

Untersuchungen an stromstarken Kapillarentladungen

Teil III: Spektroskopische Messungen

HORST EHRICH und HANS JÜRGEN KUSCH

Institut für Experimentalphysik der Universität Kiel

(Z. Naturforsch. 27 a, 693—699 [1972]; eingegangen am 15. Dezember 1971)

Investigations on High Current Capillary-Discharges. Part III: Spectroscopic Measurements

The spectra of the capillary discharges described in Part I and II were investigated. A survey of the spectral emission was obtained by photographic spectroscopy while high-accuracy measurements of the intensity distribution in the wavelength region of 2100—6000 Å were performed using photoelectric techniques. Special care was taken for the current vs. intensity-curve of the photomultiplier and the transparency of the filters used. According to the high reproducibility of the end-on emission of capillary discharges light sources of this type are very suitable for intensity calibration in the field of μ sec-spectroscopy.

A. Einleitung

Im Anschluß an Arbeiten von PODMOSHENSKII und OGURTSOVA^{1—5} durchgeführte Untersuchungen an stromstarken Entladungen durch Plexiglaskapillaren zeigten neben der besonderen Wichtigkeit dieser homogenen Hochtemperaturplasmen für die Physik dichter Plasmen (Elektronendichtebereich bis zu 10^{20} cm^{-3}) die besondere Eignung als intensives Strahlungsnormal. Wegen des relativ großen Fehlers der in Teil I dieser Untersuchungen benutzten photographischen Methode der spektroskopischen Strahlungsmessung wird in dieser Arbeit das genauere photoelektrische Verfahren zur Bestimmung der spektralen StrahldichteVerteilung verwendet. Dabei ist zum genauen photometrischen Anschluß des Hochtemperatur-Strahlungsnormals an die wesentlich weniger intensiven herkömmlichen Normale den Eigenschaften von Photomultipliern in einem viele Zehnerpotenzen überstreichenden Bereich der Intensität besondere Beachtung zu schenken.

B. Spektroskopische Untersuchungen der Kapillarentladungen

Einen ersten Überblick über das spektrale Verhalten der Kapillarentladungen gaben die mittels eines Prismenspektrographen (Q 24, VEB Jena) im Wellenlängengebiet von 5600 bis 2300 Å hergestellten Aufnahmen (vgl. Teil I); das ausgesandte Licht wurde in Richtung der Kapillarenachse beobachtet.

Reprint requests to Prof. Dr. W. LOCHTE-HOLTGREVEN, Institut für Experimentalphysik der Universität Kiel, D-2300 Kiel 1, Olshausenstraße 40—60.

Als Aufnahmematerial dienten auch hier Ilford-R 10-Platten, die in Microphen entwickelt wurden. Deutlich sichtbar in den Übersichtsspektren ist die Abhängigkeit vom Entladungsstrom als auch von der Konstruktion der verwendeten Kapillarlampe. Während bei hohen Stromstärken ein nur von wenigen Absorptionslinien durchsetztes Kontinuum emittiert wird, sinkt seine Intensität mit abnehmender Stromstärke bei gleichzeitigem Ansteigen der Liniensstrahlung, am stärksten bei Lampe 3, am schwächsten bei Lampe 1. Stromschwache Entladungen senden fast nur noch ein Linienspektrum aus. Sollen Lichtquellen dieser Art also als Normalstrahler Anwendung finden, ist die Verwendung nicht zu kleiner Stromstärken notwendig; bei einer Sättigung der kontinuierlichen Emission erfolgt dann die Annäherung der spektralen Intensitätsverteilung der Kapillarentladung an die eines schwarzen Körpers mit der Temperatur des Plasmas. Besonders einfach konnten diese Übersichtsspektren neben der üblichen Methode der Aufnahme einzelner Entladungen bei an den Wellenwiderstand angepaßtem Abschlußwiderstand und variabler Ladespannung aus Schmierspektren von Entladungen ohne Anpassung des Abschlußwiderstandes gewonnen werden. Wie in Teil II, C, 4 c, dargestellt wurde, führt die Fehlanpassung zu einer Folge von Rechteckimpulsen wechselnder Polarität und abnehmender Amplitude; der zeitliche Verlauf der spektralen Emission durchläuft dann eine Reihe treppenförmig angeordneter Spektren bei jeweils abnehmender Stromstärke. Die Kapillare wurde zunächst auf eine kreisförmige Zwischenblende abgebildet, so daß nur Strahlung aus dem achsennahen Teil des Kapillarplasmas über eine



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Linse und einen Drehspiegel auf den Eintrittsspalt des Spektrographen traf. Der mit seiner Drehachse senkrecht zur Ausdehnung des Spaltes angeordnete Drehspiegel bewegte das Bild der Blendenöffnung während der Entladung über den Spalt; die Auslösung der Entladung erfolgte bei geeigneter Stellung des Spiegels über eine dann vom Licht einer Hilfslichtquelle getroffene Photodiode. Ein typisches Spektrum zeigt Abb. 1 *.

C. Photoelektrische Messungen der spektralen StrahldichteVerteilung

Wegen des relativ großen Fehlers photographischer Verfahren ist bei der genauen Vermessung der spektralen StrahldichteVerteilung die photoelektrische Methode vorzuziehen. Jedoch muß bei der Kalibrierung von Hochtemperaturplasmen mit Hilfe der gebräuchlichen Strahlungsnormale⁶⁻¹⁶ die Kennlinie des verwendeten Photomultipliers in einem mehrere Zehnerpotenzen überstreichenden Bereich bekannt sein. Daher beschäftigen sich die folgenden Abschnitte mit der Untersuchung dieser Abhängigkeit.

a) Die Kennlinie des verwendeten Photomultipliers

Der Zusammenhang zwischen dem auf die Photokathode eines Photomultipliers auftreffenden Lichtstrom und dem Anodenstrom ist in einer Reihe von Arbeiten¹⁷⁻²⁵ untersucht worden. Dabei dienten zur definierten Abschwächung des einfallenden Lichtes Blenden, Filter, Anordnungen von Polarisatoren oder das quadratische Abstandsgesetz. Im letzten Falle beeinträchtigen das Streulicht begrenzender Wände sowie fokussierende Eigenschaften des Lampenkolbens die Genauigkeit; bei der Verwendung von Polarisatoren führt die Abweichung vom idealen $\cos^2 \varphi$ -Gesetz zu unsichereren Ergebnissen. Die Verwendung von Filtern bekannter Transparenz umgeht diese Schwierigkeiten; daher wurde diese Methode in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Die Bestimmung der Kennlinie des für die späteren Messungen verwendeten Photomultipliers 1 P 28 (RCA) erfolgte in zwei Schritten:

1. Messung der Transmission eines Graufilters bei der Wellenlänge 5461 Å mit einer Zählanordnung (vgl. ²¹).
2. Bestimmung der Kennlinie des Photomultipliers bei der Wellenlänge 5461 Å mit Hilfe dieses Filters.

* Abb. 1 auf Tafel S. 692 a.

Da Abweichungen von der linearen Kennlinie des Photomultipliers sicher durch Nichtlinearitäten der Verstärkungseffekte bedingt sind, ist die Unabhängigkeit der Licht-Strom-Abhängigkeit von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes zu erwarten.

1. Transmission eines Graufilters bei der Wellenlänge 5461 Å, bestimmt in einer Zählanordnung

Als Lichtquelle diente eine aus einer hochstabilisierten Spannungsquelle (0,1%) gespeiste Glühlampe mit Grünfilter. Ihre Wendel stand im Brennpunkt einer Linse, eine zweite Linse verengte das Bündel bis zur vollen Kathodenleuchttung des verwendeten Photomultipliers [56 DUVP (Valvo) bzw. 6810 Å (RCA)]. Ein Platin-Rhodium-Neutralfilter (Balzers) konnte in den parallelen Strahlengang zwischen den Linsen gebracht werden; Mehrfachreflexionen zwischen den optischen Flächen wurden vermieden. Ein Wärmereservoir hielt die Temperatur des Photomultipliers und somit Empfindlichkeit und Dunkelstrom konstant. Der Ausgang des Photomultipliers war reflexionsfrei über einen Vorverstärker (Hewlett-Packard 462 Amplifier, 40 dB, 50 Ω) an einen 10 MHz-Zähler (Beckman Model 7370) angeschlossen. Die Impulse rührten von einzelnen an der Kathode austretenden Elektronen her, die Impulsbreite war nach Verstärkung kleiner als 20 nsec. Impulsüberlappung trat erst bei Zählraten auf, die wesentlich größer als die verwendeten waren. Aus jeweils 10 sec dauernden Zählungen von Dunkelstrom und Impulsrate mit und ohne Filter ergab sich dann direkt die Filtertransparenz; der erhaltene Wert stimmte gut mit dem Grenzwert von Gleichspannungsmessungen für kleine Anodenströme (< 100 nA) überein. Dazu wurde die Spannung am Anodenwiderstand des Photomultipliers mit einem Digitalvoltmeter (Solartron LM 1420) mit einer Genauigkeit besser als 0,05% gemessen.

2. Bestimmung der Kennlinie des Photomultipliers

Die Aufnahme der Kennlinie erfolgte unter Bedingungen, die denen bei der Vermessung der Lichtimpulse aus der Kapillarentladung entsprachen. Eine vor dem Eintrittsspalt einer auf die Wellenlänge $\lambda = 5461 \text{ Å}$ eingestellten Doppelmonochromator-Anordnung (vgl. C, c) befindliche Sektorschibe erzeugte Lichtimpulse von 220 μsec Dauer mit einer Folgefrequenz von 20 sec^{-1} . Die Bestimmung der Kennlinie geschah in drei Schritten: zunächst wurden Messungen des Gleichstrommittelwerts an einem mit $2 \mu\text{F}$ überbrückten Arbeitswiderstand von $10 \text{ k}\Omega$ mit Hilfe des Digitalvoltmeters vorgenommen. Sodann erfolgte die Zuordnung dieser Gleichstromsignale zur Amplitude der periodischen Lichtimpulse durch oszillographische Messung in einem weiten Bereich des auf die Kathode treffenden Lichtstroms. Schließlich wurde dann die benötigte Kennlinie für die Belichtung mit *einem* Lichtimpuls durch oszillographischen Vergleich der Höhe periodischer Impulse mit der Höhe *eines* Impulses (erzeugt durch Sektor-

scheibe und Zentralverschluß) gewonnen. Zum schrittweisen Aufbau der Kennlinie wurde die Wendel einer aus einer hochstabilen Spannungsquelle gespeisten Glühlampe mittels zweier Linsen auf den Eintrittsspalt des Doppelmonochromators abgebildet; die Variation des Lichtstroms erfolgte durch Verdrehen von Polarisatoren bzw. durch Ändern der Spaltweite. Im parallelen Strahlengang zwischen den Linsen befand sich das im vorhergehenden Abschnitt genau vermessene Filter.

Beginnend mit Anodenströmen des Photomultipliers in der Größenordnung des Dunkelstroms wurde jeweils der folgende Zyklus durchlaufen:

1. Messung des mittleren Anodenstroms I_1 bei Beleuchtung durch das Graufilter der Transparenz t hindurch: Lichtstrom $t \Phi$.
2. Messung des mittleren Anodenstroms I_2 bei Beleuchtung ohne Filter: Lichtstrom Φ .
3. Messung des Dunkelstroms I_D .
4. Nachregeln des Lichtstroms mit Filterschwächung auf den Wert Φ ,

sodann wieder entsprechend 1. fortgesetzt. Für den hier verwendeten Photomultiplier 1 P 28* ergab sich mit guter Näherung im Anodenstrombereich bis zu 10% des Querstroms von 2 mA:

$$I = \text{const } \Phi^{1,010}.$$

In vielen Untersuchungen wird der Zusammenhang zwischen dem Photostrom und dem auf die Photokathode auftreffenden Lichtstrom als streng proportional angenommen. Ein geringes Abweichen der Kennlinie vom linearen Verlauf führt jedoch zu erheblichen Fehlern, wenn der zu untersuchende Intensitätsbereich sich über einige Zehnerpotenzen erstreckt (vgl. 21).

b) Vermessung der spektralen Transmission von Graufiltern

Die Absolutintensitätsmessung intensiver Lichtquellen erfordert bekanntlich die Überbrückung großer Intensitätsunterschiede. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, derartige Messungen unter Verwendung von Graufiltern bekannter Transparenz auszuführen.

In dieser Arbeit wurden Platin-Rhodium-Filterschichten (Balzers) benutzt, die auf einem Träger aus Spectrosil B (Thermalquarzschnmelze, Wiesbaden) aufgedampft waren. Zur Durchführung der Messungen wurde eine Xenon-Hochdrucklampe XBO 1001 (Osram)

mittels zweier Quarz-Flußspat-Achromaten auf den Eintrittsspalt der Doppelmonochromator-Anordnung (vgl. C, c) abgebildet. Das zu vermessende Filter befand sich im parallelen Teil des Strahlengangs. Der Gleichstrommittelwert der mit der Sektorscheibe erzeugten periodischen Lichtimpulse wurde wieder mit einem Digitalvoltmeter (Solartron LM 1420 mit Kienzle-Drucker) im Abstand von jeweils 2 sec an einem RC-Glied gemessen.

Aus den mittleren Meßwerten: mit Filter, ohne Filter, Dunkelstrom ergab sich dann die gewünschte Filtertransparenz. Die Messung erfolgte im Bereich von 6000 Å bis 2000 Å in Schritten von jeweils 100 Å. Die geringe Streuung der Einzelwerte bei fester Wellenlänge beweist die hervorragende Konstanz der mit einem Gleichspannungsgenerator betriebenen Xenonhochdrucklampe als auch der Meßanordnung.

c) Die Messung der spektralen Strahldichte von Kapillarentladungen

Mit Hilfe der Kenntnis der Kennlinie des verwendeten Photomultipliers sowie des spektralen Verlaufs der Filtertransmission konnte die Strahldichteverteilung verschiedener Kapillarlampen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Über einen Schwenkspiegel und einen Quarz-Flußspat-Achromaten von 500 mm Brennweite wurde das Innere der Kapillarlampe bzw. der als Strahlungsnormale verwendete Anodenkrater des Kohlebogens auf den Eintrittsspalt der Doppelmonochromator-Anordnung abgebildet. Ausreichende Schärfentiefe bewirkten Kreisblenden vor dem Achromaten; die der Dauer der Kapillarentladung entsprechenden Normalstrahlerpulse (220 μ sec) erzeugte eine Sektorscheibe in Verbindung mit einem Zentralverschluß. Wegen des großen Intensitätsunterschiedes wurde das Licht der Kapillarlampe mit einem Platin-Rhodium-Filter der mittleren Transparenz 0,1% abgeschwächt. Zur Messung dienten zwei Baush & Lomb-Monochromatoren ($F: 4,4$; Brennweite 500 mm); der Austrittsspalt des ersten wurde mit einem Quarz-Lithiumfluorid-Achromaten von 75,8 mm Brennweite auf den Eintrittsspalt des zweiten abgebildet. Zur Prüfung der im ultravioletten Spektralbereich besonders wichtigen Streulichtfreiheit wurden beide Monochromatoren auf eine Wellenlänge von 2100 Å eingestellt und ein Glasscheibchen von 1 cm Dicke bzw. ein Quarzscheibchen (Herasil I) von 1 cm Dicke in den Strahlengang eingebracht. Das Glasscheibchen brachte das Signal des Kohlebogens völlig zum Verschwinden, während das Quarzscheibchen mit seiner bei 2200 Å wesentlich werdenden Absorption das Signal auf 5% seines Wertes herabsetzte. Streulicht aus dem Sichtbaren ist also völlig zu vernachlässigen, Anteile aus benachbarten Wellenlängengebieten liegen unter 1%. Die spektrale Breite der Monochromator-Anordnung betrug maximal 50 Å; die Photokathode war bei allen Messungen voll ausgeleuchtet. Der zur Messung verwendete

* Stromversorgung: $R_1 = 68 \text{ k}\Omega$, $R_2 \dots R_5 = 33 \text{ k}\Omega$, $R_6 = 43 \text{ k}\Omega$, $R_7 = 47 \text{ k}\Omega$, $R_8 = 56 \text{ k}\Omega$, $R_9 = R_{10} = 68 \text{ k}\Omega$; $C_1 \dots C_6 = 20 \text{ nF}$, $C_7 = 30 \text{ nF}$, $C_8 = 110 \text{ nF}$, $C_9 = 330 \text{ nF}$, $C_{10} = 1 \mu\text{F}$; Betriebsspannung: 1000 V.

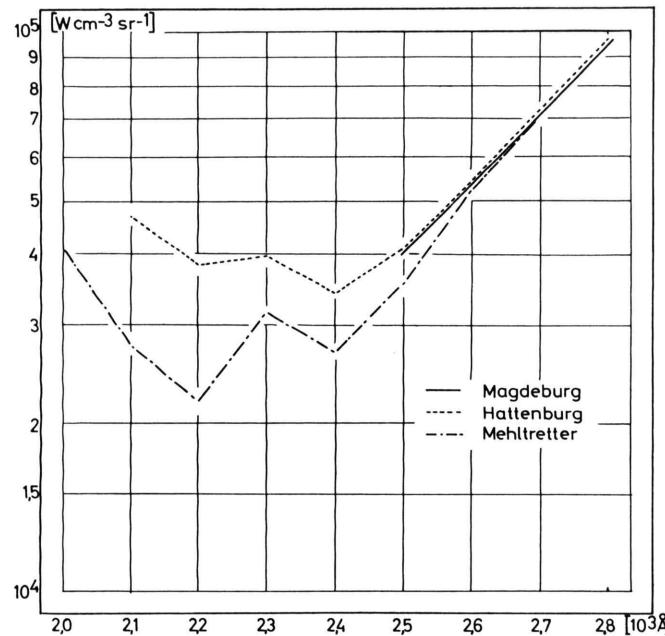


Abb. 2. Die Strahldichte des Kohlebogen-Normals im Wellenlängenbereich von 2000 Å bis 2800 Å nach den Messungen verschiedener Autoren. MEHLTRETER¹¹, MAGDEBURG u. SCHLEY¹³, HATTENBURG¹⁵.

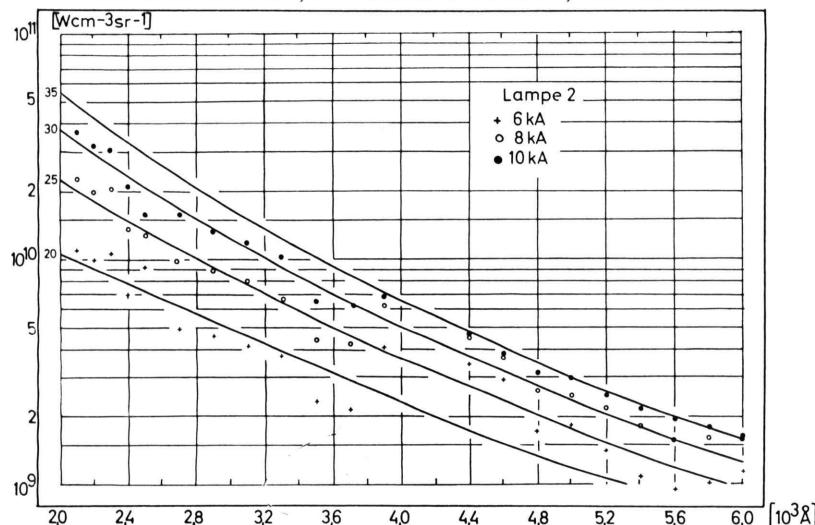


Abb. 4. Die spektrale Strahldichteverteilung einer Kapillarentladung durch Plexiglas, Lampentyp 2. Durchmesser der Kapillare: 3 mm, Länge der Kapillare: 8 mm. Zum Vergleich sind Kirchhoff-Planck-Isothermen eingezeichnet; die zugehörigen Temperaturen sind am Rande in 10^3 K angegeben.

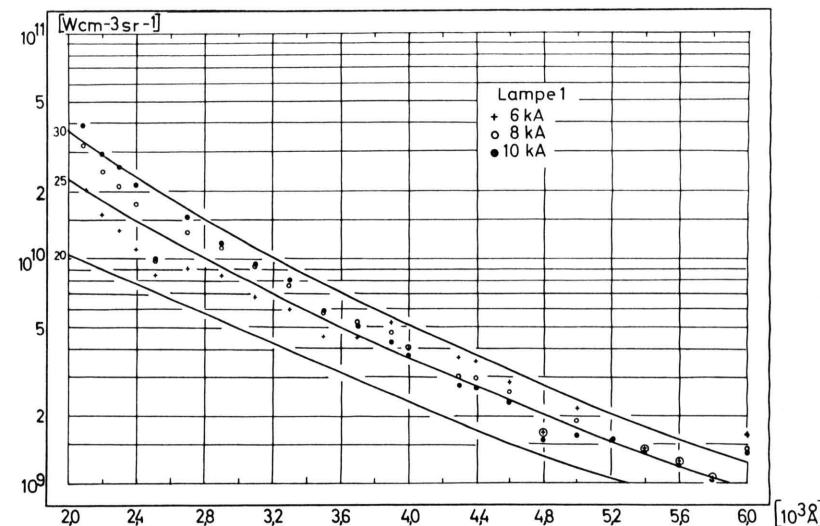


Abb. 3. Die spektrale Strahldichteverteilung einer Kapillarentladung durch Plexiglas, Lampentyp 1. Durchmesser der Kapillare: 3 mm, Länge der Kapillare: 8 mm. Zum Vergleich sind Kirchhoff-Planck-Isothermen eingezeichnet; die zugehörigen Temperaturen sind am Rande in 10^3 K angegeben.

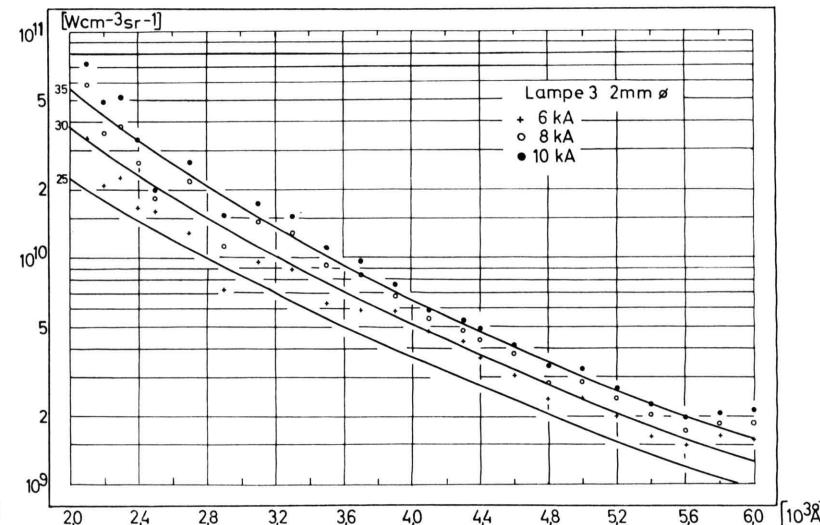


Abb. 5. Die spektrale Strahldichteverteilung einer Kapillarentladung durch Plexiglas, Lampentyp 3. Durchmesser der Kapillare: 2 mm, Länge der Kapillare: 8 mm. Zum Vergleich sind Kirchhoff-Planck-Isothermen eingezeichnet; die zugehörigen Temperaturen sind am Rande in 10^3 K angegeben.



H. EHRICH und H. J. KUSCH, *Untersuchungen an stromstarken Kapillarentladungen. Teil III: Spektroskopische Messungen* (S. 693).

Abb. 1. Schmierspektren (end-on) einer Kapillarentladung durch Plexiglas. Entsprechend der Fehlanpassung des Abschlußwiderstandes ergibt sich ein treppenförmiger Abfall der Stromstärke.

Oszilloskop (Tektronix 533 A, L-Einschub) war zur Vermeidung von Störungen in einer Abschirmkabine untergebracht. Die Kalibration der verschiedenen Meßbereiche geschah mit einem Eichgenerator (Tektronix 190 A) in Verbindung mit dem schon erwähnten Digitalvoltmeter. Damit durfte der meßtechnische Fehler 1% nicht übersteigen. Zur Kontrolle der Entladungsbedingungen registrierte ein weiterer Oszilloskop über einen Integrationsverstärker (o-Unit, Tektronix) das Signal einer Induktionsspule.

Die Messungen wurden im Bereich zwischen 6000 Å und 2000 Å in Schritten von 100 Å durchgeführt; zur Unterdrückung kurzzeitiger Schwankungen der Kohlebogenintensität erfolgte die Kalibrierung jedes Lichtsignals aus der Kapillarentladung durch den Mittelwert aus jeweils vier Signalen des Kohlebogens. Dennoch waren die Lichtstromschwankungen des Kohlebogens so groß, daß oberhalb 3000 Å eine Streuung der Meßwerte von 5% nicht zu vermeiden war. Abbildung 2 verdeutlicht die Probleme, die, von der schlechten Reproduzierbarkeit abgesehen, bei Verwendung des Kohlebogens als Strahlungsnormal im Bereich zwischen 2000 Å und 3000 Å auftreten. Oberhalb von 2500 Å erfolgte die Kalibrierung der Impulsenladungen mit den Strahldichten des Kohlebogens nach MAGDEBURG und SCHLEY¹³; bei kürzeren Wellenlängen wurden die Werte nach HATTENBURG¹⁵ benutzt, die oberhalb von 2500 Å besser mit den Messungen von Magdeburg und Schley übereinstimmen als die von MEHLTRETTER¹¹ angegebenen Strahldichten. Insgesamt ist aber bei der Verwendung des Kohlebogens

als Intensitätsstandard zwischen 2000 Å und 2500 Å eine Unsicherheit der absoluten Strahldichte der Kapillarentladung von 10 bis 15% nicht zu vermeiden. Wesentliche Verbesserungen der Meßgenauigkeit sind, wie vorbereitende Messungen bestätigten, nur vom Einsatz einer Wolframbandlampe als Strahlungsnormale zu erwarten; ausführliche Untersuchungen sollen folgen. Die Abb. 3, 4, 5 zeigen die spektralen Strahldichten der verschiedenen Kapillarentladungen im Bereich von 2000 Å bis 6000 Å; im Vergleich dazu sind Kirchhoff-Planck-Isothermen mit den jeweils am Rande angegebenen Temperaturen (in 10^3 °K) eingezeichnet. Die Kapillarlänge betrug in allen Fällen 8 mm. Kapillarentladungen geringerer Stromstärke zeigen einen im Vergleich zu den Kirchhoff-Planck-Funktionen stark schwankenden Intensitätsverlauf; offenbar wird hier nur in begrenzten Spektralbereichen aus optisch dicker Schicht emittiert. Abbildung 6 a, b zeigt die Strahldichten der verschiedenen Lampen in Abhängigkeit von der Länge des gesamten Entladungskanals (bestehend aus der Kapillarlänge von 8 mm und, sofern vorhanden, der Durchbohrung der Kohleelektroden). Da das intensiv leuchtende Plasma streng auf den Entladungskanal begrenzt ist, folgt hieraus, daß bei schwächeren Strömen und kleineren Kapillarlängen das Plasma nicht mehr aus optisch dicker Schicht emittiert. Erst zu höheren Entladungsströmen und längeren Entladungskanälen hin bleibt die Intensität bei Längenveränderung der Plasmasäule konstant,

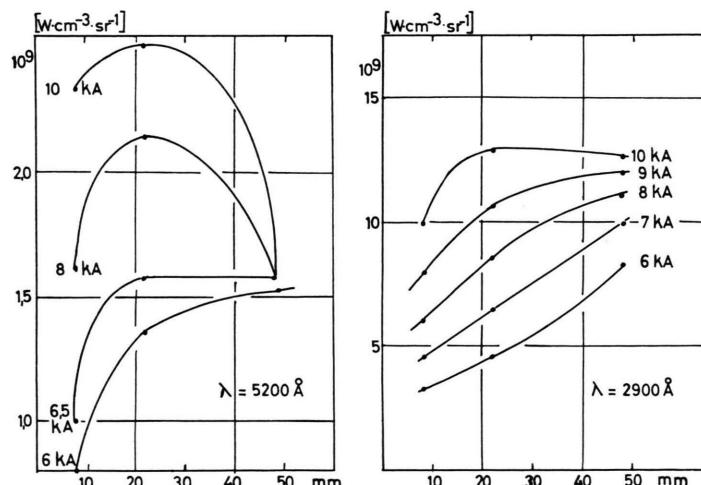


Abb. 6. Die Intensität der Impulslampen in Abhängigkeit von der Länge des gesamten Entladungskanals (entsprechend Länge der Kapillare und der Elektrodenbohrungen). Lampe 1: 48 mm; Lampe 2: 22 mm; Lampe 3: 8 mm. a) gemessen bei 5200 Å, b) gemessen bei 2900 Å.

erfolgt die Emission also aus optisch dicker Schicht. Das Absinken der Intensität bei großen Stromstärken und langen Entladungskanälen wird offenbar durch die schwarze Strahlung aus vorgelagerten kälteren Plasmaschichten in den relativ langen Elektrodenbohrungen hervorgerufen.

d) Zur Reproduzierbarkeit der Strahlung aus der Kapillare

Die wichtigste Forderung an eine Lichtquelle, die als Strahlungsnormal dienen soll, ist die Reproduzierbarkeit ihrer ausgesandten Strahlung. Im In-

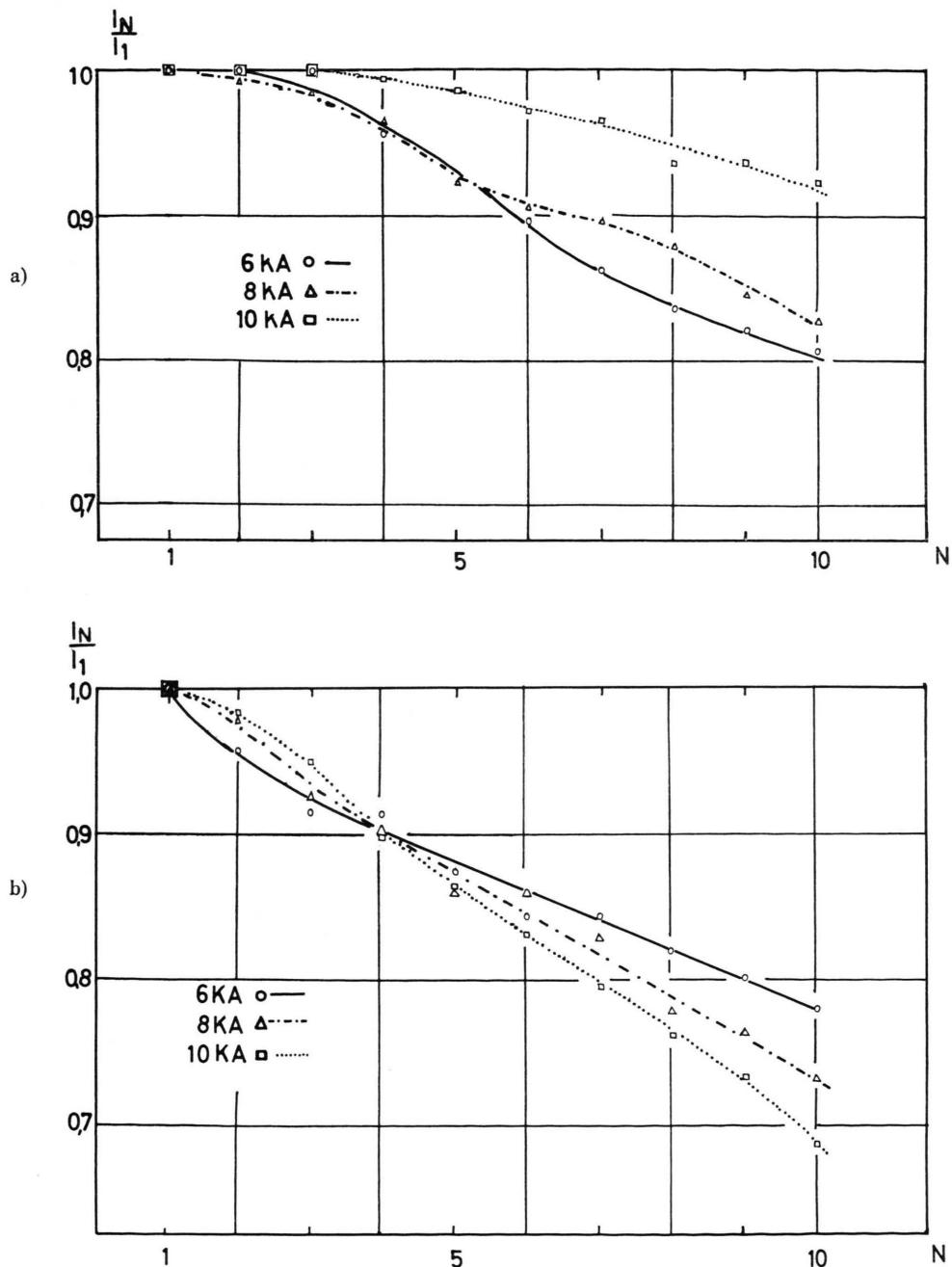


Abb. 7. Das Verhältnis der Intensität der N -ten Entladung zur ersten I_N/I_1 in Abhängigkeit von der Anzahl N der Entladungen (durch eine Kapillare). a) gemessen bei 4500 Å, b) gemessen bei 2800 Å.

teresse einfacher Handhabung ist ferner die Abweichung der Strahldichte mehrerer Entladungen durch dieselbe Kapillare als Funktion der Wellenlänge zu überprüfen, um daraus die zulässige Entladungszahl je Kapillare zu entnehmen. Messungen dieser Art wurden bei den Wellenlängen 4500 Å und 2800 Å durchgeführt. In den Abb. 7 a, b ist für diese Wellenlängen das Verhältnis der Intensität der N -ten Entladung zu der der ersten Entladung I_N/I_1 in Abhängigkeit von der Entladungszahl durch dieselbe Kapillare dargestellt. Aus dem stetigen Verlauf der Kurven erkennt man die unter konstanten Bedingungen außerordentlich gute Reproduzierbar-

keit der ausgesandten Strahlung. Hieraus und aus der Untersuchung von Entladungen durch jeweils neue Kapillaren ergab sich eine Reproduzierbarkeit von etwa 2%.

Dem Direktor des Instituts für Experimentalphysik der Universität Kiel, Herrn Prof. Dr. W. LOCHTE-HOLTGREVEN, danken wir für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Untersuchung. Der Bundesminister für Bildung und Wissenschaft förderte die Arbeit durch die Gewährung von Sachbeihilfen. Herr Dipl.-Phys. H. P. PRITSCHOW half bei der Ausführung einer Reihe von Messungen; auch ihm sei hierfür gedankt.

- ¹ N. N. OGURTSOVA u. J. V. PODMOSHENSKII, Opt. Spectr. **4**, 539 [1958].
- ² N. N. OGURTSOVA u. J. V. PODMOSHENSKII, Fiz. Problemy Spektr. **1**, 129 [1962].
- ³ N. N. OGURTSOVA, J. V. PODMOSHENSKII u. M. J. DEMIDOV, Optico Mekhan. Prom. No. **1**, 1 [1960].
- ⁴ N. N. OGURTSOVA, J. V. PODMOSHENSKII u. V. M. SHELEMINA, Opt. Spectr. **15**, 404 [1963].
- ⁵ N. N. OGURTSOVA, J. V. PODMOSHENSKII u. V. M. SHELEMINA, Opt. Spectr. **16**, 514 [1964].
- ⁶ J. C. DE VOS, Physica **20**, 690 [1954].
- ⁷ J. EULER, Ann. Phys. **11**, 203 [1953].
- ⁸ J. EULER, Ann. Phys. **14**, 145 [1954].
- ⁹ H. G. MCPHERSON, J. Opt. Soc. Amer. **30**, 189 [1940].
- ¹⁰ M. R. NULL u. W. W. LOZIER, J. Opt. Soc. Amer. **52**, 1156 [1962].
- ¹¹ J. P. MEHLTRETTNER, Dissertation, Heidelberg 1962.
- ¹² R. E. LARRABEE, J. Opt. Soc. Amer. **49**, 619 [1959].
- ¹³ H. MAGDEBURG u. U. SCHLEY, Z. Angew. Phys. **20**, 465 [1966].
- ¹⁴ H. MAGDEBURG, Z. Naturforsch. **20 a**, 980 [1965].
- ¹⁵ A. T. HATTENBURG, Appl. Opt. **6**, 95 [1967].
- ¹⁶ K. SCHURER, Appl. Opt. **7**, 461 [1968].
- ¹⁷ H. EDELS u. W. A. GAMBLING, Appl. Phys. **8**, 481 [1957].
- ¹⁸ W. HERMANN, Z. Naturforsch. **12 a**, 1006 [1957].
- ¹⁹ G. KORTÜM u. H. MAIER, Z. Naturforsch. **8 a**, 235 [1953].
- ²⁰ K. BISCHOFF, Z. Instrum. **69**, 143 [1961].
- ²¹ F. KARSTENSEN u. H. J. KUSCH, Z. Naturforsch. **24 a**, 1283 [1969].
- ²² H. KUNZ, Dissertation, Technische Hochschule Hannover 1967.
- ²³ B. J. COHEN, H. J. HÜBNER u. E. SUTTER, Meßtechnik **11**, 288 [1968].
- ²⁴ C. L. SANDERS, Appl. Opt. **1**, 207 [1962].
- ²⁵ R. W. ENGSTRÖM, J. Opt. Soc. Amer. **37**, 420 [1947].