ist nach etwa 15 Minuten der Fall; von da ab bleibt die Aufladezeit konstant.

Wie verhielt es sich nun mit der Proportionalität zwischen Licht- und Photostrom, die ja die Grundlage der Benutzung der Zelle als

Photometrierungsmittel bildet? Ließ sich diese erreichen, wenn man die Zelle erst einmal so lange vorermüdete, daß der Photostrom immer den konstanten Grenzwert annahm?

Zur Beantwortung dieser Frage wurde die Abhängigkeit des Grenzwertes von der Lichtstärke bei konstanter Zellspannung untersucht. Die Zellspannung betrug wiederum 200 Volt. Als Lichtquelle diente die 2 mm dicke Milchglasscheibe M , die durch die kleine Lampe k belichtet wurde und deren Helligkeit durch Variieren der Entfernung zwischen Lampe und Milchglasscheibe in weiten Grenzen variiert werden konnte. Vorversuche ergaben, daß nach der Vorermüdung der Zelle von 15 Minuten mit schwächster Belichtung eine weitere Ermüdung von etwa 5 Minuten genügte, um bei der angewandten nächst höheren Lichtstärke den Photostrom den Grenzwert für diese Lichtstärke erreichen zu lassen. Es wurden die Lichtstärken nur in diesem einen Sinne der allmählichen Vergrößerung verändert, weil bei den Vorversuchen sich weiter gezeigt hatte, daß nach einer starken Belichtung der Zelle eine gewisse Art Nachwirkung auftrat, wie sie auch Elster und Geitel beobachtet haben¹⁾ und durch die bei der kleineren Lichtstärke eine größere Intensität vorgetäuscht wurde als wirklich vorhanden war.

Das Ergebnis einer solchen Versuchsreihe ist in Tabelle 2 ausführlich enthalten.

Spalte 1 enthält die Entfernungen r der kleinen Lampe von der Milchglasscheibe, Spalte 2 die daraus berechneten Intensitätsverhältnisse $L \left(\frac{1}{r^2} \right)$, willkürlich multipliziert mit 10^5 , Spalte 3 den $\log$ davon, Spalte 4 die Aufladezeiten für eine Wanderung des Elektrometerfadens vom Teilstrich 85 bis 80 der Skale (es wurden mindestens 3 Messungen gemacht und daraus Mittelwerte genommen), Spalte 5 enthält die daraus berechnete elektrische Intensität J (Skalenteile dividiert durch Sekunden, willkürlich multipliziert mit 1000) nach erfolgtem Abzug des Dunkeffekts, der vorher bestimmt worden war, und Spalte 6 endlich den $\log$ davon. Fig. 3 enthält einmal L als Funktion von J , was keine Gerade ergibt, und dann $\log L$ als Funktion von $\log J$. Der lineare Zusammenhang, der aus der Figur deutlich sichtbar wird, bedeutet, daß $J^z = \text{const. } L$, wobei $z = \tan \alpha$ und α der Neigungswinkel der Geraden gegen die $(\log J)$ -Achse ist. Dann ergibt sich, daß $z > 1$ ist, nämlich $z = 1,209$.

¹⁾ Elster und Geitel, Phys. ZS. **21**, 361, 1920.

Tabelle 2. Zusammenhang zwischen Grenzwert des lichtelektrischen Stromes und der Lichtstärke.

(200 Volt Zellspannung, Lampe 4 Volt 3 Kerzen mit 2,30 Volt gebrannt, kein Filter, Milchglas, Aufladung 85 — 80, Dunkeleffekt 5 Skalenteile in 15,0 Minuten gleich 5,56.)

Entfernung der Lampe vom Milchglas r cm	Lichtstärke L $\left(\frac{1}{r^2} \cdot 10^5\right)$	$\log L$	Aufladezeit und Mittel für Teil- strich 85 — 80 in Sekunden	Elektr. Intens. $J^{1)}$ $\left(\frac{\text{Skaltl.}}{\text{sec}} \cdot 1000\right)$ abzüglich Dunkeleffekt	$\log J$	
1	2	3	4	5	6	
200	2,50	0,397 94	261,0 260,0 260,8	260,6	13,68	1,136 09
90	12,35	1,091 67	90,0 89,8 91,0	90,3	49,70	1,696 36
80	15,65	1,194 51	74,4 74,4 75,0	74,6	61,50	1,788 88
70	20,40	1,309 63	59,8 60,0 60,0	59,9	78,00	1,892 09
60	27,8	1,444 04	47,2 46,6 47,2	47,0	100,9	2,003 89
50	40,0	1,602 06	34,8 34,4 34,6 35,0	34,7	138,6	2,141 76
45	49,4	1,693 73	29,4 29,8 29,6	29,6	163,4	2,213 25
40	62,6	1,796 57	24,0 24,2 24,0	24,1	201,9	2,305 14
35	81,7	1,912 22	20,0 19,8 19,8	19,9	245,4	2,389 87
30	111,2	2,046 10	15,0 15,0 15,2	15,1	325,6	2,512 68
22,5	197,5	2,295 57	10,0 9,8 9,8	9,9	499,4	2,698 45
20,0	250	2,397 94	7,8 7,8 7,8	7,8	636,4	2,803 73
15,0	445	2,648 36	5,0 5,0 5,0	5,0	994,4	2,997 56

1.209
||
82

$\approx 1,208$

¹⁾ $J = 1$ entspricht $1,30 \cdot 10^{-15}$ Ampere.

Es lag nun die Frage nahe, ob diese Beziehung auch bei Variation der Zellspannung und der Farben der Form nach erhalten bleiben und welche Zahlenwerte dabei der Exponent ε annehmen würde.

Diesem Zweck diente eine Reihe von Beobachtungen, die hier nicht ausführlich angegeben sind. Als Filter wurden Kodak-Gelatinefilter benutzt, deren optische Optima zu $\lambda = 630, 535$ und $462 \mu\mu$ festgestellt worden waren. Zur Beleuchtung der jetzt als Lichtquelle verwandten Mattglasscheibe diente die 4-Voltlampe, die mit Ausnahme der ersten bei allen Messungen mit 2,30 Volt gebrannt wurde. Infolgedessen konnte aus diesen Messungen auch die tatsächliche Empfindlichkeitssteigerung der Zelle mit wachsender Zellspannung errechnet werden, indem aus den gefundenen Werten die elektrischen Intensitätswerte J für eine Entfernung von 100 cm zwischen Lampe und Mattglas inter- bzw. extrapoliert wurden. Diese Werte sind mit $\varepsilon_{\lambda, v}$ potenziert und dann auf die Werte bei 20 Volt umgerechnet, indem diese gleich 1 gesetzt wurden. Tabelle 3 enthält diese Empfindlichkeitssteigerung für verschiedene Wellenlängen als Funktion der Zellspannung, bezogen auf eine Anfangsintensität 1 bei 20 Volt Zellspannung. Man erkennt daraus deutlich das enorme Ansteigen der Empfindlichkeit mit Einsetzen der Stoßionisation.

Fig. 3.

Tabelle 3. Empfindlichkeitssteigerung für verschiedene Wellenlängen als Funktion der Zellspannung, bezogen auf Anfangsintensität 1 bei 20 Volt.

Volt Zellspannung	$\lambda = 630 \mu\mu$	$\lambda = 535 \mu\mu$	$\lambda = 462 \mu\mu$
20	1,0	1,0	1,0
60	2,9	4,2	4,6
100	8,1	10,7	13,2
140	21,9	28,9	38,7
180	32,0	116	175
200	339	376	730
210	1045	1240	1595

Die bei den Messungen benutzten Spannungen von 2, 20, 60, 100, 140 und 180 Volt wurden mindestens 10 Stunden vorher, 200 Volt 24 Stunden und 210 Volt 48 Stunden vorher angelegt. Der Dunkel-effekt bei der letzten Messung war trotzdem noch sehr groß, ja bei manchen Meßpunkten traten noch Stöße auf, so daß diese Messungen wiederholt werden mußten. Eine graphische Darstellung — hier nicht beigegeben — zeigt wieder wie in Fig. 3 und der späteren Fig. 6 (s. w. u.) den linearen Zusammenhang zwischen $\log L$ und $\log J$.

Die aus den Messungen sich ergebenden Werte des Exponenten z , den ich fürderhin mit „Zellkonstante“ bezeichnen will, sind in

Fig. 4.

Fig. 5.

Tabelle 4 und Fig. 4 und 5 in ihrer Abhängigkeit von der Zellspannung und der Wellenlänge dargestellt. Man sieht, daß die Zellkonstante für verschiedene Farben verschieden ist und sich mit abnehmender Zellspannung dem Werte 1 nähert. Die Abhängigkeit zwischen z und λ ist bei gleichem Zellpotential derart, daß z für

Tabelle 4.

Abhängigkeit der Zellkonstanten von Farbe und Spannung.

Wellenlänge $\mu\mu$	Zellspannung in Volt							
	2	20	60	100	140	180	200	210
630	1,0115	1,0420	1,0936	1,1262	1,1586	1,1823	1,1946	1,2036
535	1,0083	1,0357	1,0767	1,1027	1,1191	1,1313	1,1431	1,1504
462	1,0120	1,0464	1,1104	1,1606	1,1948	1,2236	1,2408	1,2593

Grün den kleinsten, für Rot einen größeren und den größten Wert für Violett annimmt. Im Ultraviolett wächst z dann noch mehr, wie sich aus späteren Messungen ergibt (s. w. u. Tabelle 7 bis 20). Die Punkte für das Ultraviolett sind aus diesen Tabellen entnommen und auch bereits hier in Fig. 5 eingezeichnet.

§ 4. Zusammenfassung der Untersuchung über die Photozelle und Vergleich mit Resultaten anderer Autoren. Als bisheriges Ergebnis meiner Untersuchung der Photozelle kann ich zusammenfassend sagen:

Arbeitet man mit Alkalizellen zur Erreichung höchster Empfindlichkeit mit hohen Spannungen, die bis in die Nähe des Entladungspotentials kommen, so sind folgende Umstände zu beachten:

1. Eine ganz langsam im Laufe von Tagen erfolgende Änderung der Zellempfindlichkeit und des Entladungspotentials.

2. Eine schnell verlaufende Ermüdung dergestalt, daß bei gleichbleibender Belichtung der lichtelektrische Strom einem unteren Grenzwert zustrebt.

3. Dieser Grenzwert J ist der Belichtung L nicht proportional, sondern mit ihr durch die Beziehung verknüpft: $J^2 = \text{const. } L$.

4. Der Exponent z , die sogenannte Zellkonstante, ist abhängig von der Wellenlänge und der Spannung und nähert sich mit abnehmender Zellspannung dem Werte 1.

Diese Ergebnisse bestätigen und ergänzen diejenigen von Rosenberg¹⁾, der bei seinen Zellen infolge Ermüdungserscheinungen auch Abweichungen von der Proportionalität feststellt. Wenn andere Autoren Proportionalität zwischen Lichtstrom und lichtelektrischem Strom — also $z = 1$ — gefunden haben²⁾, so dürfte das in den meisten Fällen daran liegen, daß sie in genügend weiter Entfernung vom Entladungspotential arbeiteten, wodurch z relativ klein wird, und daß sie sich auf relativ kleine Intensitätsbereiche beschränkten. Wenn z. B. auch Elster und Geitel³⁾ in der schon mehrmals angezogenen Arbeit vom Jahre 1913 angeben, die Proportionalität in einem Intervall von etwa $\frac{1}{3}$ des Sonnenlichts bis zu $6 \cdot 10^{-4}$ Meterkerzen gefunden zu haben, so haben sie doch in einer einzelnen Meßreihe ein Intensitätsintervall von 1:4 im allgemeinen nicht überschritten. Endlich ist noch von Bedeutung, wie die Zelle bei den Messungen behandelt wurde, ob sie ständig im Dunkeln gehalten oder vorermüdet und mit welcher Lichtstärke sie

¹⁾ Rosenberg, ZS. f. Phys. 7, 18, 1921.

²⁾ Hallwachs, Handbuch der Radiologie, Band 3.

³⁾ Elster und Geitel, Phys. ZS. 14, 741, 1913.

vorermüdet wurde, Angaben, die meistens in der Literatur nicht zu finden sind. Es sei hierzu besonders auf die obengenannte Arbeit von Rosenberg¹⁾ verwiesen, der speziell diese Fragen eingehenden Untersuchungen unterwirft.

Wieweit nun der von mir gefundene Zusammenhang zwischen Lichtstrom und lichtelektrischem Strom auch bei anderen Zellen besteht, können erst spätere Untersuchungen zeigen.

II. Teil: Prüfung der Wien-Planckschen Strahlungsformel mit Hilfe der lichtelektrischen Zelle.

§ 5. Allgemeine Methode. Nachdem durch die vorliegenden Untersuchungen die Eigenschaften der Zelle genügend bekannt waren, um sie zu photometrischen Zwecken zu verwenden, konnte an eine Prüfung des Planckschen Strahlungsgesetzes herangegangen werden. Das Plancksche Gesetz:

$$E_{\lambda} = \frac{C}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

geht für genügend kleine Werte von λT (praktisch von etwa $\lambda T = 3000 \mu \cdot \text{Grad}$) in das Wiensche Gesetz über:

$$E_{\lambda} = \frac{C}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}}$$

Durch Logarithmieren erhält man:

$$\log E_{\lambda} = \log (C \cdot \lambda^{-5}) - \frac{c_2}{\lambda T} \cdot \log e,$$

$\log E_{\lambda}$ ist also eine lineare Funktion von $1/T$. Variiert man also T bei konstant gehaltenem λ (Isochromatenmethode) und trägt $\log E_{\lambda}$ als Ordinate, $1/T$ als Abszisse auf, so müssen die so erhaltenen Kurven gerade Linien sein. Auf die Prüfung dieser Geradlinigkeit und die Bestimmung von c_2 wollte ich mich zunächst beschränken, da zur Bestimmung der andern Konstante C Messungen verschiedener Wellenlängen miteinander in Beziehung gebracht werden müssen, wozu ich noch weiterhin erst die Änderung der Zellempfindlichkeit mit der Wellenlänge mittels energetischer Messungen hätte bestimmen müssen. Auch diese Prüfung ist für später in Aussicht genommen.

§ 6. Beschreibung der Apparate. a) Filter. Die elektrische Anordnung blieb dieselbe wie bisher. Mit Hilfe der Spiegelklappvorrichtung K war es ja möglich, die Zelle nach Belieben zur

¹⁾ Rosenberg, ZS. f. Phys. 7, 18, 1921.

Bestimmung der Zellkonstanten durch die kleine Lampe k auf der Photometerbank oder zur Aufnahme der Isochromaten durch den Strahler L belichten zu lassen.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, konnte spektrale Zerlegung des Lichts wegen zu geringer Intensität hierbei noch nicht angewandt werden. Zur Zerlegung des Lichts dienten deshalb Filter, und zwar für sichtbares Licht die bereits erwähnten Gelatinefilter, deren optische Optima bei 630, 535 und 462μ lagen. Zur Erzielung möglichst monochromatischen ultravioletten Lichts wurde ein Zeissches Uviolfilter (Nitrosodimethylanilin und Kupfersulfat) benutzt. Durch das Glas der als Strahler benutzten Glühlampe wurde ein Teil des Ultravioletts abgeschnitten — etwa von 335μ ab (die Quecksilberlinie 334μ wurde nicht mehr durchgelassen) — und andererseits begann die Durchlässigkeit des Nitrosodimethylanilins erst etwas über 340μ , so daß das Optimum etwa bei 340μ liegen dürfte. Wenn Kalähne¹⁾ den durch eine solche Filteranordnung erzielten Spektralbereich auf 340 bis 330μ angibt, so dürfte der Unterschied auf die Verschiedenheit des Glases und des verwandten Nitrosodimethylanilins zurückzuführen sein. Endlich wurden für noch kürzere Wellen (für die dann auch eine Lampe aus Uviolglas verwandt wurde, s. w. u.) zwei nach dem Böttgerschen Verfahren auf beiden Seiten sorgfältig versilberte dünne Uviolglasplatten als Filter benutzt. Da nach den Untersuchungen von Hagen und Rubens²⁾ und Minor³⁾ das Silber bei 316μ ein ganz scharf ausgesprochenes Reflexionsminimum bzw. Durchlässigkeitsmaximum zeigt, das Uviolglas aber Wellen bis etwa 280μ durchläßt, mußte ein solches Filter bei dieser Wellenlänge ein Optimum der durchgelassenen Wellen zeigen, besonders, wenn noch die Wellen größerer Länge durch andere Filter ausgeblendet wurden. Dies geschah durch Vorsetzen des vorerwähnten Uviolfilters. Vorversuche ergaben, daß eine vierfache Silberschicht (zwei auf beiden Seiten versilberte Platten) das gewünschte Resultat zeigte.

Damit standen insgesamt fünf Filter zur Verfügung, deren optische Optima bei 630, 535, 462, 340 und 316μ lagen.

b) Strahler. Es war von vornherein zu übersehen, daß bei den äußerst geringen Intensitäten im Ultraviolett nur dann Aussicht auf Erfolg bestand, wenn der Strahler es gestattete, möglichst hohe Temperaturen zu erreichen. Im allgemeinen sind die gewöhnlichen „schwarzen Körper“ schon wegen der in ihnen enthaltenen Thermo-

¹⁾ Kalähne, Phys. ZS. **5**, 415, 1904.

²⁾ Hagen und Rubens, Verh. d. D. Phys. Ges. **3**, 165, 1901.

³⁾ Minor, Ann. d. Phys. **10**, 581, 1903.

elemente nur zur Messung der Temperaturen bis etwa 1700° abs. geeignet. Nun hat Lummer¹⁾ nachgewiesen, daß die Kohle der Glühlampen dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz der Gesamtstrahlung folgt und sich nur ihre absolute Strahlungskonstante von der des schwarzen Körpers unterscheidet. Nach seinen Untersuchungen, die sich auf das sichtbare und kurzwellige ultrarote Gebiet bis 5μ und über ein Temperaturintervall von 1300 bis 2500° absolut ausdehnen, strahlt die Glühlampenkohle innerhalb dieser Grenzen wie ein „grauer“ Körper, d. h. ihr Absorptionsvermögen A ist unabhängig von der Wellenlänge, ihr Emissionsvermögen zeigt den gleichen Verlauf wie das des schwarzen Körpers bei gleicher Temperatur und ihr Gesamtstrahlungsgesetz ist, abgesehen vom Zahlenwert der Konstanten, das gleiche wie beim schwarzen Körper. Die Arbeiten von Lummer werden bestätigt und weiter fortgeführt von E. Benedict²⁾ und H. Kohn³⁾. Dadurch wird es möglich, nach Messung der Kohlenkonstanten die Temperatur des Kohlenfadens entsprechend dem Gesamtstrahlungsgesetz aus dem Wattverbrauch zu bestimmen, wobei man allerdings die Annahme machen muß, daß die hineingesteckte Energie fast ausschließlich bzw. immer in demselben Verhältnis durch Ausstrahlung nach außen abgegeben wird, eine Annahme, die durch die Untersuchungen von F. Conrad⁴⁾ bestätigt wird.

Für die Versuche im Sichtbaren und bis zu 340μ benutzte ich deshalb als „grauen“ Strahler L eine Kohlenfadenlampe für 110 Volt 55 Watt in Röhrenform mit geradem, präpariertem Kohlenfaden und einer Glocke aus gewöhnlichem Glas. Für noch kürzere Wellen wurde eine Lampe mit einer Uviolglasglocke improvisiert. Leider hatte diese infolge unvollkommener Evakuierung eine kurze Lebensdauer, so daß mit dieser Lampe nur wenige Versuche möglich waren. Auch die Temperaturbestimmungen (s. w. u.) konnten wegen Wärmeleitung des Glases nicht sicher erfolgen. Weitere Messungen sind auch hier eingeleitet.

Der Strahler wurde von einer großen Institutsbatterie gespeist, die nur für diesen Zweck gebraucht wurde. Spannung und Stromstärke konnten durch Drehspuleninstrumente kontrolliert und durch Regulierwiderstände genau eingestellt werden. Die Spannung konnte auf $\frac{1}{10}$ Volt, die Stromstärke auf Milliampere genau abgelesen werden. Da die Spannung in bestimmten Stufen variiert wurde — es

¹⁾ Lummer, Elektrotechn. ZS. **34**, 1428, 1913, Heft 50.

²⁾ E. Benedict, Ann. d. Phys. **47**, 649, 1915.

³⁾ H. Kohn, Ebenda **53**, 320, 1917.

⁴⁾ F. Conrad, Ebenda **54**, 357, 1917.

wurde immer auf einen vollen Skalenteilstrich eingestellt — konnten etwaige Veränderungen genauestens kontrolliert werden. Auch hier zeigte sich wieder, daß nach einem einmaligen Einbrennen eine Nachregulierung kaum erforderlich war.

§ 7. Temperaturbestimmung. Nach Lummer und Kohn¹⁾ kann die Temperaturbestimmung entweder aus dem Wattverbrauch pro horizontal ausgestrahlter Hefnerkerze oder aus dem Wattverbrauch pro Quadratcentimeter Oberfläche erfolgen.

Eine Photometrierung der Röhrenlampe I (Glasglocke) bei 110,0 Volt und 0,481 Ampere gegen eine Hefnerlampe ergab unter Berücksichtigung von 9 Proz. Reflexion an der Glasbirne eine Leuchtstärke von 11,30 HK. Die Lampe verbrauchte also bei dieser Temperatur 4,68 Watt/HK. Aus der von Lummer und Kohn aufgestellten Tabelle ergibt sich daraus die Temperatur der Lampe: $T_{110} = 2052^{\circ}$ abs.

Zur Kontrolle wurde die Temperaturberechnung noch auf die andere Weise durchgeführt:

Ist F die Oberfläche des Fadens in Quadratcentimeter, J die in Ampere abgelesene Stromstärke und V die an den Enden des Fadens festgestellte Spannung in Volt, so ist die absolute Temperatur des Glühfadens gegeben durch die das Stefan-Boltzmannsche Gesetz enthaltende Gleichung

$$0,2388 \cdot J \cdot V = A \cdot F \cdot T^4.$$

A ist dabei die Strahlungskonstante der Kohle. Sie wurde von Lummer und Kohn experimentell zu $\frac{0,725 \cdot 10^{-12} \text{ cal}}{\text{cm}^2 \text{ sec grad}^4}$ ermittelt.

Die mikroskopische Ausmessung der Fadendicke ergab $d = 0,0144 \text{ cm}$, die Länge 21,2 cm. Daraus berechnet sich die Oberfläche zu

$$F = 0,959_{08} \text{ cm}^2.$$

Daraus ergibt sich

$$T_{110} = \sqrt[4]{\frac{0,2388 \cdot 0,481 \cdot 110}{10^{-12} \cdot 0,725 \cdot 0,959}} = 2065^{\circ} \text{ abs.}$$

Im Mittel folgt also unter Voraussetzung der Gültigkeit der Lummerschen Zahlenangaben für diese Lampe

$$T_{110} = 2059^{\circ} \text{ abs.} \pm 0,34 \text{ Proz.}$$

Unter Zugrundelegung dieser Temperatur sind dann die Temperaturen für die anderen gebrauchten Spannungen aus dem Wattverbrauch berechnet worden (Tab. 5).

¹⁾ H. Kohn, Ann. d. Phys. 53, 320, 1917.
Zeitschrift für Physik. Bd. XI.

Da die Lampe nur zu den Hauptmessungen gebrannt wurde, konnte auch nach wochenlangen Versuchen keine Änderung in dem Gesamtstromverbrauch und — wie eine nochmalige Photometrierung zeigte — in der Helligkeit festgestellt werden.

Tabelle 5. Temperaturen der Röhrenlampe 1.

Volt	Milli-ampere	$T_{\text{abs.}}$	$1/T$
60,0	240	1487	$6,7237 \cdot 10^{-4}$
70,0	290	1621	6,1706
80,0	345	1750	5,7143
90,0	382	1849	5,4083
100,0	435	1961	5,1001
110,0	481	2059	4,8567
120,0	540	2166	4,6164

Die Temperaturen für die Uviollampe sind ebenfalls aus dem Wattverbrauch pro Hefnerkerze berechnet worden und in Tabelle 6 enthalten.

Tabelle 6. Temperaturen der Uviollampe.

Volt	Milli-ampere	$T_{\text{abs.}}$	$1/T$
110,0	380	1722	—
130,0	465	1889	$5,2929 \cdot 10^{-4}$
140,0	500	1959	5,1084
150,0	525	2018	4,9560
160,0	Lampe durchgebrannt		

§ 8. Aufnahme der Isochromaten. Die Aufnahme der einzelnen Isochromaten geschah nun in der Weise, daß zuerst die Zellkonstante für diese Wellenlänge und das verwandte Zellpotential auf die früher besprochene Weise festgestellt wurde. Dann wurde mittels der Spiegelklappvorrichtung die Zelle der Belichtung durch die Lampe L ausgesetzt, deren Temperatur in bestimmten Stufen variiert wurde. Es sei hierbei betont, daß diese Lampe nur zur Aufnahme der einzelnen Isochromatenpunkte brannte. Die infolge der Intensitätssteigerung immer wieder erforderliche Weiterermüdung geschah durch die kleine Lampe k , deren Abstand von dem Mattglas so reguliert wurde, daß ihre Wirkung auf die Zelle ungefähr der der großen Lampe gleichkam. Selbstverständlich traten hierzwischen nie Dunkelpausen ein, wie ja auch schon aus der Benutzung der Klappvorrichtung hervorgeht.

Zur Festlegung der Isochromaten wurden meistens fünf Punkte aufgenommen, wobei die Filter- und Blendenverhältnisse während einer Meßreihe nicht geändert wurden. Nur bei der Ultraviolettisochromate

für $\lambda = 340 \mu\mu$ mußte anders verfahren werden. Für tiefere Temperaturen wurden zunächst drei Punkte wie gewöhnlich ohne Abblenden bestimmt. Dann wurde der letzte dieser Punkte noch einmal aufgenommen, wobei die Intensität durch eine kleine Blende erheblich abgeschwächt war. Die Aufnahme der weiteren Punkte für höhere Temperaturen erfolgte alsdann ebenfalls mit dieser Blende. Durch dies Verfahren konnten die Punkte des zweiten Teils auf einfache Art auf die des ersten Teiles reduziert werden, ohne daß die Blende vermessen zu werden brauchte. — Nach Aufnahme der Isochromaten wurden dann sofort die Zellkonstanten noch einmal bestimmt.

Bei der Wellenlänge $316 \mu\mu$ war zu befürchten, daß die dazu notwendige Uviollampe, deren Herstellung — wie schon erwähnt — nicht ganz gelungen war, bei hohen Temperaturen durchbrennen würde. Deshalb wurde zuerst die Isochromate aufgenommen, wobei die Ermüdung der Zelle auch durch die Lampe selber erfolgen mußte. Tatsächlich gelang es hier auch nur, drei Punkte aufzunehmen; bei weiterer Temperaturerhöhung brannte die Lampe durch. Die Zellkonstante wurde nachträglich mit Hilfe einer auf der Photometerbank verschiebbaren Quarzquecksilberdampf Lampe gemessen. Als Filter dienten das Zeiss'sche Uviol- und die beiden Silberplattenfilter. Die Klappvorrichtung fiel fort, da ja der darin benutzte Silberspiegel diese Wellenlänge nicht reflektiert. Die Belichtung erfolgte deshalb direkt, wobei außer einer Blende zur Intensitätsschwächung vor der Zelle und vor der Quecksilberdampf Lampe sich je eine beiderseitig mattgeschliffene Uviolglasscheibe befanden. Die Entfernung zwischen den beiden Mattscheiben diente als relatives Maß der Lichtstärke.

Die Zellspannung betrug bei den ersten vier Isochromaten 200 Volt. Sie lag, um auch die langsam verlaufende Änderung auszugleichen, seit Wochen an der Zelle. Bei der letzten Isochromate ($316 \mu\mu$) mußte sie der äußerst geringen Intensität wegen auf 208 Volt erhöht werden. Auch diese Spannung lag seit etwa acht Tagen an der Zelle.

Die Aufladezeiten wurden für Teilstrich 85 bis 80 der Skale, bei der letzten Messung für 85 bis 84 gemessen. Die Ruhelage des Fadens war 86,2. Die — ständig kontrollierte — Empfindlichkeit des Elektrometers betrug 10 Skaltl./Volt. Da die Kapazität des ganzen Systems zu 11,7 cm festgestellt war, bedeutete eine Wanderung des Fadens von einem Skalenteil in einer Minute einen Photostrom von $2,17 \cdot 10^{-14}$ Ampere oder, da ich 1 Skaltl./1 min gleich der Intensität $J = 16,67$ setze [1 Skaltl./60 sec willkürlich multipliziert mit 1000], die Intensität $J = 1$ war gleichbedeutend mit einem Photostrom von $1,30 \cdot 10^{-15}$ Ampere.

§ 9. Kritische Betrachtung der Resultate. Die Ergebnisse der Messungen sind in den Tabellen 7 bis 20 enthalten und in Fig. 6 und 7 graphisch dargestellt.

Rotisochromate $\lambda = 630 \mu\mu$.

Zellspannung 200 Volt, Dunkeffekt 5,56, Lampe an 2,30 Volt, Aufladung 85 — 80.

Tabelle 7. Zellkonstante vorher.

$\log L$	J	$\log J$	Für Fig. 6 verschoben um $-1,00$
0,84 198	24,5	1,38 917	0,38 917
1,30 963	68,8	1,78 390	0,78 390
2,64 836	814,4	2,91 084	1,91 084

$$z = 1,1871.$$

Tabelle 9. Zellkonstante nachher.

$\log L$	J	$\log J$	Für Fig. 6 verschoben um $-1,00$
0,39 794	11,94	1,07 700	0,07 700
1,30 963	68,4	1,83 506	0,83 506
2,20 412	384,4	2,58 478	1,58 478

$$z = 1,1977.$$

$$z_{\text{Mittel}} = 1,1924.$$

Tabelle 8.

Stromverbrauch		$T_{\text{abs.}}$	$1/T$	J	$\log J$	$z \cdot \log J$
Volt	Milli-ampere					
60,0	240	1487	$6,7237 \cdot 10^{-4}$	11,88	1,07 482	1,2816
70,0	290	1621	6,1706	33,74	1,52 815	1,8221
80,0	345	1750	5,7143	78,69	1,89 592	2,2607
90,0	382	1849	5,4083	155,5	2,19 173	2,6134
100,0	435	1961	5,1001	271,4	2,43 361	2,9018

$$c_2^{(630)} = 14\,476.$$

Grünisochromate $\lambda = 535 \mu\mu$.

Zellspannung 200 Volt, Dunkeffekt 5,56, Lampe an 2,30 Volt, Aufladung 85 — 80.

Tabelle 10.
Zellkonstante vorher.

$\log L$	J	$\log J$	Für Fig. 6 verschoben um $-0,50$
0,59 218	15,34	1,18 583	0,68 583
0,84 198	25,24	1,40 209	0,90 209
1,30 963	65,59	1,81 684	1,31 684
1,79 657	152,4 ¹⁾	2,18 298	1,68 298
2,64 836	994,4	2,99 756	2,49 756

$$z = 1,1349.$$

Tabelle 12.
Zellkonstante nachher.

$\log J$	J	$\log J$	Für Fig. 6 verschoben um $-0,50$
0,39 794	13,79	1,13 956	0,63 956
0,84 198	33,50	1,52 504	1,02 504
1,30 963	86,80	1,93 852	1,43 852
1,79 657	232,4	2,36 624	1,86 624
2,20 412	485,4	2,68 610	2,18 610

$$z = 1,1402.$$

$$z_{\text{Mittel}} = 1,1376.$$

¹⁾ Hier scheint ein Beobachtungsfehler vorzuliegen, doch geben die Originalprotokolle dafür keinen Anhalt.

Tabelle 11.

Stromverbrauch		$T_{\text{abs.}}$	$1/T$	J	$\log J$	$z \cdot \log J$
Volt	Milli-ampere					
70,0	290	1621	$6,1706 \cdot 10^{-4}$	22,80	1,35 793	1,5448
80,0	345	1750	5,7143	63,00	1,79 934	2,0469
90,0	382	1849	5,4083	141,9	2,15 198	2,4481
100,0	435	1961	5,1001	293,4	2,46 746	2,8070
110,0	481	2059	4,8507	504,4	2,70 278	3,0747

$$c_2^{(535)} = 14\,344.$$

Violettisochromate $\lambda = 462 \mu\mu$.

Zellspannung 200 Volt, Dunkeleffekt 5,56, Lampe an 2,30 Volt, Aufladung 85 — 80.

Tabelle 13.

Zellkonstante vorher.

$\log L$	J	$\log J$	Für Fig. 6 verschoben um $-0,50$
0,39 794	32,90	1,51 720	1,01 720
1,30 963	182,9	2,26 221	1,76 221
1,79 657	457,9	2,66 077	2,16 077

$$z = 1,2230.$$

Tabelle 15.

Zellkonstante nachher.

$\log L$	J	$\log J$	Für Fig. 6 verschoben um $-0,40$
0,39 794	33,29	1,52 231	1,12 231
1,30 963	182,4	2,26 102	1,86 102
1,79 657	453,4	2,65 648	2,25 648

$$z = 1,2332.$$

$$z_{\text{Mittel}} = 1,2281.$$

Tabelle 14.

Stromverbrauch		$T_{\text{abs.}}$	$1/T$	J	$\log J$	$z \cdot \log J$	Für Fig. 7 verschoben um $-1,00$
Volt	Milli-ampere						
60,0	240	1487	$6,7237 \cdot 10^{-4}$	14,09	1,14 891	1,4110	0,4110
70,0	290	1621	6,1706	51,00	1,70 757	2,0970	1,0970
90,0	382	1849	5,4083	404,4	2,60 681	3,2015	2,2015
100,0	435	1961	5,1001	871,4	2,94 022	3,6109	2,6109
110,0	481	2059	4,8567	1558,4	3,19 268	3,9210	2,9210

$$c_2^{(462)} = 14\,302.$$

Ultraviolettisochromate I $\lambda = 340 \mu\mu$.

Zellspannung 200 Volt, Dunkeleffekt 5,56, Lampe an 4,00 Volt, Aufladung 85—80.

Tabelle 16.

Zellkonstante vorher.

$\log L$	J	$\log J$	Für Fig. 6 verschoben um $+0,50$
1,79 657	192,9	2,28 533	2,78 533
2,20 412	425,9	2,62 931	3,12 931
2,64 836	938,4	2,97 239	3,47 239

$$z = 1,2398.$$

Tabelle 18.

Zellkonstante nachher.

$\log L$	J	$\log J$	Für Fig. 6 verschoben um $+0,60$
1,79 657	213,2	2,32 879	2,92 879
2,20 412	466,4	2,66 876	3,26 876
2,64 836	1014,4	3,00 621	3,60 621

$$z = 1,2574.$$

$$z_{\text{Mittel}} = 1,2486.$$

Tabelle 17.

	Stromverbrauch		$T_{\text{abs.}}$	$1/T$	J	$\log J$		$z \cdot \log J$	Für Fig. 7 verschoben um -1,70
	Volt	Milli-ampere				mit Blende	ohne Blende		
Ohne Blende	70,0	290	1621	$6,1706 \cdot 10^{-4}$	40,80	—	1,61 066	2,0113	0,3113
	80,0	345	1750	5,7143	172,9	—	2,23 779	2,7943	1,0943
	90,0	382	1849	5,4083	562,4	—	2,75 005	3,4340	1,7340
Mit Blende	90,0	382	1849	5,4083	18,80	1,27 416	(2,75 005)	—	—
	100,0	435	1961	5,1001	51,20	1,70 927	(3,18 516)	3,9773	2,2773
	110,0	481	2059	4,8567	125,4	2,09 830	(3,57 419)	4,4630	2,7630
	120,0	540	2166	4,6164	263,4	2,42 002	(3,89 591)	4,8661	3,1661

$$c_2^{(340)} = 14\,380.$$

Ultraviolettisochromate II $\lambda = 316 \mu$.

Zellspannung 208 Volt, Dunkeleffekt 7,40, Uviolampe, Aufladung 85—84.

Tabelle 19.

Stromverbrauch		$T_{\text{abs.}}$	$1/T$	J	$\log J$	Verschoben um + 1,00	Siehe Tab. 20 $z \cdot \log J$
Volt	Milli-ampere						
130	465	1889	$5,2929 \cdot 10^{-4}$	0,30	1,47 712	0,47 712	0,64 389
140	500	1959	5,1034	0,57	1,75 587	0,75 587	1,02 01
150	525	2018	4,9560	0,94	1,97 313	0,97 313	1,31 33
160							

Lampe durchgebrannt.

Tabelle 20.

Zellkonstante bestimmt mit Quecksilberdampf Lampe, ohne Klappvorrichtung.

Zellspannung 208 Volt, Dunkeleffekt 7,40, Aufladung 85—80.

$\log L$	J	$\log J$	Für Fig. 6 verschoben um + 1,50
0,84 198	9,75	0,98 900	2,48 900
1,30 963	23,80	1,37 658	2,87 658
1,79 657	49,70	1,69 636	3,19 636

$$z = 1,3495.$$

$$c_2^{(316)} = 14\,458.$$

Die Tabellen für die Zellkonstanten enthalten in der ersten Spalte den $\log$ der sich aus der Entfernung ergebenden Lichtstärke, in der zweiten Spalte die aus dem Mittel der Aufladezeit berechnete elektrische Intensität nach Abzug des Dunkeleffekts und in der dritten Spalte den $\log$ davon. In der vierten Spalte ist dieser dann für die graphische Darstellung um ein passendes Stück verschoben.

Die Tabellen für die Isochromaten enthalten in den ersten drei Spalten die Angaben aus Tabelle 5 und 6 über Stromspannung und -stärke, absolute Temperatur und deren reziproken Wert, in der vierten

und fünften Spalte die aus der Aufladezeit berechnete elektrische Intensität abzüglich des Dunkeleffekts und den $\log$ davon und in der sechsten Spalte diesen $\log$, multipliziert mit dem aus den breiten Messungen gebildeten Mittelwert von z .

In Fig. 6 sind in der von früher bekannten Weise die Zellkonstanten dargestellt und in Fig. 7 endlich sind die Isochromaten gezeichnet, indem $1/T$ als Abszisse und $z \cdot \log J$ als Ordinate aufgetragen wurde.

Die Zellkonstanten zeigen wieder alle den geradlinigen Verlauf, aber es ist beachtenswert, daß zwischen den Werten vor und nach

Fig. 6.

der Messung der Isochromaten ein Unterschied immer in demselben Sinne besteht, nämlich so, daß der letztere Wert größer ist. Das scheint dafür zu sprechen, daß durch die stundenlange Beanspruchung die Zelle doch etwas weiter ermüdet wird.

Die Isochromaten haben ebenfalls alle einen befriedigend geradlinigen Verlauf (Fig. 7). In Tabelle 21 sind die aus der Neigung der Isochromaten sich ergebenden c_2 Werte zusammengestellt. Zur Mittelwertbildung ist der letzte Wert mit halbem Gewicht eingesetzt, da dort nur drei Punkte aufgenommen werden konnten und die möglichen

Tabelle 21. Zusammenstellung der c_2 -Werte.

λ	630	535	462	340	316	Im Mittel
c_2	14 476	14 344	14 302	14 380	14 458	14 385

Versuchsfehler dort am größten schienen. Es ergibt sich dann im Mittel für c_2 der Wert 14385, die größte Abweichung hiervon beträgt 0,63 Proz., der mittlere wahrscheinliche Fehler 0,16 Proz. Der wirkliche Fehler des Resultats dürfte aber infolge geringer konstanter Fehler bei den Messungen etwas höher liegen. Die Hauptfehler dürften bei Bestimmung der Wellenlänge gemacht sein, da die Feststellung des Optimums in einem Spektralbereich mit Schwierigkeiten

Fig. 7.

verbunden ist. Die Bestimmung der Temperatur dürfte sicherlich auf $\pm 1/3$ Proz. genau sein und die Bestimmung von z , da ja nur die Logarithmen eingehen, wohl noch genauer.

Endlich ist an diesem Wert von $c_2 = 14385$ noch eine Korrektur anzubringen, die allerdings nicht zahlenmäßig, sondern nur dem Sinne nach festgelegt werden kann. Da das Licht nicht mit Hilfe von Spektralapparaten zerlegt, sondern durch Filter monochromatisiert wurde, so war das erzielte Licht nicht rein monochromatisch, sondern nahm immer einen gewissen Spektralbereich ein. Das Optimum dieses Bereichs, wie es im Spektrometer festgestellt wurde, war die Stelle,

an der die vom Filter durchgelassenen Wellenlängen auf das Auge die größte Wirksamkeit ausübten. Nun liegt aber die maximale Empfindlichkeit des Auges etwa bei $0,55\mu$, während die der Zelle mehr und mehr wächst, je kürzere Wellen man verwendet. Infolgedessen wird die Zelle einen Punkt kleinerer Wellenlängen als Optimum empfinden und die mit Hilfe des Spektrometers und des Auges festgestellten Wellenlängen, die für die Rechnung als maßgebend angesehen wurden, werden noch um einen gewissen Prozentsatz korrigiert werden müssen. Es ist mir allerdings nicht möglich, diese Korrektion zahlenmäßig festzulegen, doch dürfte sie wenige Promille sicherlich nicht übersteigen. Der vorher errechnete Wert $c_2 = 14385$ dürfte also unter Berücksichtigung dieser Korrektion etwas zu hoch sein.

Zum Vergleich seien die Ergebnisse der neuesten Messungen anderer Autoren hier zusammengestellt.

Warburg u. Mitarb. ¹⁾	1915	Isochromaten: a) Temperatur nach Stefan-Boltzmann	14 250
		b) Temperatur nach Wien	
		1. Dispersion nach Carvallo	14 300
		2. Dispersion nach Paschen	14 400
Coblentz ¹⁾	1916	Isothermen	14 320
Rubens u. Michel ¹⁾	1921	Isochromaten	14 270
Baisch ²⁾	1911	Ultraviolette Isochromaten	14 970

Der Warburgsche Wert von 14300 und der von Rubens und Michel gemessene von 14270 dürften wohl dem wirklichen am nächsten kommen. Diese Werte liegen auch noch innerhalb der Fehlergrenzen des von mir gefundenen Wertes.

Die Graustrahlung der Kohle war bisher für das von mir untersuchte Gebiet nicht nachgewiesen. Meine Versuche ergeben nun

1. geradlinige Isochromaten,
2. Neigung der Isochromaten proportional $1/\lambda$.

Daraus folgt: $E_\lambda = \frac{f(\lambda)}{e^{\lambda T}}$, d. h., daß die Kohle auch in diesem

Teil des ultravioletten Gebiets als „grauer“ Körper strahlt. Die Bestimmung der Funktion $f(\lambda)$ ist für später vorbehalten.

¹⁾ Eingehende Literaturangaben hierüber siehe: W. Coblentz, Scientific Pap. of the Bur. of Stand. Nr. 406, 1920; Nernst u. Wulf, Verh. d. D. Phys. Ges. **21**, 294, 1919; vgl. hierzu: Rubens u. Michel, Sitzber. d. preuß. Akad. d. Wiss. 1921, S. 590; G. Michel, ZS. f. Phys. **9**, 285, 1922.

²⁾ E. Baisch, Ann. d. Phys. **35**, 543, 1911.

An der Verfeinerung der Untersuchungen unter Verwendung eines schwarzen Körpers, Quarzspektrographen, einer Quarz- und eines empfindlicheren Elektrometers wird gearbeitet.

§ 10. Zusammenstellung. An einer innen bis auf eine kleine Öffnung völlig verspiegelten Elster- und Geitelschen Kaliumphotozelle werden neben einer ganz langsam auch im Dunkeln erfolgenden Änderung des Entladungspotentials schnell verlaufende Ermüdungserscheinungen infolge Belichtung festgestellt.

Bei der vorermüdeten Zelle wird in einem Intensitätsbereich von 1:200 das Gesetz gefunden, daß

$$J^z = c \cdot L$$

(J = Photostrom, L = Lichtstärke, $z > 1$).

Diese Photozelle wird unter Verwendung einer Kohlenfadenlampe als grauem Körper und mit Hilfe von Filtern zur Monochromatisierung des Lichts für die Prüfung der Wien-Planckschen Strahlungsformel im Gebiet ultravioletter Wellen benutzt. Das Plancksche Gesetz erweist sich bis zu $\lambda = 316 \mu\mu$ als erfüllt.

Die vorliegende Arbeit wurde im hiesigen Universitätsinstitut für Experimentalphysik unter Leitung von Herrn Professor Dr. W. Kaufmann ausgeführt.

Ich möchte die Arbeit nicht abschließen, ohne meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. W. Kaufmann, dem ich die Anregung zu dieser Arbeit verdanke, auch an dieser Stelle für das große Interesse, mit dem er dieselbe stets fördernd verfolgte, und für das gütige Wohlwollen, das er mir während meiner ganzen Studienzeit entgegenbrachte, meinen herzlichsten Dank zu sagen.

Auch Herrn Professor Dr. G. Hoffmann bin ich für die leihweise Überlassung einiger Apparate und besonders für seine stete Hilfsbereitschaft zu großem Dank verpflichtet.

Endlich ist es mir eine angenehme Pflicht, der Helmholtzgesellschaft für die Gewährung von Geldmitteln zu danken, aus denen ein Teil der Aufwendungen gedeckt werden konnte.

Königsberg i. Pr., im September 1922.