

ABSCHLUßBERICHT

Förderkennzeichen: 13N7109/2

FORSCHERVERBUND: GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN
AN THERMISCH EMITTIERENDEN KATHODEN FÜR
GASENTLADUNGEN - TEILVORHABEN: UNTERSUCHUNG
DER SÄULENKONTRAKTION IM KATHODENNAHEN RAUM
VON ALKALI-HOCHDRUCKENTLADUNGEN

von

Dr. Manfred Kettlitz

Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik e.V.
an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald
Friedrich-Ludwig-Jahn-Straße 19
17489 Greifswald

Projektleiter: Dr. Manfred Kettlitz

Mitarbeiter: Dr. Ralf Wendt
Gabi Henkel
Ralf-Peter Mayer
Rico Großjohann

Greifswald, Mai 2000

INHALTSVERZEICHNIS

A) Kurzfassung der Vorhabensbeschreibung	2
B) Organisatorische Ereignisse	2
C) Wissenschaftliche Ergebnisse	4
Einleitung	4
Vorgehensweise	4
Experiment	9
Aufbau	9
Temperaturmessung am Brenner	11
Versuchslampen	12
Experimentelle Ergebnisse	16
Phänomenologie des Bogenansatzes	16
Plasmatemperatur im Kontraktionsbereich	21
Plasmatemperatur der Hg-Entladung	22
Plasmatemperatur der Na und NaHg-Entladung	25
Elektronendichteverteilung vor den Elektroden	31
Hot-Spot-Verhalten	32
Temperaturverhältnisse am Brenner	37
Feldstärkebestimmung aus der elektrischen Leitfähigkeit	38
Zusammenfassung	40
Literatur	41

A) KURZFASSUNG DER VORHABENS BESCHREIBUNG

Ziel der Untersuchungen des Teilvorhabens ist das qualitative Verständnis der physikalischen Prozesse, die im Übergangsbereich zwischen Kathode und homogenem Bogen von Alkali-Hochdruckentladungen stattfinden und verantwortlich für die Aufheizung und Erosion der Kathode sind. Um gesicherte Aussagen darüber treffen zu können, sind Kenntnisse über die räumliche Ausdehnung des Kontraktionsbereichs der Säule vor der Kathode, über den Energieeintrag vom homogenen Bogen, über die Teilchendichte- und die Temperaturverteilungen notwendig.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Untersuchungen war die Herstellung geeigneter Entladungsgefäße aus Saphir im INP sowie bei OSRAM und die Fertigung von speziellen Hg-Lampen aus Quarz bei OSRAM. Begonnen wurde mit der Herstellung von Natrium- und Natriumamalgam-Entladungsgefäßen im INP und Variationen der Elektrodenform. An diesen wurden elektrische und räumlich aufgelöste spektroskopische Messungen durchgeführt, um Aussagen über den Kathodenbereich zu erhalten. Unter verschiedenen Betriebsbedingungen wurden mit spektroskopischen Methoden die Temperaturverteilungen in diesem räumlich begrenzten Bereich der Entladung bestimmt.

B) ORGANISATORISCHE EREIGNISSE

Die für die Projektbearbeitung vorgesehene Wissenschaftlerstelle teilten sich Herr R. Mayer (4 Monate), R. Wendt (13 Monate) und R. Großjohann (19 Monate). Nach dem erfolgreichen Abschluß zum Meilenstein verließ Herr Dr. Wendt das INP Ende Juni 1998 und wechselte auf eine unbefristete Stelle zur ANTEC GmbH. Die Wissenschaftlerstelle wurde seit dem 01.07.1998 bis zum Projektende von Herrn Großjohann besetzt. Die für das Teilvorhaben notwendigen Saphirbrenner wurden von Frau Henkel gefüllt, die 3 Monate aus Projektmitteln und später aus Hausmitteln des INP bezahlt wurde.

Die Ergebnisse der laufenden Untersuchungen wurden halbjährlich auf Projekttreffen in Hannover bzw. Bochum vorgestellt, auf dem Meilensteintreffen im Juni 1998 wurde nach erfolgreicher Repräsentation die Fortsetzung des Themas beschlossen.

In Form von Postern und Beiträgen wurden die aktuellen Ergebnisse auf nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt. Jährlich wurde die DPG Frühjahrstagung [1-3] besucht, 1998 die LS-8 in Greifswald [4], 1999 die ICPIG in Warschau [5] und die GEC in Norfolk [6]. Auf diesen internationalen Veranstaltungen der Plasmaphysik und Lichttechnologie fand ein Ergebnis- und Erfahrungsaustausch mit den auf dem Gebiet der Lampen arbeitenden Kollegen statt. Die dort erfolgte Repräsentation der Ergebnisse fand großen Anklang bei den Fachkollegen und kann als positiv eingeschätzt werden. Zur LS-8 wurden in einem von Prof. Böttcher organisierten Workshop zu Elektrodenproblemen die Ergebnisse und Probleme dargestellt und diskutiert. Während einer Institutsbesichtigung während der LS-8 hatten wir die Möglichkeit, interessierten Fachkollegen unsere Experimente vorzustellen.

Weiterhin wurden die erzielten Ergebnisse als Vorträge im Institutskolloquium des INP und zu Abteilungskolloquien präsentiert.

Zu Vorträgen ins INP sind die Kollegen Luhmann, Nandelstädt und Schmitz von der RU Bochum, Prof. Jüttner von der HU Berlin, Prof. Kock von der Uni Hannover, Dr. Adler von OSRAM/Sylvania und Herr Hartmann von OSRAM Berlin eingeladen worden, die ihre interessanten Ergebnisse im Rahmen einer gemeinsamen Vortragsreihe des INP mit der EMAU Greifswald vorstellten.

Regelmäßige Arbeitsbesuche bei OSRAM Berlin und bei der Projektgruppe von Prof. Jüttner an der HU Berlin wurden zwischen den Projekttreffen durchgeführt. Die Treffen dienten dem Erfahrungsaustausch, der Abstimmung der aktuellen Meßaufgaben und dem Austausch von Meßtechnik. Dankenswerterweise wurden Zubehöerteile zur Herstellung von Brennern von OSRAM zur Verfügung gestellt. Außerdem konnten im Dezember 1998 und im Sommer 1999 in Berlin erfolgreich Saphirbrenner hergestellt werden. Diese unterscheiden sich in der Geometrie von den in Greifswald hergestellten und entsprechen in ihrer Form den industriell verwendeten Na-Hochdrucklampen. Andererseits sind über den Eigenbedarf hinaus Entladungsgefäße für die Untersuchungen von Mikrosports für die Projektgruppen in Berlin und Chemnitz hergestellt worden.

Für Arbeiten, die weder im eigenen Hause noch bei anderen Projektpartnern durchgeführt werden konnten, sind Werkverträge abgeschlossen worden. Das betraf das Anfertigen von Titanringen (notw. für das Einlöten von Wolframelektroden in die Niobverschlußstücke) an der TFH Wildau und die Fertigung von in der Brennerherstellung benötigten Spezialteilen in der PREVAC GmbH Berlin.

C) WISSENSCHAFTLICHE ERGEBNISSE

EINLEITUNG

Durch die Herstellung von Versuchsbrennern aus Saphir und deren Füllung mit Natrium und Natriumamalgam sind die wesentlichen Voraussetzungen für die Themenbearbeitung geschaffen worden. Die experimentellen Voraussetzungen für die spektroskopischen Messungen wurden durch Kauf eines Meßsystems geschaffen. Dieses besteht aus einem 1-m-Spektrographen AM 510 (Sopra GmbH) mit angeschlossener CCD-Slow-scan-Kamera (Proscan GmbH). Nach umfangreichen Versuchen zur Variation der Elektrodenform wurde an den gefertigten Na-Versuchslampen mit der Aufnahme von absoluten Strahldichteverteilungen des Plasmas vor den Elektroden begonnen. Parallel dazu sind Programme zur Auswertung der Meßdaten, zum Strahlungstransport und der Bestimmung der Plasmatemperatur erarbeitet worden.

Aus den aufgenommenen Flächenstrahldichten wurden Temperaturprofile und Elektronendichteverteilungen berechnet. Neben reinen Natriumentladungen wurden Natriumamalgamentladungen untersucht, die nach der anfänglichen Gleichspannungsversorgung dann entsprechend mit einer Rechteck- sowie Sinusspannung betrieben wurden. Zusätzlich wurden Hg-Lampen untersucht.

VORGEHENSWEISE

Anknüpfend an den 1. und 2. Zwischenbericht 1998/99 [7, 8] soll hier kurz auf die verwendeten Methoden zur Bestimmung von Druck, Temperatur und Teilchendichten eingegangen werden. Der experimentelle Aufbau ermöglicht die Messung der (spektral und absolut kalibrierten) Flächenstrahldichte $L(y)$ der Versuchslampen in spektraler und örtlicher Auflösung (s. Abb. 1). Hierbei ist x die Ortskoordinate in Beobachtungsrichtung. Die Ortskoordinate y verläuft senkrecht zur Beobachtungsrichtung und senkrecht zur Brennerachse. Die Grenzen sind durch die Lage der Innenwand des Saphirrohres gegeben, welche sich im Abstand R vom Zentrum des Koordinatensystems befindet.

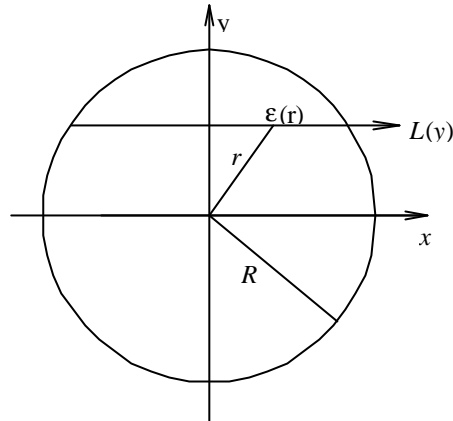


Abb. 1: Schnitt durch ein zylindersymmetrisches Plasma.

Aus der gemessenen Flächenstrahlungsintensität muß die Volumenstrahlungsintensität (Emissionskoeffizient) \mathbf{e} berechnet werden, aus der dann die Plasmaparameter ermittelt werden können. In einem optisch dünnen, zylindersymmetrischen Plasma mit dem Radius R ist der Emissionskoeffizient über die Abel'sche Integralgleichung mit der Flächenstrahlungsintensität verknüpft [9]:

$$L(y) = 2 \int_y^R \frac{\mathbf{e}(r)}{\sqrt{r^2 - y^2}} r dr. \quad (1)$$

$L(y)$ wird im Abstand y zur Entladungsachse beobachtet und $\mathbf{e}(r)$ hängt nur von r ab. Diese Gleichung kann analytisch invertiert werden (Abel-Inversion) [9, 10]:

$$\mathbf{e}(r) = -\frac{1}{\mathbf{P}} \int_r^R \frac{dL(y)}{dy} \cdot \frac{1}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy. \quad (2)$$

Aus dem Emissionskoeffizienten lassen sich dann Plasmaparameter berechnen. Für die Bestimmung der Plasmatemperatur durch Emissionsspektroskopie wurden folgende Methoden verwendet:

A) Aus absolut gemessenen side-on Strahlungsintensitäten einer optisch dünnen Spektrallinie wird nach Abel-Inversion die Volumenstrahlungsintensität berechnet. LTE vorausgesetzt und unter Kenntnis des Partialdruckes läßt sich das Plasmatemperaturprofil dann iterativ aus der Volumenstrahlungsintensität berechnen:

$$\mathbf{e}_{ki} = \frac{1}{4\mathbf{p}} \frac{hc}{\mathbf{l}} A_{ki} n_k \quad (3)$$

$$n_k = n_0 \frac{g_k}{Q} A_{ki} \exp\left(-\frac{E_k}{kT(r)}\right) \quad (4)$$

$$p = nkT \quad (5)$$

$$\mathbf{e}_{ki} = \frac{1}{4\mathbf{p}} \frac{hc}{\mathbf{l}} \frac{p}{kT(r)} \frac{g_k}{Q} A_{ki} \exp\left(-\frac{E_k}{kT(r)}\right) \quad (6)$$

\mathbf{e}_{ki} - Emissionskoeffizient, h - Planck-Konstante, c - Lichtgeschwindigkeit, λ - Wellenlänge, T - Temperatur, g_k - statistisches Gewicht des oberen Niveaus, A_{ki} - Übergangswahrscheinlichkeit, E_k - Anregungsenergie des oberen Niveaus, Q - atomare Zustandssumme, k - Boltzmann-Konstante.

Für alle Na-Lampen wurden die Linien Na I 497,9/498,3 nm und Na I 514,9/515,3 nm verwendet, für die NaHg-Lampen zusätzlich die Hg I 435,8 nm, Hg I 546,1 nm und für die reinen Hg-Lampen die Hg I 577,0/579,1 nm (s. Tab. 1 + 2). Daraus wurden dann die radialen Temperaturprofile der Plasmen bestimmt.

Der Natriumpartialdruck wurde sowohl aus Strahlungstransportrechnungen der Na-Resonanzlinien als auch aus dem Wellenlängenabstand $\Delta\lambda$ der Maxima der selbstumgekehrten Natrium D-Linien berechnet. Da beide Methoden das gleiche Ergebnis lieferten, wurde später dann der Na-Partialdruck nur noch aus dem Kuppenabstand der Na D-Linien bestimmt. Nach de Groot [11] läßt sich dafür folgende Beziehung verwenden:

$$p = \frac{2.7 \pm 0.5}{\sqrt{R}} \Delta\mathbf{l}, \quad (7)$$

wobei der Natriumdampfdruck in kPa, R der Rohrradius in mm und $\Delta\lambda$ in nm anzugeben ist.

Der Hg-Partialdruck für die Natriumamalgam-Entladungen wurde aus dem Na-Partialdruck unter Kenntnis der Einfüllmenge von NaHg berechnet [12].

Der Druck in den reinen Hg-Entladungen wurde aus der eingefüllten (vollständig verdampften) Hg-Menge, der gemessenen Wandtemperatur und dem Bogentemperaturprofil abgeschätzt.

B) Für Plasmen größerer Dichte wurde die Temperatur aus den Intensitäten der Umkehrkuppen einer selbstabsorbierten Spektrallinie berechnet. Diese Intensität ist ein empfindliches Maß für die maximale Temperatur auf dem durchstrahlten optischen Weg und kann einfach unter Zuhilfenahme eines Korrekturfaktors aus der Planck-Funktion B_I berechnet werden:

$$L_m = C_B B_I(T_m) \quad (8)$$

C_B ist die Bartels-Konstante nach de Groot [13].

$$B_I(T) = \frac{2hc^2}{I^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{IkT}\right) - 1} \quad (9)$$

$$T_m = \frac{hc}{Ik} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{2hc^2 C_B}{I L_m} + 1\right)} \quad (10)$$

Benutzt wurden die im nahen infraroten Spektralbereich liegenden Na I 818,4/819,5 nm. Mit dieser Methode wurden vorzugsweise axiale Temperaturprofile in der Lampenachse bestimmt.

Die Bestimmung der Temperaturen an den Versuchslampen (Rohrwand, Kappe, elektrische Zuleitungen) erfolgte mit Hilfe von Thermoelementen und Pyrometern, die der Elektroden mit Pyrometern.

Tabelle 1: Atomare Daten wichtiger Übergänge im Natrium [14].

Übergang	λ (nm)	g_i	g_k	E_i (eV)	E_k (eV)	A_{ki} (10^8 s^{-1})	f_{ik}
$3^2P_{1/2}-5^2D_{3/2}$	497,85	2	4	2,10	4,59	0,0418	0,0311
$3^2P_{3/2}-5^2D_{5/2}$	498,28	4	6	2,10	4,59	0,050	0,0280
$3^2P_{1/2}-6^2S_{1/2}$	514,88	2	2	2,10	4,51	0,0110	0,00437
$3^2P_{3/2}-6^2S_{1/2}$	515,34	4	2	2,10	4,51	0,0220	0,00437
$3^2P_{1/2}-5^2D_{3/2}$	818,33	2	4	2,10	3,62	0,413	0,830
$3^2P_{3/2}-5^2D_{5/2}$	819,48	4	6	2,10	3,62	0,495	0,750

Tabelle 2: Atomare Daten wichtiger Übergänge im Quecksilber [15].

Übergang	λ (nm)	g_i	g_k	E_i (eV)	E_k (eV)	$g_k A_{ki}$ (10^8 s^{-1})
$7^3S^1-6^3P_1$	435,83	3	3	4,89	7,73	1,671
$7^3S_1-6^3P_2$	546,07	3	3	5,46	7,73	1,461
$6^3D_2-6^1P_1$	576,96	5	5	6,70	8,85	1,18
$6^1D_2-6^1P_1$	579,07	5	5	6,70	8,84	1,07

Die Berechnung der Teilchendichten erfolgte aus der Saha-Gleichung:

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = \frac{2Q_i}{Q} \left(\frac{2\mathbf{p}n_e k}{h^2} \right)^{3/2} T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_i - \Delta E_i}{kT}\right), \quad (11)$$

unter Berücksichtigung der Erniedrigung der Ionisierungsenergie nach Ecker/Kröll:

$$\Delta E_i = 1,4 \frac{e^2}{\mathbf{I}_D} \quad (12)$$

$$\text{mit } \mathbf{I}_D = \sqrt{\frac{kT}{4\mathbf{p}e^2(n_e + n_i)}} = 4,879 \sqrt{\frac{T}{n_e}} \quad [cm] \quad (13)$$

$$\text{und } p = (n_a + 2n_e)kT. \quad (14)$$

Zur Bestimmung der elektrischen Feldstärke E in der Entladung an verschiedenen Abständen zu den Elektroden wurde der Versuch unternommen, diese aus dem Gesamtstrom der Entladung und aus der elektrischen Leitfähigkeit zu berechnen. Der Gesamtstrom ergibt sich wie folgt:

$$I = 2\mathbf{p}E \int_0^R \mathbf{s}(r, T) r dr \quad (15)$$

Die elektrische Leitfähigkeit ist druck- und temperaturabhängig und wird aus den gemessenen Temperaturprofilen berechnet.

EXPERIMENT

Aufbau

Der experimentelle Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Aufgrund der Versprödung der Niobverschlußkappen bei hohen Temperaturen an Luft müssen die Versuchsbrenner unter Vakuum betrieben werden. Das Vakuumgefäß besteht aus einem Glaszylinder, auf den zur besseren Strahlungsauskopplung plane Quarz-, Saphir- bzw. Zinkselenidfenster aufgeschmolzen sind. Der Brenner wird von einem mechanischen Gestellaufbau gehalten und über diesen mit elektrischer Energie versorgt. Zur Bestimmung der Temperaturen der Niobkappe sowie der Stromzuführung sind an diesen Stellen z.T. Thermoelemente angebracht.

Die Versuchsbrenner sind sowohl mit Gleich- als auch Wechselspannung betrieben worden. Die elektrische Beschaltung mit verschiedenen Generatoren und die Registrierung der Signale sind

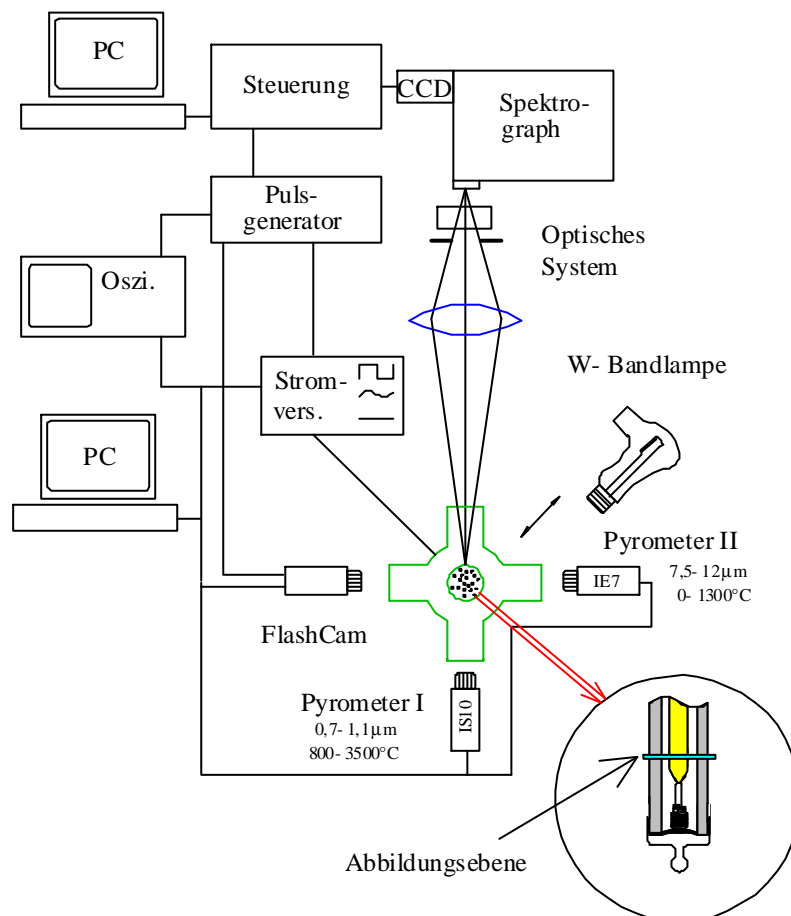


Abb. 2: Experimenteller Aufbau.

in Abbildung 3 dargestellt. Durch das Zünden des mit Argon gefüllten Brenners und der Ausbildung einer Glimmentladung verdampft das Natrium und sorgt für das Entstehen eines stabil brennenden Bogens. Alkali-Entladungslampen arbeiten mit gesättigtem Dampfdruck, d.h. bei nicht vollständig verdampftem Alkalimetall. Der Dampfdruck wird von der Temperatur bestimmt, die sich während des Betriebs an der kältesten Stelle der Lampe einstellt. Dieser Bereich liegt zwischen der Elektrodenspitze und dem Verschlußstück.

Die Bestimmung der Plasmaparameter, wie Temperatur und Druck, erfolgt durch Aufzeichnung und Auswertung der vom Plasma emittierten Strahlung. Die für die Spektralmessungen benutzten optischen Meßaufbauten sind in Abbildung 2 dargestellt. Das Meßsystem befindet sich auf einem optischen Tisch und besteht aus einem Spektrographen mit angeschlossener Empfänger (CCD-Kamera), der Versuchslampe, einer Wolframbandlampe zur Intensitätskalibrierung, Referenzlampen zur Wellenlängenkalibrierung sowie einem optischen

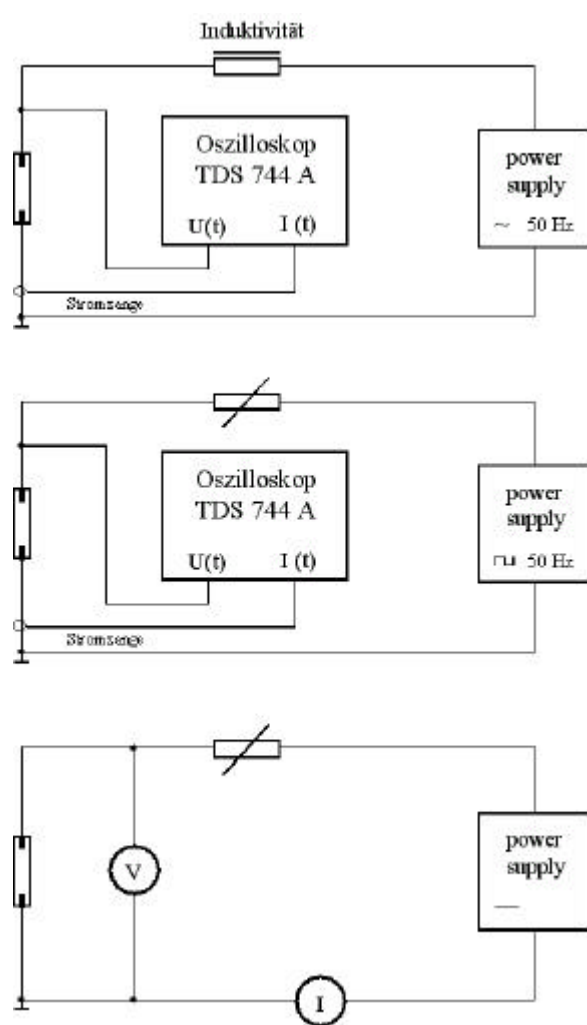


Abb. 3: Elektrische Beschaltung für den Betrieb der Lampen mit Wechselspannung (NaHg, Hg), Rechteck- (Na, NaHg) und Gleichspannung (Na).

Abbildungssystem. Über das optische System wird die Strahlung der Lampe auf den Eintrittsspalt des Spektrographen abgebildet. Blenden und Filterkombinationen aus Grau- und Kantenfiltern dienen zur Strahlungsanpassung.

Zur spektralen Zerlegung der Strahlung wird ein 1-Meter-Spektrograph (AM 510; Sopra GmbH) mit verschiedenen Gittern benutzt. Mit Hilfe eines Dove-Prismas vor dem Eintrittsspalt des AM 510 kann der abgebildete Elektrodenbereich gedreht werden, so daß man wahlweise einen Schnitt in axialer Richtung oder quer zur Brennerachse aus dem Plasma auf den Spalt erhält. Dadurch mißt man auf der CCD Intensitätsverteilungen entweder von der Elektrode in Richtung homogenes Plasma (wichtig für die Diagnostik mit der Na I 819 nm) oder vor der Elektrode von Rohrwand zu Rohrwand (Na I 498 nm).

Außerdem wird mit einer extern triggerbaren Videokamera (FlashCam; PCO) das Kathodengebiet im sichtbaren Spektralbereich beobachtet. Damit wird der Ansatzpunkt des Brennflecks auf der Kathode und die räumliche Ausdehnung des Plasmas vor der Kathode beobachtet.

Temperaturmessung am Brenner

Für die Berechnung des Wärmehaushaltes der Entladung und die Überprüfung von Modellen ist die genaue Kenntnis von Temperaturen an verschiedenen Orten im Brenner, an seinen Kontaktpunkten und in der Entladung von Bedeutung. Neben den Temperaturmessungen mit Thermoelementen sind auch berührungslose Temperaturmessungen durchgeführt worden. Dazu dienen verschiedene Pyrometer. Zur Bestimmung der relativ hohen Temperatur der Wolframelektroden wird, wie auch in anderen Projektgruppen, ein IS10 (IMPAC Elektronik) verwendet. Der Sondermeßbereich von 800 bis 3500 °C sowie der kleine Meßfleck mit einem Durchmesser von 0,3 mm sind auf unsere Meßaufgaben zugeschnitten. Das IS10 arbeitet bei einer Wellenlänge zwischen 0,7 und 1,1 μm . Durch eine relativ kurze Abtastzeit (> 1 ms) lassen sich auch langsame Abklingvorgänge über eine Schnittstelle aufzeichnen.

Als problematisch erweist sich jedoch das Überlappen des Meßbereichs des Pyrometers mit der Abstrahlung durch ein Na-Plasma (s. 2. Zwischenbericht 1999). In den Empfangsbereich des IS10 fallen sowohl der rote Flügel der Na-D-Linie als auch die Na I 819 nm. Selbst wenn der relativ kleine Meßfleck des Pyrometers von der Elektrodenspitze (und somit vom Plasma) weg gerichtet wird, muß man mit einem Überstrahlen des Meßsignals vom Wolframstift und somit

einer Verfälschung rechnen. Dieses Problem wurde mit den OSRAM-Kollegen in Berlin und München diskutiert. Herr Hartmann hat sich in Berlin den verschiedenen Lösungsansätzen gewidmet und favorisiert Temperaturmessungen bei Wellenlängen oberhalb 1 μm entweder mit einem konventionellen Pyrometer (IGA100) oder mit einer kombinierten Anordnung von einem Spektrographen zur Wellenlängenselektion mit angeschlossener IR-empfindlicher CCD-Kamera oder Photodiode. Wir sind dazu übergegangen mit einem IGA100 zu arbeiten.

Die Temperatur der etwas kälteren Verschlusskappen läßt sich auch mit einem IGA100 (IMPAC Elektronik) registrieren. Dieses arbeitet zwischen 1,45 und 1,8 μm und ist für einen Temperaturbereich von 300 - 1800 $^{\circ}\text{C}$ konzipiert.

Um die Temperatur des Saphirrohres berührungslos messen zu können, muß man zu höheren Wellenlängen übergehen. Bis ca. 6 μm ist Saphir noch optisch durchlässig und wirkt erst oberhalb 7 μm als Planck'scher Strahler. Der Empfänger muß also in diesem Bereich empfindlich sein, um die Oberflächentemperatur der Saphirrohrwand bestimmen zu können. Das IE7 (IMPAC Elektronik) arbeitet im Spektralbereich von 7,5 bis 12 μm und hat einen Meßbereich von 0 bis 1300 $^{\circ}\text{C}$. Das hat Konsequenzen für die Strahlungsauskopplung aus dem Vakuumgefäß. Da Quarz und auch Saphir in diesem Wellenlängenbereich nicht transparent sind, muß mit Zinkselenid ein Infrarotfenster für diese Messungen verwendet werden.

Versuchslampen

Die in den Experimenten verwendeten Versuchslampen sind in Tabelle 3 aufgelistet. Auf die Herstellung und Präparation von Versuchsbrennern aus Saphir soll hier nicht näher eingegangen werden, da dies ausführlich im 1. Zwischenbericht [7] erläutert wurde.

Abbildung 4 zeigt eine der verwendeten Quecksilber-Lampen. Der Quarzkolben hat einen Innendurchmesser von 16,7 mm und der Elektrodenabstand beträgt 16,3 mm. Die Wolframelektroden haben einen Stiftdurchmesser von 0,48 mm und sind damit nur ca. halb so groß wie die in den Alkalilampen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Hg-Lampen sind zur besseren Beobachtung des elektrodennahen Raumes die Elektroden verlängert worden, so daß die Elektrodenspitze außerhalb des konischen Bereiches der Rohrwand liegt.

In Abbildung 5 sind die verwendeten Alkalilampen dargestellt. Im linken Teil ist die INP-Bauform und im rechten die von OSRAM zu sehen. Die Unterschiede liegen in der

Verschlußtechnik. Bei der OSRAM-Lampe ist die Elektrode an einem Niobrohr angebracht, das sich in einem Keramikstopfen befindet. Dieser Teil wird dann an das Entladungsrohr (in unserem Fall Saphir) geschmolzen. Bei der INP-Lampe befindet sich die Elektrode in einer Niobkappe, die direkt an das Saphirrohr angeschmolzen wird und an unterschiedliche Rohrdurchmesser angepaßt werden kann. Die Toträume im Entladungsraum sind bei der OSRAM-Bauform etwas größer.

Tabelle 3: Versuchslampen und deren Parameter.

Füllung	Hersteller	Gefaßmaterial	Elektrode	Betriebsweise	Leistung	Bogenansatz
Na	INP / OSRAM	Saphir $\varnothing = 3,9/$ 4,8 mm	W; $\varnothing =$ 0,7/ 0,9 mm	Gleichspannung; Rechteck 50 Hz	35- 100 W	diffus
NaHg	INP / OSRAM	Saphir $\varnothing = 3,9/$ 4,8 mm	W; $\varnothing =$ 0,7/ 0,9 mm	Sinus; Rechteck 50 Hz	35- 100 W	diffus
Hg	OSRAM	Quarz $\varnothing = 16$ mm	W; $\varnothing =$ 0,48 mm	Sinus 50 Hz	150 W	kontrahiert

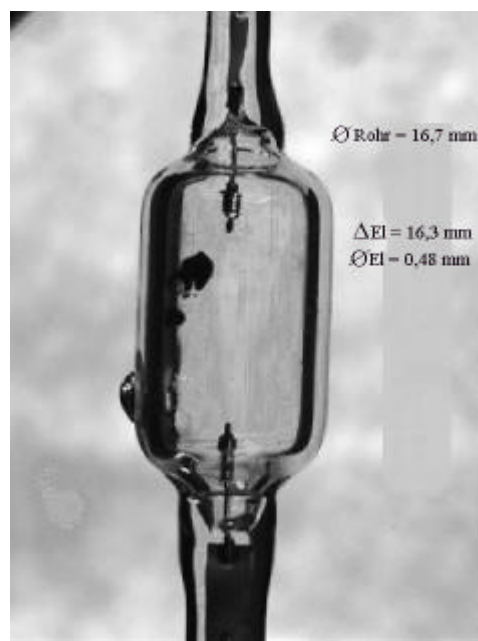


Abb. 4: Quecksilberlampe 150 W.

Na-Lampe

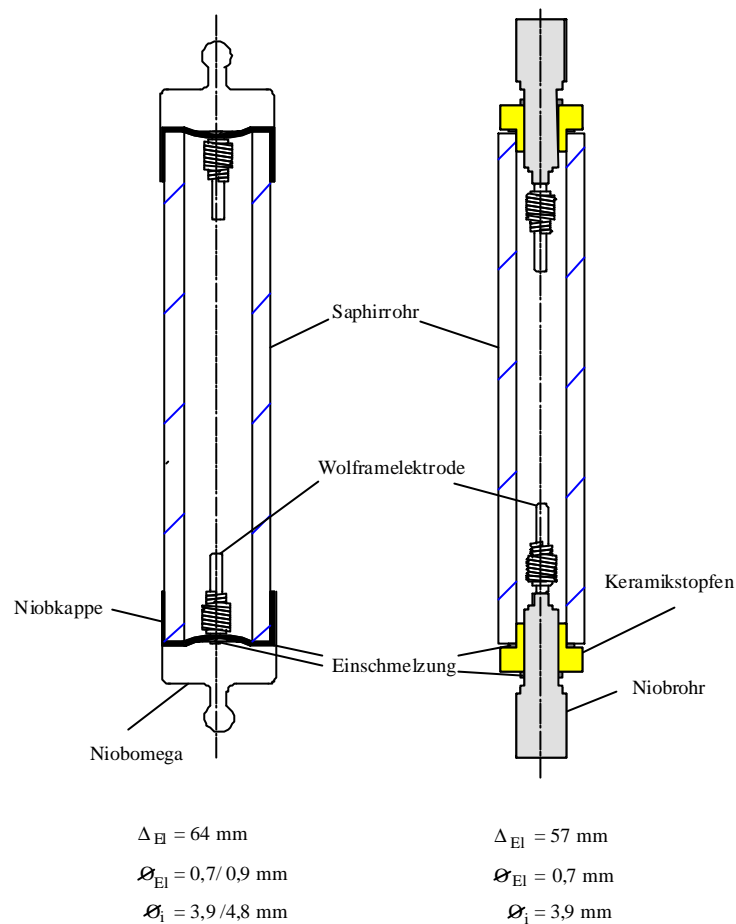
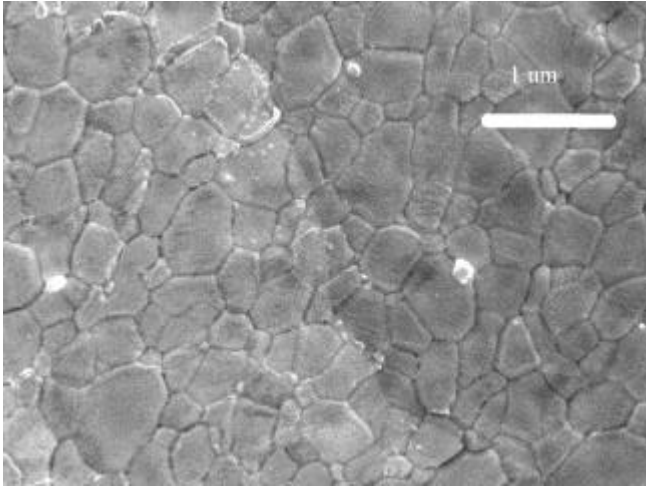
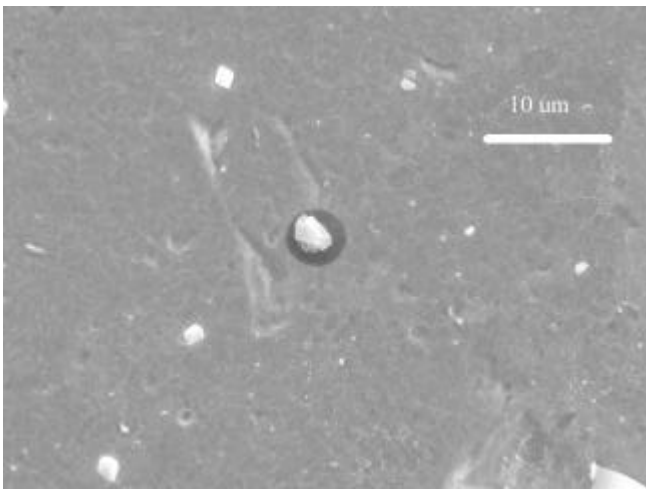


Abb. 5: Natriumlampen verschiedener Bauform (links INP, rechts OSRAM)

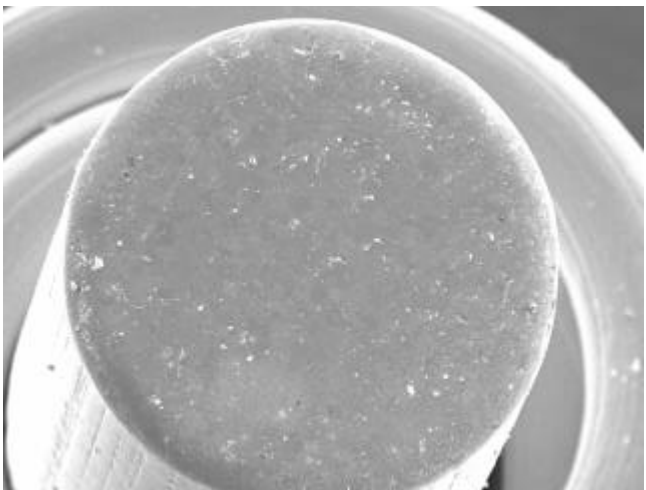
Abbildung 6 zeigt Rasterelektronenmikroskopaufnahmen einer reinen Wolframelektrode (70 W) für verschiedene Vergrößerungen. In der unteren Aufnahme ist die an den Seiten leicht angerundete Stirnfläche des Elektrodenstifts zu sehen und im Hintergrund der Wickelkörper der dünneren Wolframwendel. Bei stärkerer Vergrößerung erkennt man Partikel auf der Oberfläche, die kleiner als $10 \mu\text{m}$ sind und im oberen Bild dann die Sinterstruktur des Wolframs mit Korngrößen kleiner als $1 \mu\text{m}$.



Maßstab: 1:10 000



1:2 500



1:150

Abb. 6: Elektronenmikroskopaufnahme einer 70W-Wolframelektrode.

EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

Phänomenologie des Bogenansatzes

Na-Hochdruckentladungen werden gewöhnlich mit Wechselspannung betrieben, um u.a. die Elektroden gleichmäßig zu belasten, Entmischungserscheinungen im Plasma durch Kataphorese zu vermeiden und z.B. auch störungsfrei an das 50 Hz Versorgungsnetz angeschlossen werden zu können. Das Strom-Spannungs-Diagramm für einen 50 Hz Betrieb einer Natriumamalgam-Hochdrucklampe ist in Abbildung 7 dargestellt. Während der Entladungsstrom annähernd der angelegten sinusförmigen Netzspannung folgt, zeigt sich in der Spannungscharakteristik der Einfluß des Plasmas mit einem erhöhten Spannungsbedarf nach dem Stromnulldurchgang und einem relativ konstanten Spannungsverlauf auch bei fallendem Strom. Außerdem ist die Beobachtungszeit der CCD im Strommaximum eingezeichnet.

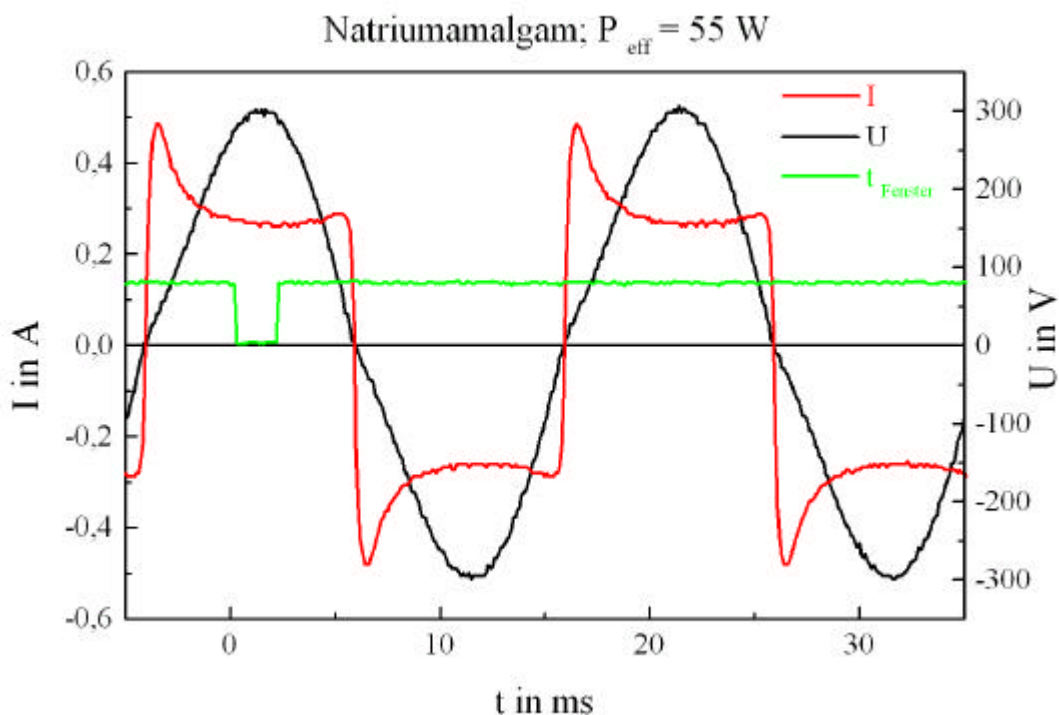


Abb. 7: Strom-Spannungs-Diagramm für eine mit 50 Hz Netzspannung betriebene NaHg-Entladung.

Die mit 50 Hz Rechteckspannung betriebenen Entladungen stellen zwei, sich nur in der Polarität unterscheidende, Gleichspannungsentladungen mit kleinen Wiederzündspitzen nach den Stromnulldurchgängen dar und lassen eine Beobachtung von Kathoden- und Anodenphase bei Ansicht nur einer Elektrode zu.

Beobachtet man mit einer Kamera eine Elektrode einer mit 50 Hz Wechselspannung betriebenen Hg-Entladung zu verschiedenen Entladungszeiten nach dem jeweiligen Stromnulldurchgang, so findet man das in Abbildung 8 gezeigte Verhalten. Im Stromnulldurchgang der beginnenden Anodenphase (links oben) sieht man noch den „Rest“ des Stromansatzes aus der Kathodenphase als hellen Fleck an der Oberseite der Elektroden-

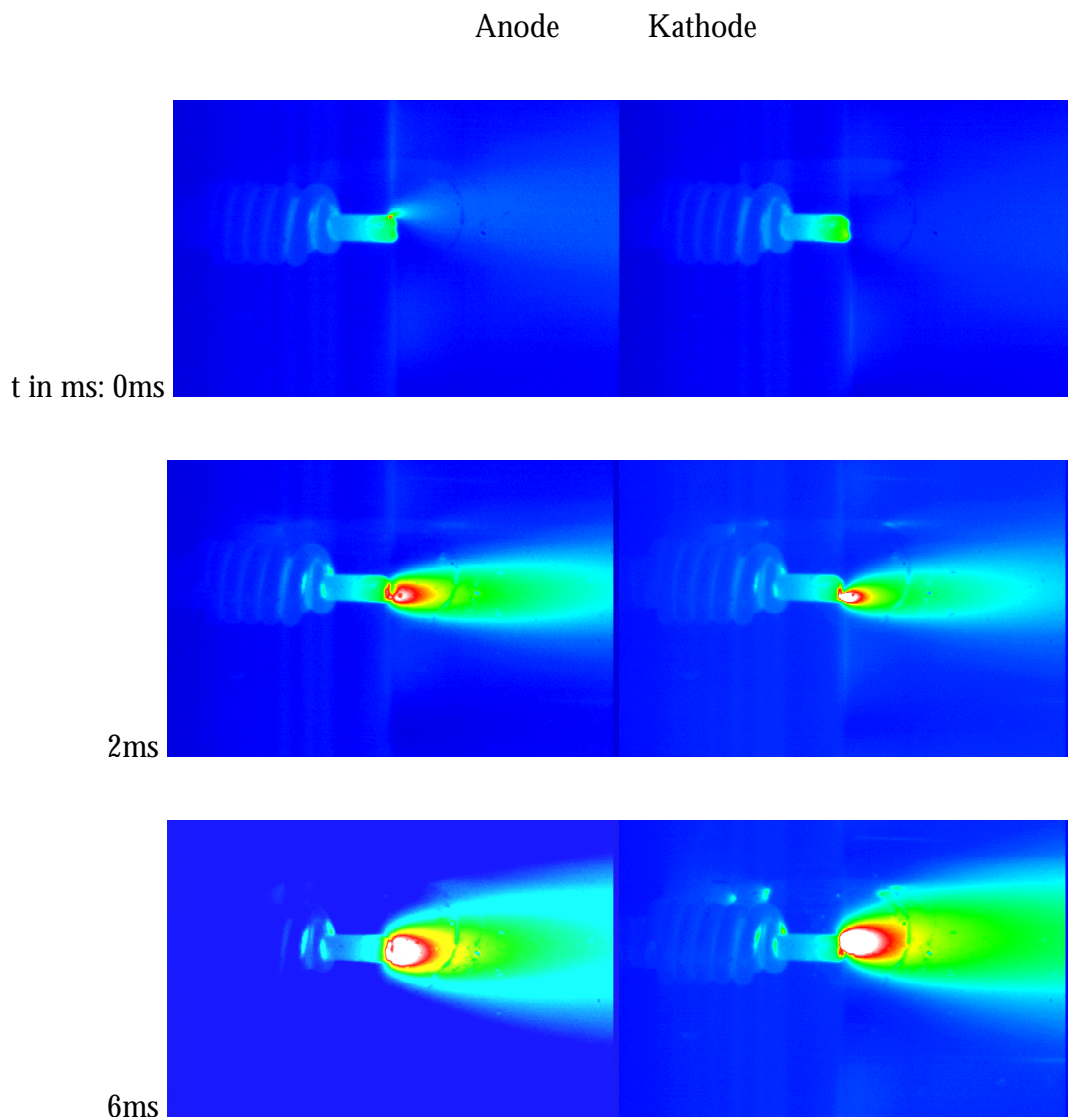


Abb. 8: Bogenansatz in einer Hg-Lampe.

spitze. Im weiteren Verlauf der Anodenphase findet man einen kontrahierten Bogenansatz auf der Elektrodenspitze mit deutlich höherer Intensität vor der Anode als in der positiven Säule. In der Kathodenphase (rechter Teil) ist ebenso ein Spotansatz zu sehen, der jedoch noch stärker kontrahiert ist als in der Anodenphase und häufig am Rand der Elektrodenspitze ansetzt. Auch hier ist eine starke Intensitätserhöhung unmittelbar vor der Elektrode zu beobachten, die auf eine deutliche Temperaturerhöhung im Plasma hindeutet.

Na- und NaHg-Hochdruckentladung verhalten sich ähnlich, unterscheiden sich im Bogenansatz auf der Elektrode aber von der Hg-Entladung. Abbildung 9 zeigt dieses Verhalten zu verschiedenen Entladungszeiten. Man kann deutlich die Arbeitsweise der Elektrode einmal als Kathode und dann als Anode erkennen. In der Anodenphase findet man einen Bogenansatz auf der Elektrodenspitze und das Plasma kontrahiert erst kurz vor der

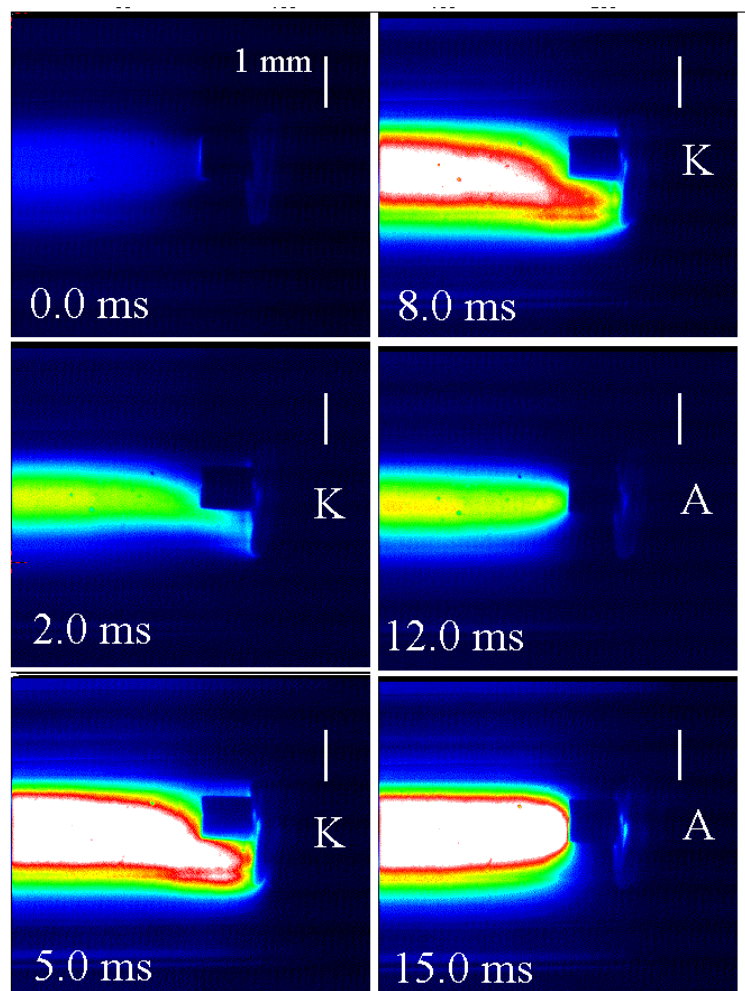


Abb. 9: Bogenansatz in einer konventionellen Na-Lampe.

Elektrodenoberfläche, aber nicht so stark wie beim Quecksilber. In der Kathodenphase setzt der Bogen, anders als bei der reinen Hg-Entladung, seitlich an der Wendel an, die um den Elektrodenstift gewickelt ist.

Dieses Verhalten des Bogenansatzes auf in herkömmlichen Lampen verwendeten Elektroden läßt keine optische Diagnostik des Kathodenplasmas zu. Voraussetzung für die Auswertung der Messungen ist ein zylindersymmetrisches Plasma, daß man senkrecht zur Entladungsachse beobachten kann. Es wurden sowohl Variationen der Elektrodenform als auch des Elektrodenmaterials vorgenommen, um einen Bogenansatz auf der Kathodenspitze zu erzwingen [7]. Eine den meßtechnischen Erfordernissen genügende Lösung ergab sich durch Verwenden von um 180° gedreht eingebauten Standard-Wolframelektroden.

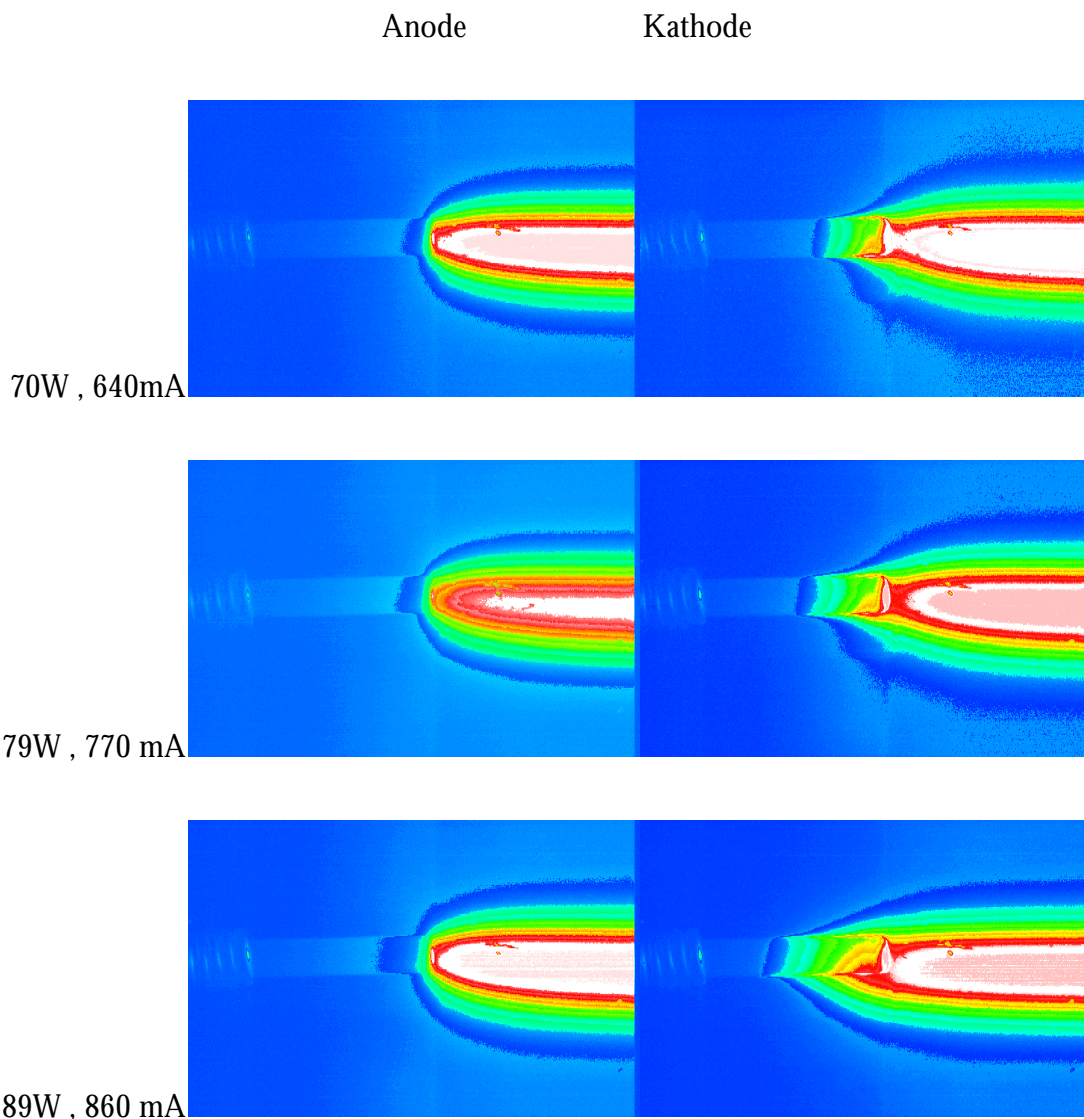


Abb. 10: Bogenansatz in einer Na-Lampe ($p_{\text{Na}} = \text{const.} = 26 \text{ kPa}$)

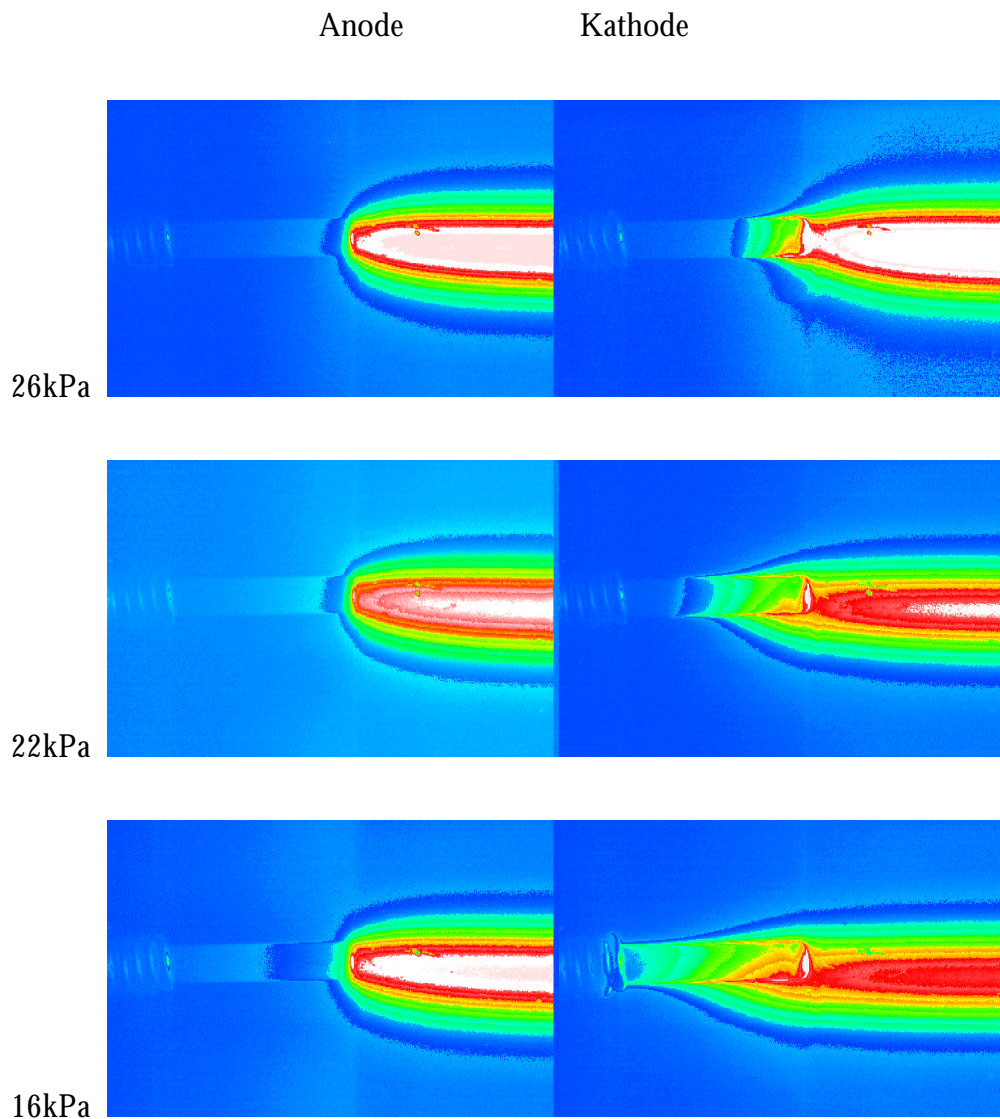


Abb. 11: Ansicht einer Elektrode in einer mit Rechteckspannung betriebenen Na-Hochdruckentladung im Strommaximum (A - Anodenphase, K - Kathodenphase). Bogenansatz in einer Na-Lampe ($P = \text{const.} = 70 \text{ W}$)

Man hat so plasmaseitig einen relativ langen Elektrodenstift, der im Falle der OSRAM-Elektroden in einer leichten Rundung endet. Auf der in dieser Art eingelöteten Elektrode hat man einen Kathodenansatz auf der Elektrodenspitze, den man gut beobachten kann.

Abbildungen 10 und 11 zeigen exemplarisch verschiedene Ansatzformen von Na-Hochdruckentladungen auf der Elektrode. In Abb. 10 ist der Bogenansatz bei unterschiedlichen Leistungen für konstanten Druck dargestellt, wohingegen Abb. 11 den Bogenansatz für konstant gehaltene Leistung und variablen Entladungsdruck verdeutlicht. Die Entladungen

verhalten sich ähnlich, d.h. in der Anodenphase endet der Bogen über einen Kontraktionsbereich auf der Elektrodenspitze, während er in der Kathodenphase auch kontrahiert, aber nicht in einem festen Punkt endet, sondern in einem diffusen Ansatz. Dieser befindet sich nicht nur auf der Stirnfläche, sondern kann sich auch noch auf Teile der Elektrodenseitenfläche ausdehnen. Mit steigender zugeführter Leistung wird die aktive Fläche größer und verschiebt sich zur Wendel (linker Rand), d.h. der notwendige Strombedarf wird durch Vergrößerung der Emissionsfläche auf der Elektrode gewonnen. Gleiches Verhalten zeigt sich bei Druckverringern und festgehaltener Leistung.

Plasmatemperatur im Kontraktionsbereich

Durch orts aufgelöste Spektroskopie kann die Temperaturverteilung im Plasma bestimmt werden. Der experimentelle Aufbau ermöglicht Messungen der Flächenstrahllichte $L(y)$. Ein Beispiel für das Ergebnis einer solchen Messung im Wellenlängenbereich der zur Druckbestimmung benutzten, selbstumgekehrten Natriumresonanzlinien bei 589 nm und für die Diagnostiklinien bei 498 nm ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Ortskoordinate r verläuft hier radial, also senkrecht zur Brennerachse.

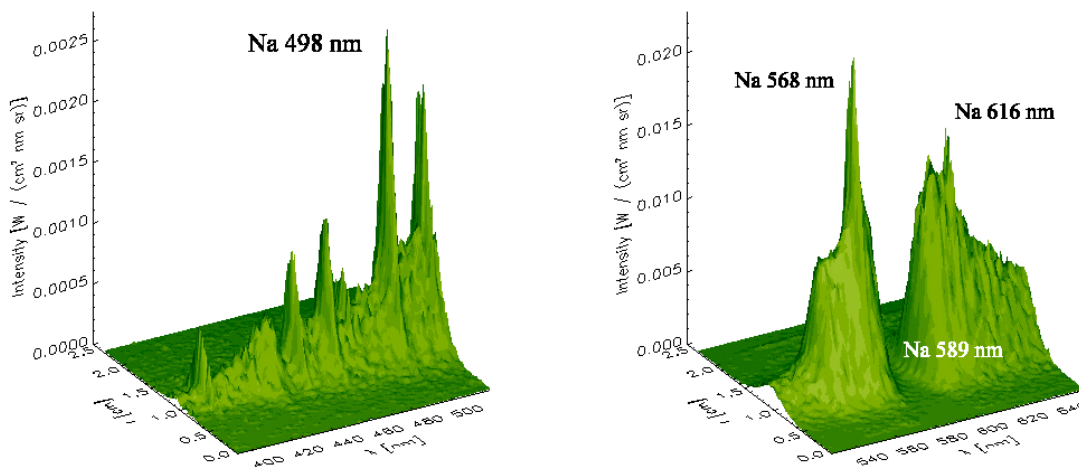


Abb. 12: CCD-Image der verwendeten Na-Linien bei 498 nm und bei 589 nm.

Da das Linienintegral optisch dünner Spektrallinien ein Maß für die Plasmatemperatur ist, werden für die Temperaturmessungen im Quecksilber spektrale Verteilungen im Bereich der Hg 577/579 nm und für die Na-Entladungen die Na I 498 nm aufgenommen und über einen

Wellenlängenbereich von ± 6 nm integriert. Um auch Temperaturen entlang der Ortskoordinate z entlang der Brennerachse zu untersuchen, kann der Brenner in diese Richtung verschoben werden.

Plasmatemperatur der Hg-Entladung

Das schon in den Bildern der FlashCam (Abb. 8) beobachtete Einschnüren der Entladung vor den Elektroden findet man auch, wenn man sich die Linienintensitäten und die Temperaturprofile anschaut. In Abbildung 13 sind die Linienintegrale der Hg 577/579 nm für verschiedene Abstände z von der Elektrode gezeigt. Das Plasma endet aus der homogenen Säule kommend auf der Elektrodenspitze bei $z = 0$. Der Rohrradius beträgt 8 mm. Einhergehend mit einem Intensitätsanstieg ist die Kontraktion des Bogens hin zum Bogenansatz an der Kathode wie an der Anode zu sehen, wobei die Kontraktion in der Kathodenphase wesentlich stärker und die Linienintensität größer ist.

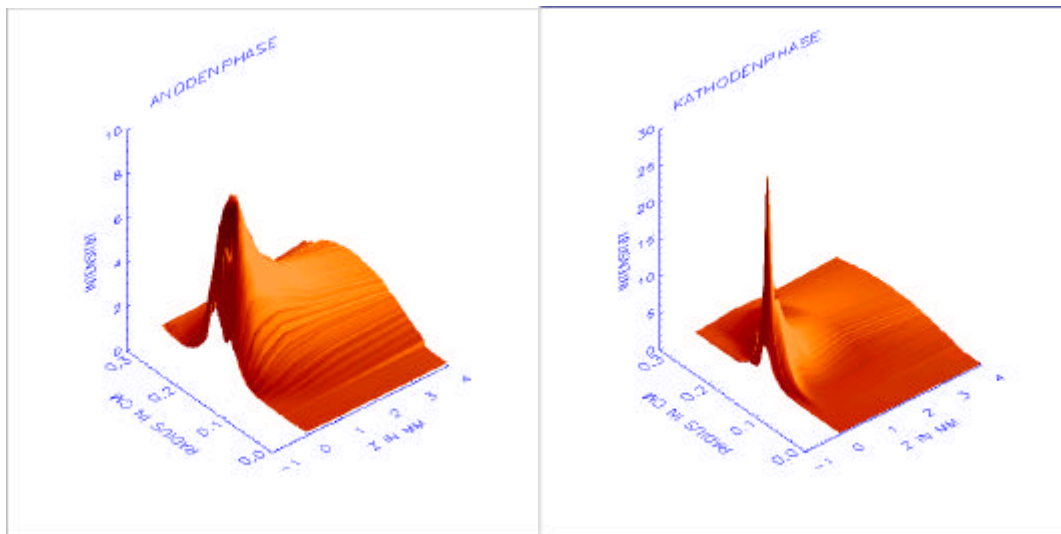


Abb. 13: Intensitätsverlauf der Hg-Linien 577/579 nm vor Anode und Kathode der Hg-Lampe.

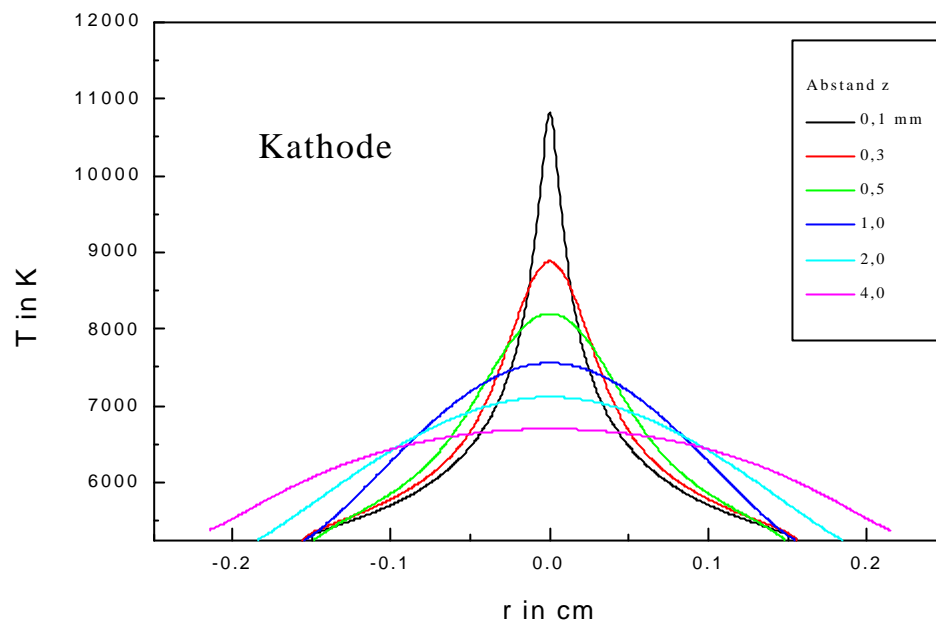


Abb. 14: Radiale Temperaturverteilung der Hg-Lampe (150 W) von 100 μm bis 4 mm vor der Kathode.

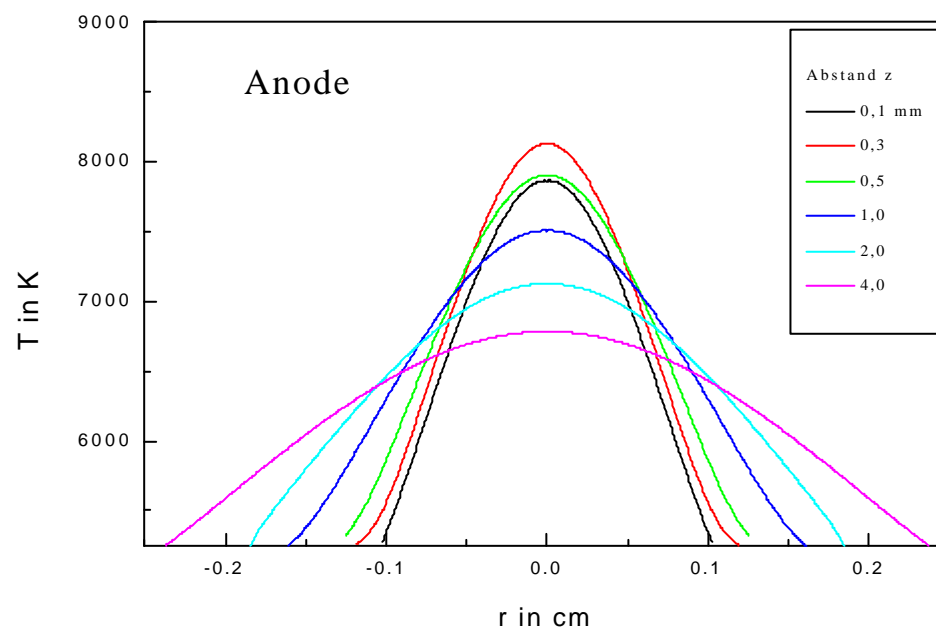


Abb. 15: Radiale Temperaturverteilung der Hg-Lampe (150 W) von 100 μm bis 4 mm vor der Anode.

In Abbildung 14 sind Temperaturverteilungen für den Kathodenbereich einer Hg-Entladung aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, daß der Bogen vor der Kathode stark kontrahiert und im Vergleich zur Bogenmitte zwischen den Elektroden Temperaturen erreicht, die bis zu einem Faktor 2 höher sind (s. auch Abb. 16). Abbildung 15 dokumentiert, daß sich der Bogen auch zur Anode hin verengt und die Temperatur ansteigt, allerdings nicht in dem Maße wie im Falle der Kathode.

Der axiale Temperaturverlauf zwischen Anode und Kathode ist in Abbildung 16 dargestellt, wobei sowohl die Anoden- als auch Kathodenstirnfläche mit $z = 0$ fixiert wird. Die Messungen wurden jeweils bis auf $20\ \mu\text{m}$ an die Elektrodenoberfläche herangeführt. Auffällig ist die starke Temperaturerhöhung auf ca. $11\ 000\ \text{K}$ unmittelbar vor der Kathode (bei $z = 100\ \mu\text{m}$), während die Temperatur vor der Anode nur auf etwa $8\ 000\ \text{K}$ ansteigt. Die Achsentemperatur in der Mitte des Bogens (bei $z = 8\text{mm}$) liegt bei etwa $6\ 000\ \text{K}$.

Rechnungen im TV Braunschweig (J. Wendelstorf) für einen Hg-Gleichspannungsbogen bei 10 bar zeigen ein deutliches Abweichen vom LTE in Elektrodennähe [17]. Auch bei den hier untersuchten Lampen muß man von einem Abweichen vom LTE vor den Elektroden ausgehen, d.h. die angegebenen Temperaturen kurz vor der Elektrode stellen Elektronentemperaturen dar.

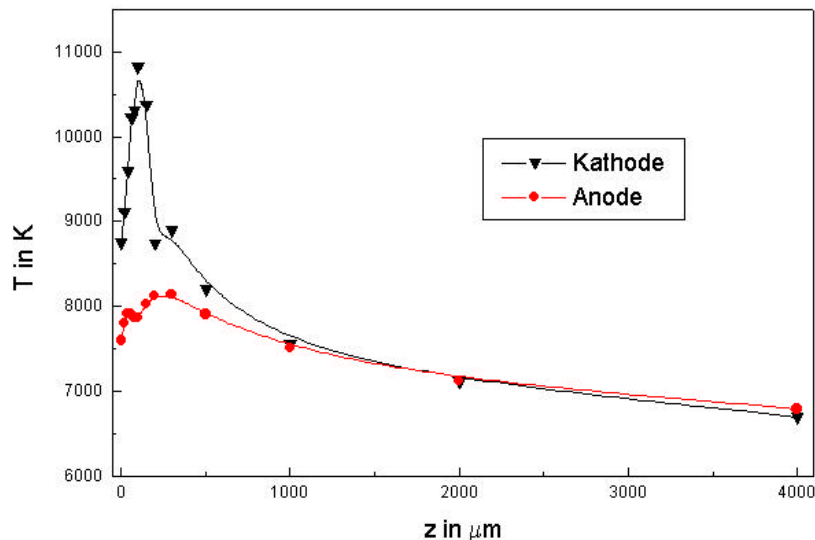


Abb. 16: Axiale Temperaturverteilung einer Hg-Entladung in Bogenmitte als Funktion des Abstandes von der Elektrodenspitze.

Plasmatemperatur der Na- und NaHg-Entladungen

Bei den Na und NaHg-Entladungen sind aus den Intensitätsverteilungen der Na 498 nm die Temperaturprofile berechnet worden. Diese sind für 70 W Rechteckentladungen in den Abbildungen 17-19 (reine Natrium-Entladung; $p = 32$ kPa) und Abbildungen 20-22 (NaHg-Entladung; $p = 26$ kPa) für unterschiedliche Abstände z zur Elektrode dargestellt. Verwendet wurden hier Lampen in Osram-Bauform, was zu geringeren Dampfdrücken als bei der INP-Bauform führt [8]. In der Bogenachse ist die Plasmatemperatur der NaHg-Entladung um ca. 500 K höher als in den reinen Na-Entladungen. Sie ist praktisch für einen Abstand größer als 3 mm zur Elektrode gleich und fällt nur für Abstände kleiner als 1 mm leicht ab. Ein radiales Einschnüren der Säule findet man unterhalb eines Abstands von 2 mm, wobei die NaHg-Entladung etwas stärker kontrahiert. Für größere Abstände variieren Form und Absolutwerte nur wenig.

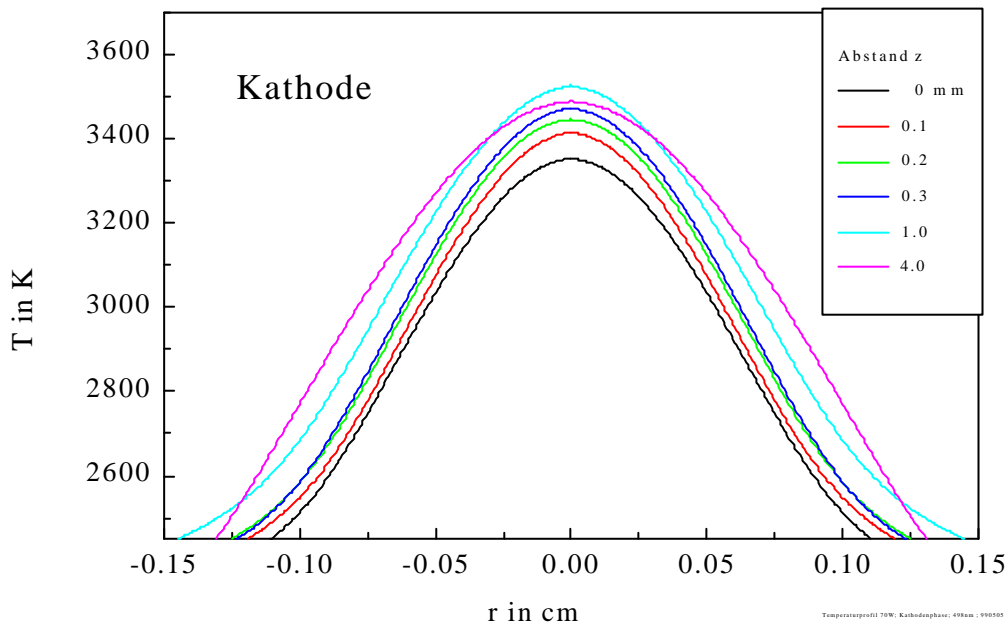


Abb. 17: Temperaturprofile vor der Kathode einer Na-Entladung (70 W Rechteck, $p = 32$ kPa).

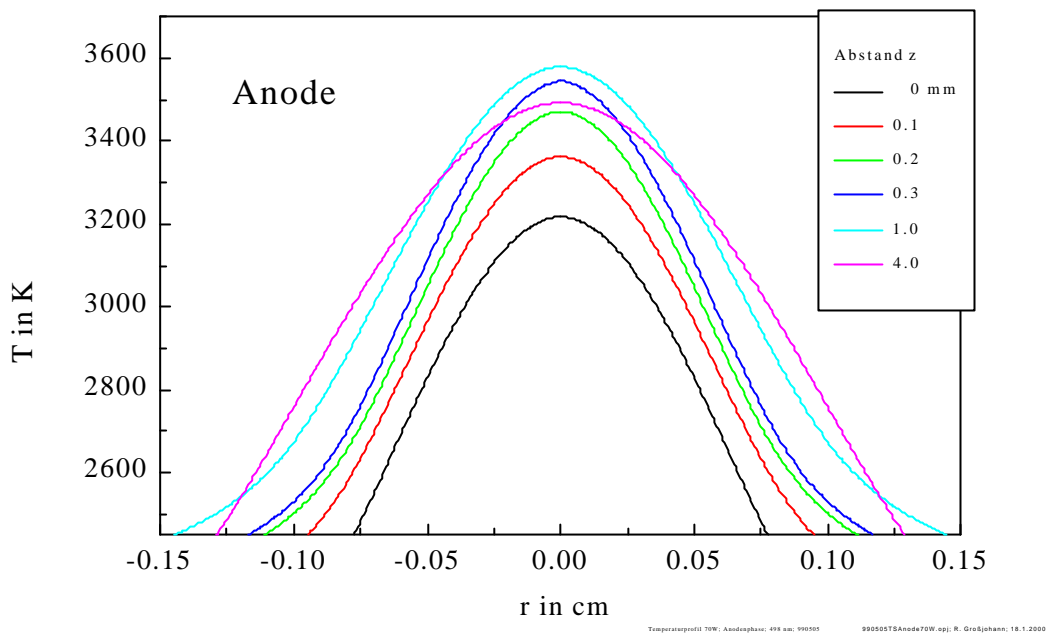


Abb. 18: Temperaturprofile vor der Anode einer Na-Entladung (70 W Rechteck).

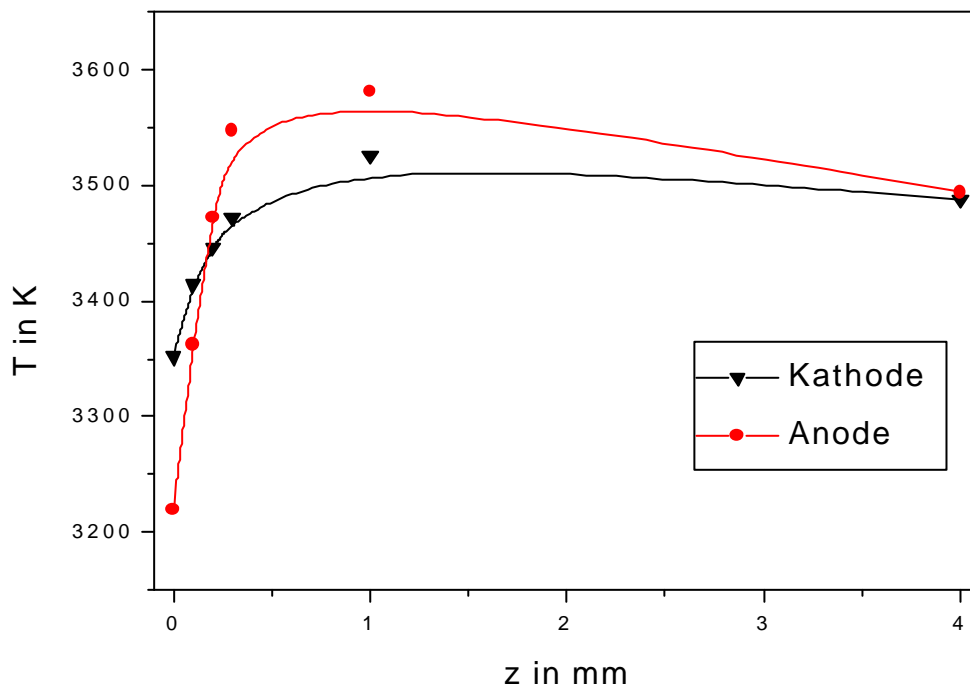


Abb. 19: Temperaturprofile im Bogenkern vor den Elektroden einer Na-Entladung (70 W Rechteck).

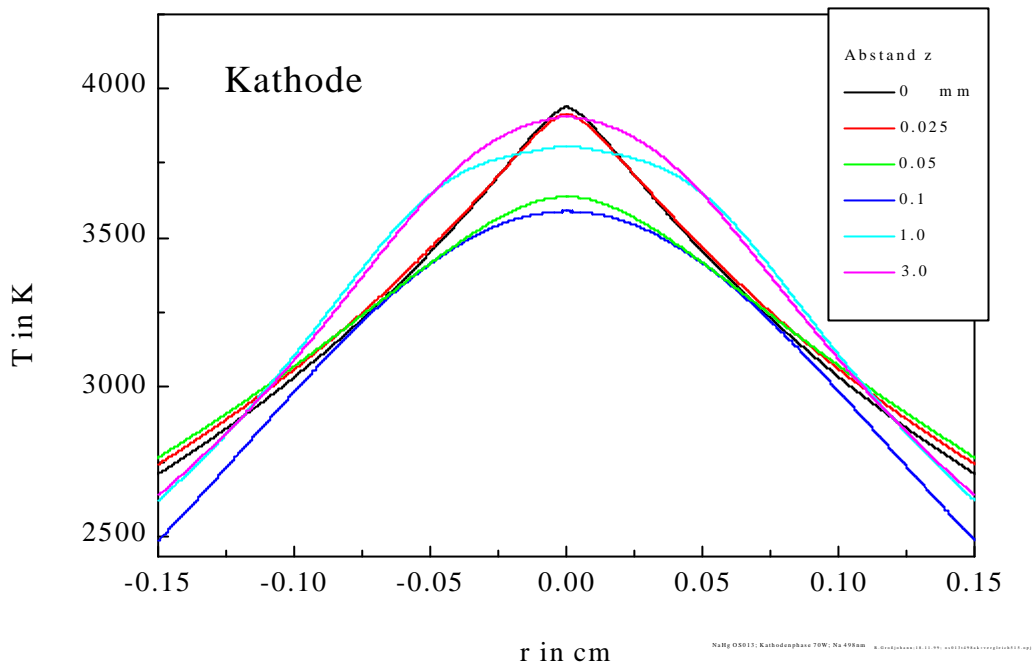


Abb. 20: Temperaturprofile vor der Kathode einer NaHg-Entladung ($P = 70$ W Rechteck; $p = 26$ kPa; $T_w = 975$ °C; $T_{El} = 1250$ °C).

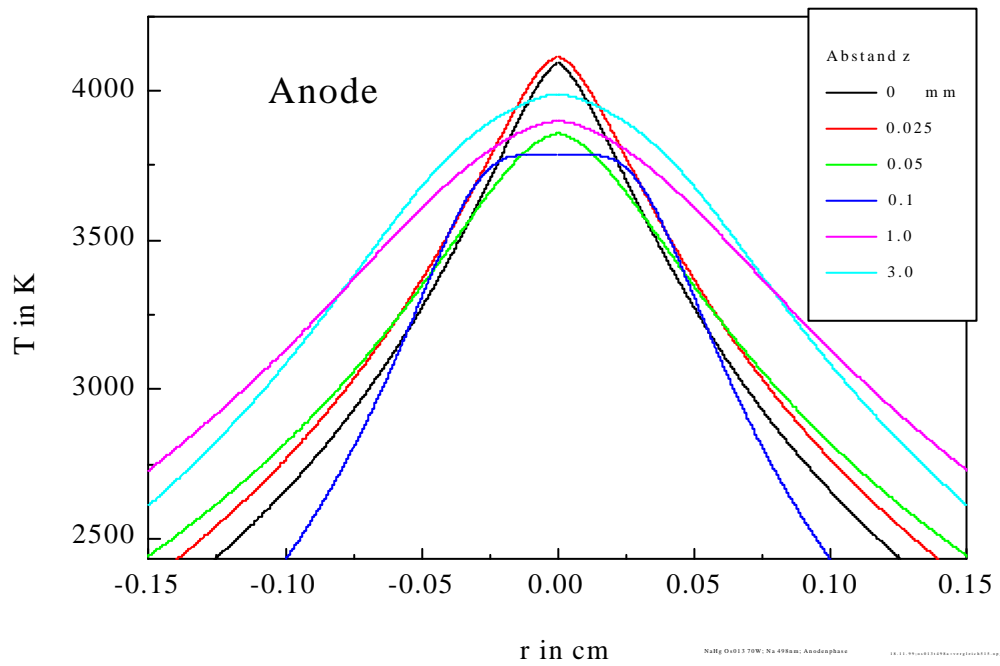


Abb. 21: Temperaturprofile vor der Anode einer NaHg-Entladung (70 W Rechteck).

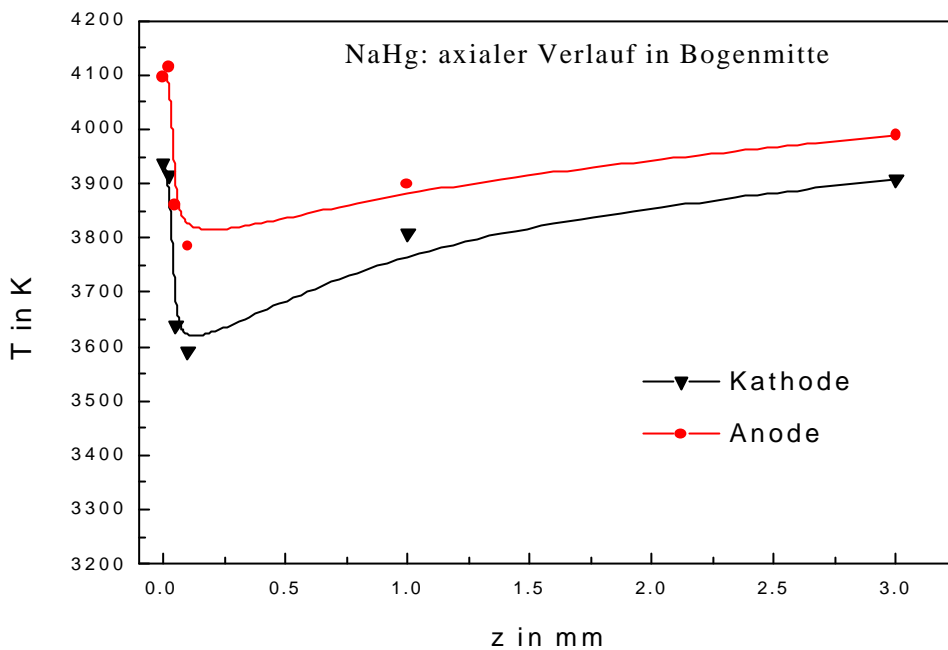


Abb. 22: Temperaturprofile im Bogenkern vor den Elektroden einer NaHg-Entladung (70 W Rechteck).

In Abbildung 23 ist die Abhängigkeit der Achsenmittentemperatur von der Entfernung zur Elektrodenspitze für eine reine Natrium-Entladung (INP-Bauform) dargestellt. Die Entladung wurde mit einer 50 Hz Rechteckspannung betrieben. Die Temperaturbestimmung für diese Verteilungen erfolgte außerdem nach Verfahren B aus der Flächenstrahldichte der selbstabsorbierten Spektrallinie bei 819 nm. Die Plasmatemperatur steigt in beiden Phasen zur Elektrode hin leicht an, wobei auch hier erstaunlicherweise die Temperatur dicht vor der Elektrode in der Anodenphase höher ist, als in der Kathodenphase. Dies läßt sich durch die stärkere Kontraktion des Bogens in der Anodenphase und den diffusen Ansatz über die Stirnfläche hinaus in der Kathodenphase erklären.

Die Temperaturverläufe für höhere Entladungsleistungen weisen das gleiche Verhalten wie in Abbildung 23 auf. Die Entladung mit der höheren Leistung hat auch eine höhere Plasmatemperatur. Abbildung 24 zeigt die Plasmatemperatur in Achsenmitte vor der Kathode einer reinen Na-Entladung für 64 und 77 W.

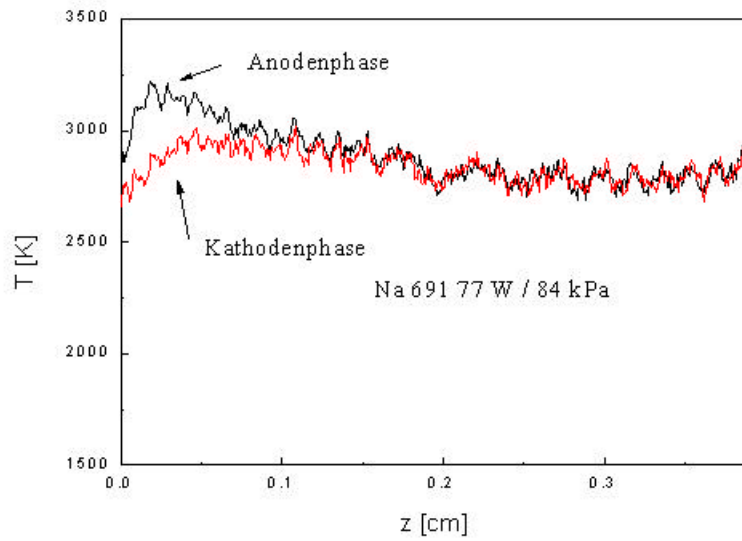


Abb. 23: Temperaturverteilung vor der Elektrode einer Na-Rechteckentladung für 77 W in der Anoden- und Kathodenphase.

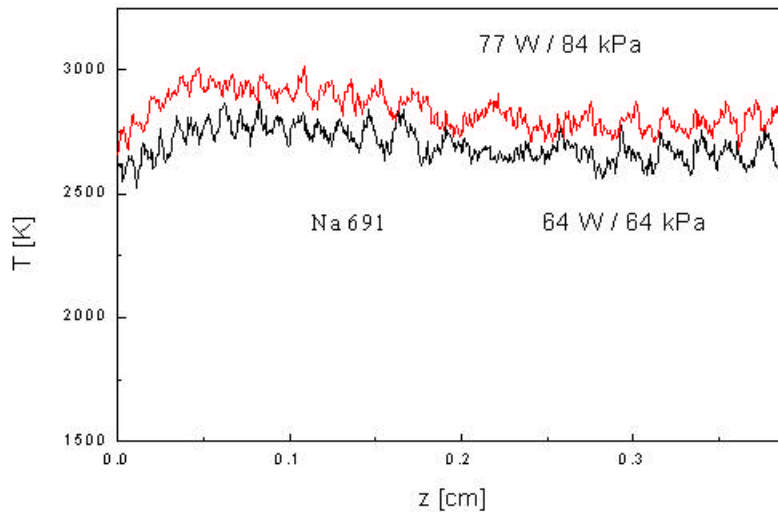


Abb. 24: Temperaturverteilung vor der Kathode einer Natrium-Rechteckentladung für 64 und 77 W.

Die Temperaturen der Natriumamalgam-Entladungen (Abb. 25 und 26) sind im Strommaximum der sinusförmig erfolgten Leistungseinspeisung aufgenommen worden (INP-Bauform). Die Entladungen zeigen bzgl. der Temperaturverläufe in Achsenmitte vor den Elektroden das gleiche Verhalten wie die reinen Na-Entladungen. Die Plasmatemperatur ist in den NaHg-Entladungen aber um einige 100 K höher.

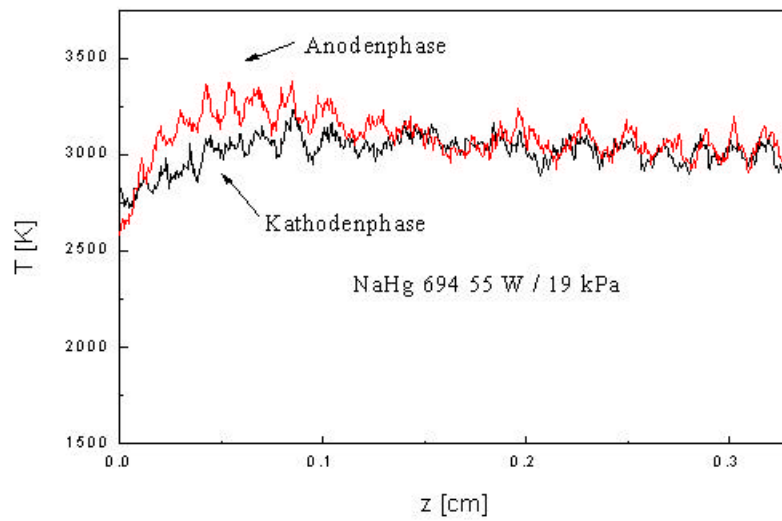


Abb. 25: Temperaturverteilung vor der Elektrode einer NaHg-Entladung mit 55 W (50 Hz Sinus).

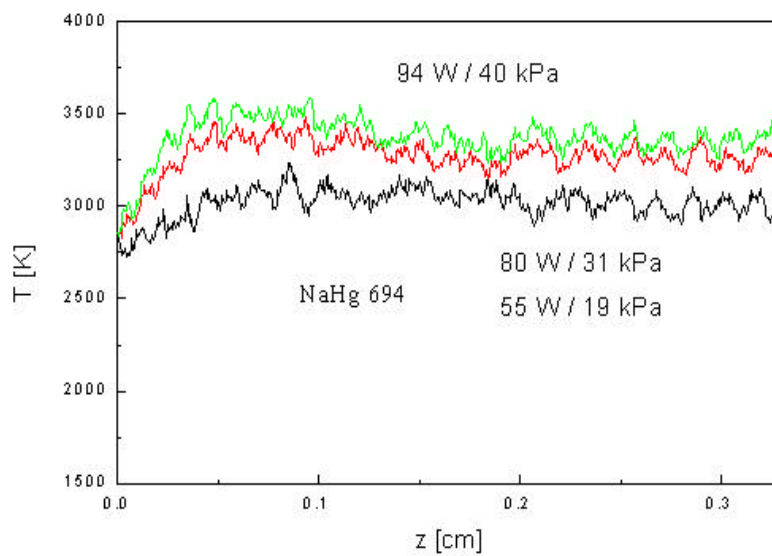


Abb. 26: Temperaturverteilung vor der Kathode einer NaHg-Entladung für verschiedene Leistungen (50 Hz Sinus).

Elektronendichteverteilung vor den Elektroden

Die Abbildungen 27-29 zeigen die Elektronendichteverteilungen vor den Elektroden in Achsenmitte der untersuchten Entladungen berechnet aus der Saha-Gleichung (11). Sie erstrecken sich über einen Dichtebereich von $3 \cdot 10^{14}$ bis $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Ihr Verlauf entspricht dem der jeweiligen Temperaturprofile. Die Dichten der Atome sind aus dem Druck berechnet worden (14) und liegen im Bereich um 10^{18} cm^{-3} . Der Ionisationsgrad im homogenen Teil der Entladungen liegt unterhalb von 1 %.

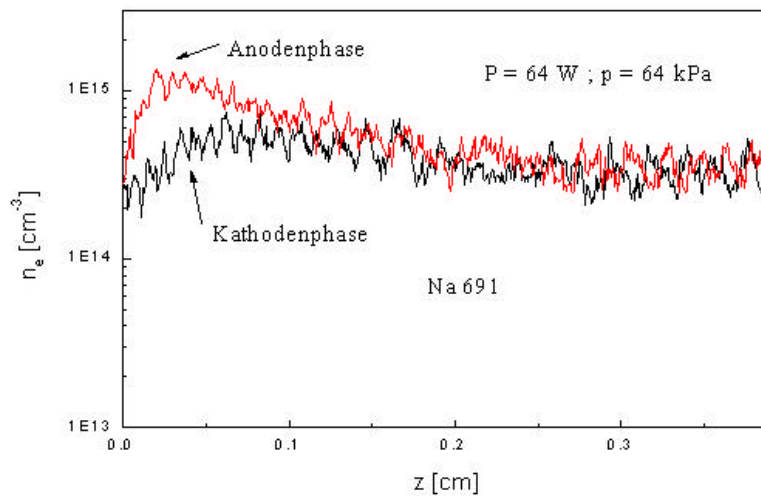


Abb. 27: Verteilung der Elektronendichte vor der Elektrode einer Na-Rechteckentladung von 64 W.

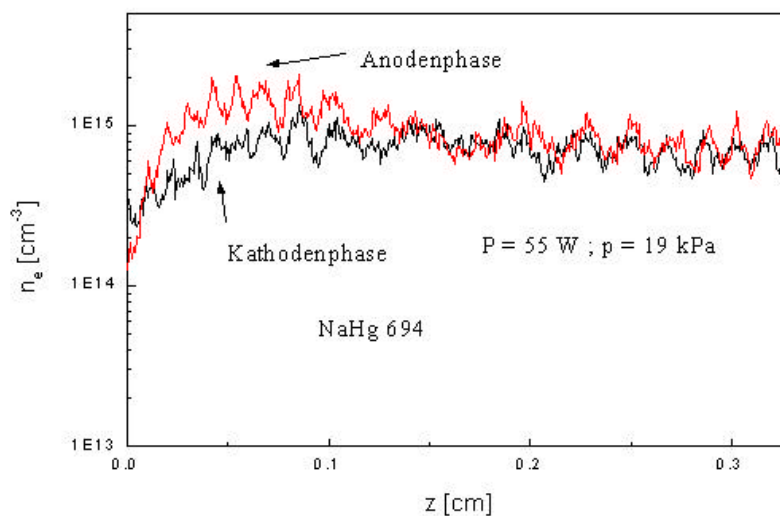


Abb. 28: Verteilung der Elektronendichte vor der Elektrode in der Kathoden- und Anodenphase einer NaHg-Entladung von 55 W.

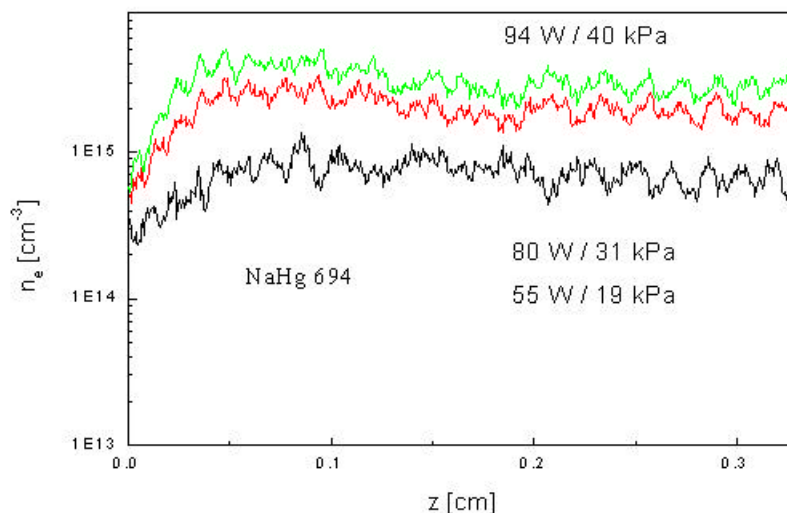


Abb. 29: Verteilung der Elektronendichte vor der Kathode einer NaHg-Entladung für verschiedene Leistungen.

Hot-Spot-Verhalten

Mit dem Übergang zu Brennern in Osram-Bauform und damit zu geringeren Drücken bei gleicher eingespeister Leistung konnte vor der Kathode eine stärker leuchtende Schicht beobachtet werden, die ca. 100 μm dick ist und auf höhere Temperaturen hindeutet.

Der linke Teil in Abbildung 30 zeigt zur besseren Illustration den Ansatz des Bogens in der Kathodenphase und das Übergreifen der NaHg-Entladung über die Elektroden spitze. Im rechten Teil ist ein CCD-Image des Plasmas aus der Achsenmitte im Spektralbereich um 450 nm dargestellt. Die Schnitte zeigen im unteren Bildfeld den spektralen Verlauf und im linken Bildfeld das Verhalten der Linienintensität der Hg 436 nm als Funktion des Abstands von der Elektrode. 100 Pixel entsprechen hier 0,6 mm. Man kann gut das Übergreifen der Plasmastrahlung über die Elektroden spitze hinaus (nach unten Richtung Kappe) erkennen, die Intensität ist jedoch aufgrund der kurzen Plasmaschicht zwischen Elektrode und Rohrwand geringer als im Bogen selbst. Das Verhalten für die Kathoden- wie für die Anodenphase (Abb. 31) ist vergleichbar mit dem, wie es schon in den Fotos der FlashCam zu beobachten war (Abb. 10 und 11), d.h. in der Kathodenphase findet ein stärkeres Überziehen der Elektroden-seitenfläche statt (ca. 1mm für 70 W) als in der Anodenphase, wo der Bogen nur an der Stirnfläche ansetzt.

Bemerkenswert ist das Auftauchen von Quecksilberlinien in Kathodennähe, was durch eine verstärkte Emission der Hg I 435,8 nm verdeutlicht wird (Abb. 30, 31). Während die Intensität der Na-Linien nur wenig in Richtung Elektrode variiert, zeigt die Hg-Linie bei 435,8 nm einen starken Intensitätsanstieg innerhalb eines Bereiches von ca. 140 μm vor der Kathodenspitze. Die Linienemission läßt sich auch an der Seitenfläche der Elektrode beobachten, wo der Bogen diffus ansetzt. In der Anodenphase sind die Hg-Linien in dieser Weise nicht vorhanden. Sie kommen nur mit ganz geringer Intensität im Plasma vor.

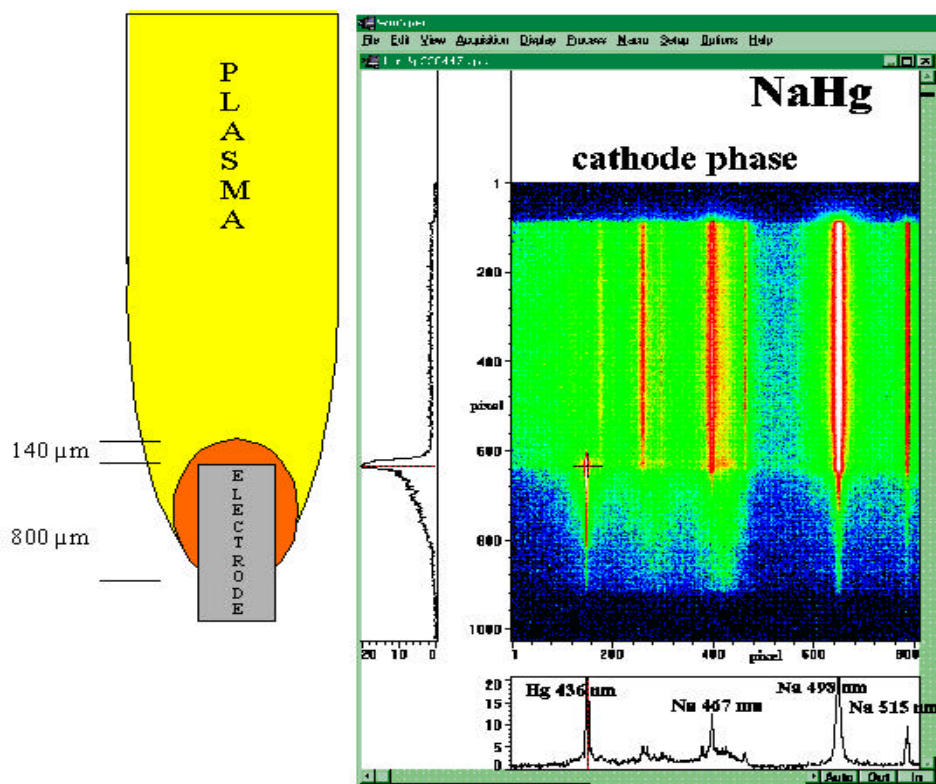


Abb. 30: CCD-Image und Skizze der Kathodenphase einer 50 W NaHg-Entladung (Rechteck); linke Seite im CCD-Image: Intensitätsplot der Hg 435,8 nm; unten: spektraler Verlauf.

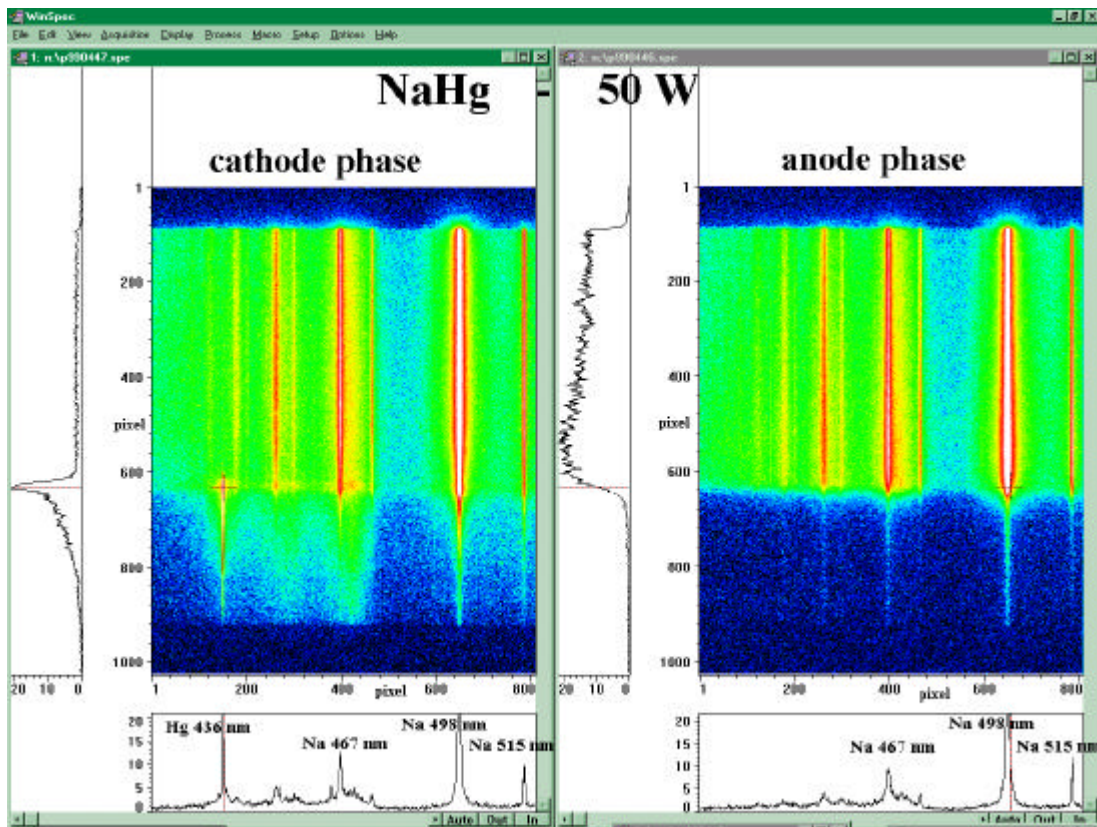


Abb. 31: CCD-Image der Kathoden- und Anodenphase einer 50 W NaHg-Entladung (Rechteck); links: Verlauf der Hg 435,8 nm (Kathodenphase); rechts: Verlauf der Na 498 nm (Anodenphase).

Ein ähnliches Verhalten kann auch in den reinen Natriumentladungen beobachtet werden. Hier tauchen in Kathodennähe Argon-Linien des verwendeten Zündgases auf. Allerdings sind hier die Intensitäten aufgrund der höheren Anregungsenergie des Argons (13 eV) und der geringen Zufüllmenge deutlich kleiner. Abbildung 32 zeigt ein CCD-Image einer Na-Entladung im Spektralbereich um 800 nm. In der Kathodenphase erkennt man eine Intensitätsspitze der Argon-Linie bei 811,5 nm in der gleichen Weise wie vom Hg in der NaHg-Entladung bekannt ist. In der Anodenphase fehlen die Ar-Linien. Rechnungen im TV Bochum Theorie (H. Schmitz) zeigen für solche Na-Entladungen Abweichungen vom LTE in diesem Bereich [18].

Abbildung 33 zeigt die Temperatur im Bogenzentrum der NaHg-Entladung in Abhängigkeit vom Abstand zur Elektrodenspitze, gemessen mit der Na 498 nm und der Hg 436 nm. In Abbildung 34 sind die Temperaturprofile dargestellt, wobei die Hg-Profile kantiger aussehen

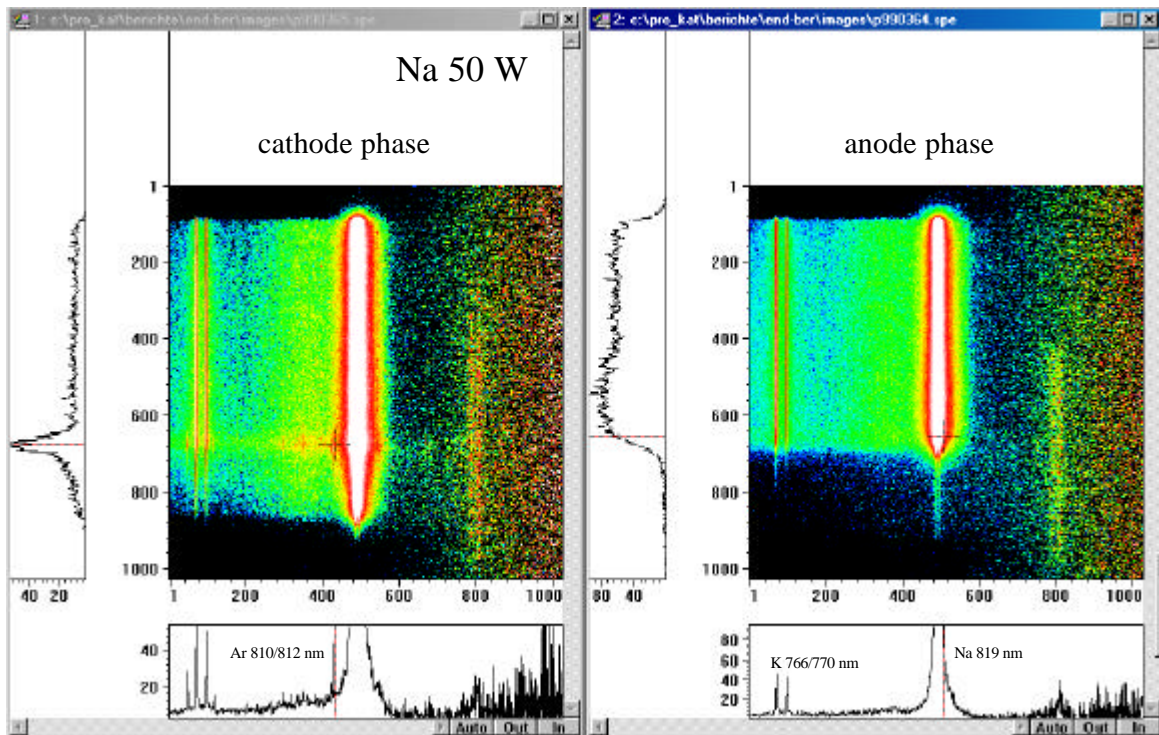


Abb. 32: CCD-Image der Kathoden- und Anodenphase einer 50 W Na-Entladung (Rechteck); links: Verlauf der Ar 812 nm (Kathodenphase); rechts: Verlauf der Na 819 nm (Anodenphase).

als die Na-Profile. Die Plasmatemperatur beträgt in Bogenmitte 3 800 K und fällt zur Kathode hin leicht ab. Etwa 100 μm vor der Elektrode erfolgt dann ein Temperaturanstieg. Jedoch ist die Temperatur, gemessen mit der Hg 436 nm, ca. 500 K höher als die, gemessen mit der Na 498 nm. Ein Überschreiten der Normtemperatur für die Na 498 nm kann als Erklärung für dieses Verhalten nicht herangezogen werden, da diese erst bei ca. 6 000 K erreicht wird. Entmischungserscheinungen und damit ein Anreichern von Hg vor der Kathode kann nur über den Umweg konstanten Na-Partialdrucks vor der Kathode ausgeschlossen werden, d.h. der Kuppenabstand der Na D-Linie als Maß für den Na-Partialdruck ändert sich vor der Kathode nicht.

Interferometrische Messungen zur Bestimmung von Besetzungsdichten (und von Partialdrücken) sowie zur Klärung der Abweichungen vom LTE brachten wegen zu geringer Signalgrößen bei einer Ortsauflösung unterhalb von 100 μm vorerst keinen Erfolg. Die Aufklärung dieses Verhaltens bleibt weitere Experimenten vorbehalten.

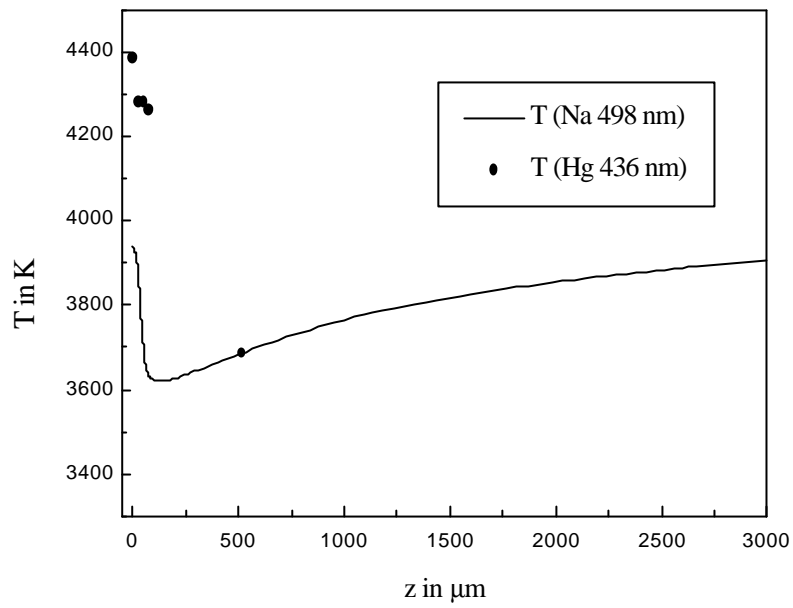


Abb. 33: Bogentemperatur der NaHg 70 W in Achsenmitte als Funktion vom Abstand zur Kathodenspitze ($z = 0$) gemessen mit der Na 498 nm (—) und Hg 436 nm (•).

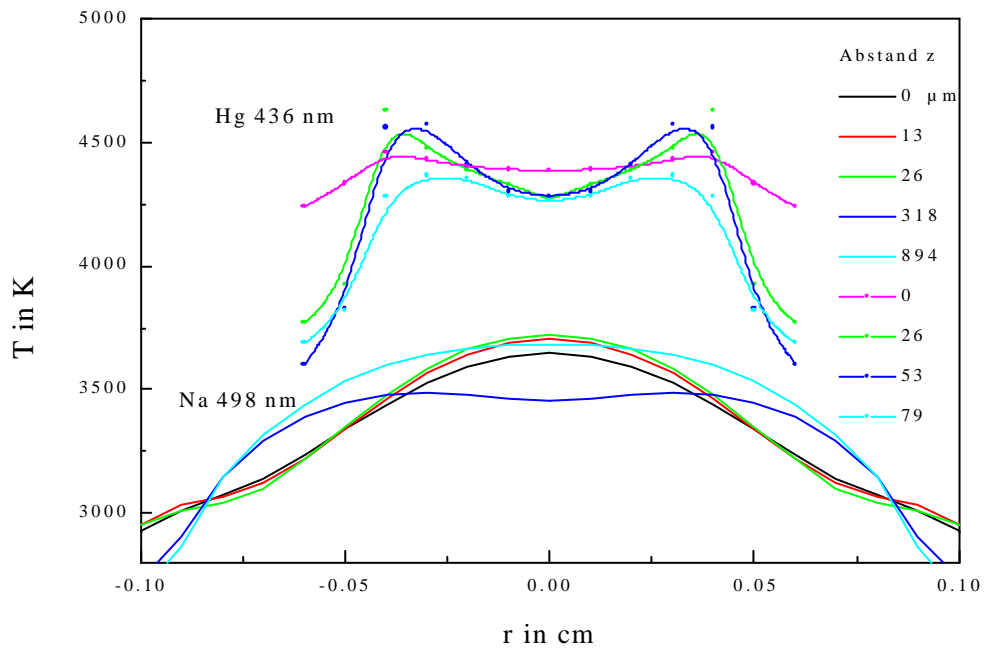


Abb. 34: Vergleich der Temperaturprofile in der Kathodenphase der NaHg 70 W, gemessen mit der Na 498 nm und Hg 436 nm.

Temperaturverhältnisse am Brenner

Zur Charakterisierung des Wärmetransportes im Brenner sind an verschiedenen Stellen Temperaturen gemessen worden. Die Meßpunkte am Brenner und die dort gemessenen Temperaturen für eine Natriumamalgam-Entladung bei 70 W werden in Abbildung 35 gezeigt. Die Entladung wurde mit 50 Hz Rechteckspannung betrieben. Die Temperatur der Kathode von 1250°C wurde mit dem Pyrometer (IGA100) ca. 1 mm unterhalb der Elektrodenspitze bestimmt. Für den Emissionskoeffizienten des Wolfram wurde 0,27 angenommen [16].

Die Temperatur der Rohrwand wurde mit dem Pyrometer (IE7) bestimmt ($\epsilon = 0,7$). Frühere Messungen haben gezeigt, daß sich aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Saphirs die Temperaturen im mittleren Teil der Brenneraußenwand nur wenig von denen an der Niobkappe unterscheiden. Die Temperatur an den Stromanschlüssen am Ende des Niobrohres ist mit 150°C erwartungsgemäß niedrig. Die Messungen mit Thermoelementen zeigen im Vergleich zu den pyrometrischen Messungen geringere Temperaturen. Dies läßt sich durch verminderten Wärmekontakt und dadurch mögliche Meßungenauigkeiten erklären.

Die Abschätzung der Strahlungsheizung der Elektrode einer Na-Hochdrucklampe durch das Plasma wurde im 2. Zwischenbericht vorgenommen und ergibt für eine 400 W Entladung ca. 1W.

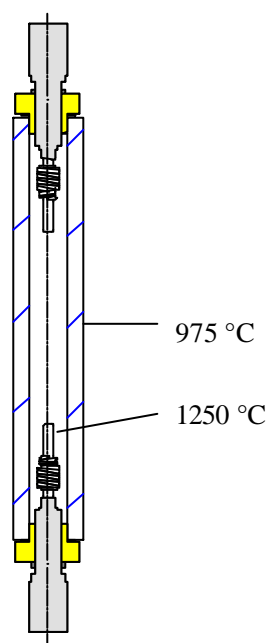


Abb. 35: Temperaturverhältnisse an einer NaHg-Lampe (70 W Rechteck).

Bestimmung der elektrischen Feldstärke aus der elektrischen Leitfähigkeit

Die elektrische Feldstärke E in der Entladung läßt sich nach (15) aus dem Gesamtstrom der Entladung und aus der elektrischen Leitfähigkeit berechnen. Mit Hilfe bekannter Leitfähigkeiten [19] (Abb. 36) für eine 70 W NaHg-Entladung ($I = 0,47$ A; $R = 0,2$ mm; $p_{\text{Na}} = 25$ kPa) wurde der Versuch unternommen, aus den gemessenen Temperaturprofilen für verschiedene Abstände zur Kathode (Abb. 37) die dort notwendigen elektrischen Feldstärken zu berechnen. Zum Test der Methode wurden zwei Profile an folgenden Meßpositionen ausgewählt, kurz vor der Kathode (kontrahiert) und im homogenen Teil des Plasmas. Um den Einfluß des Meßfehlers der Temperaturprofile einzubeziehen, wurden außerdem die Temperaturen um ± 100 K variiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, daß sowohl das Profil selbst als auch die Variation um nur 100 K aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit einen enormen Einfluß auf die

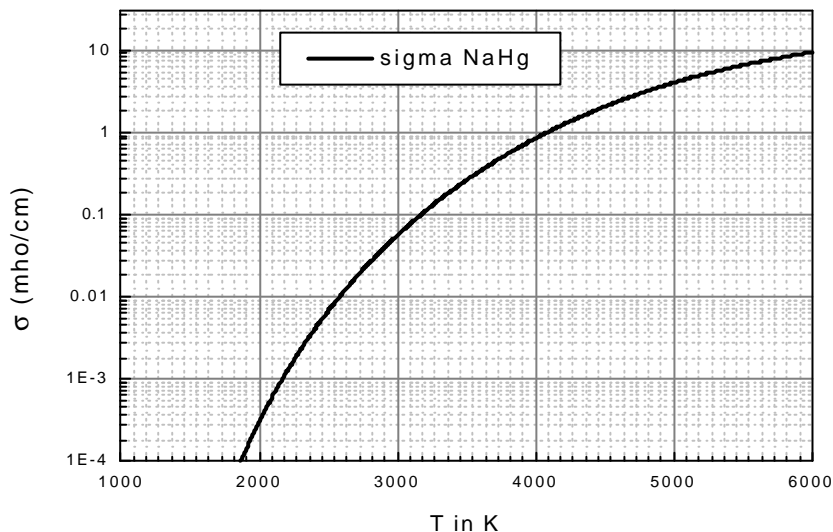


Abb. 36: Elektrische Leitfähigkeit für eine NaHg-Entladung (25 kPa Na, 230 kPa Hg, 45 kPa Ar) [19].

berechneten Feldstärken haben. Das heißt, daß dieses Verfahren zur Bestimmung von elektrischen Feldstärken oder gar Elektrodenfallspannungen bei den vorhandenen Meßfehlern in der Plasmatemperatur nicht praktikabel ist. Möglich wäre dagegen der umgekehrte Weg, wo aus der gemessenen Gesamtspannung und den berechneten Feldstärken die Richtigkeit der Temperaturmessung kontrolliert wird.

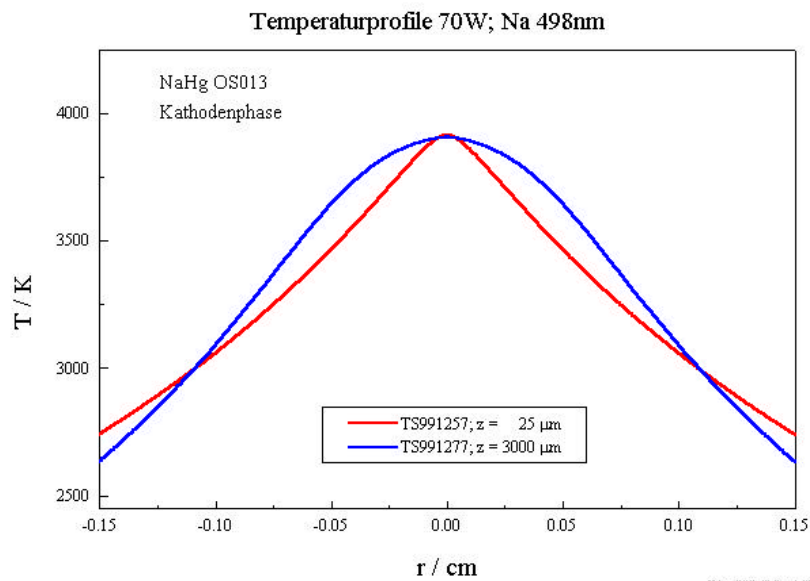


Abb. 37: Temperaturprofile einer 70 W NaHg-Entladung im Abstand von 0,025 mm und 3 mm zur Kathode, die zur Feldstärkeberechnung herangezogen wurden.

Tabelle 4: Elektrische Feldstärke für Variationen des Temperaturprofils.

T	E_{blau} in V/cm	E_{rot} in V/cm
T-Profil	47,4	62,6
T + 100 K	36,5	47,3
T - 100 K	62,3	84,2

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Untersuchung der Säulenkontraktion im kathodennahen Raum von Alkali-Hochdruckentladungen wurden bei OSRAM Berlin und im INP Saphir-Versuchslampen (Na und NaHg) und bei OSRAM München Hg-Lampen gefertigt. Diese wurden mit Gleich-, Rechteck- und Sinusspannung betrieben und dabei Strahldichteverteilungen des Plasmas vor den Elektroden gemessen. Daraus wurden Temperaturprofile, Teilchendichteverteilungen und die elektrische Feldstärke berechnet.

In reinen Hg-Entladung findet man sowohl an der Kathode als auch an der Anode einen kontrahierten Bogenansatz mit einer deutlich höheren Temperatur im Spot als in der homogenen Säule.

Die Alkali-Entladungen haben eine geringere Plasmatemperatur und im Gegensatz zu der reinen Hg-Entladung einen diffusen Bogenansatz an den Elektroden. Der Bogenansatz in Na und NaHg-Entladungen verhält sich ähnlich, wobei die Plasmatemperatur in den NaHg-Entladungen um einige 100 K höher ist als in den reinen Na-Entladungen.

Die Lampengeometrie der Na-Lampen hat einen Einfluß auf den Na-Partialdruck. Wird der Na-Partialdruck geringer, so findet man eine heiße Zone vor der Kathode, die bis ca. 140 μm ins Plasma hinein ausgedehnt und ca. 500 K heißer als das homogene Plasma ist.

Rechnungen zeigen ein Abweichen vom LTE direkt vor der Kathode [18].

Die Bestimmung von Feldstärken aus der Leitfähigkeit und dem Gesamtstrom ist wegen der notwendigen hohen Genauigkeit der Temperaturprofile weniger geeignet.

LITERATUR

- [1] M. Kettlitz, R. Wendt, Verhandl. DPG (VI) 33, 341 (1998)
- [2] M. Kettlitz, R. Grossjohann, Verhandl. DPG (VI) 34, 368 (1999)
- [3] M. Kettlitz, R. Grossjohann, Verhandl. DPG (VI) 35, 1031 (2000)
- [4] M. Kettlitz, R. Wendt, Proc. LS8, 202 (1998)
- [5] M. Kettlitz, R. Großjohann and R. Wendt, Contr. Pap. XXIV. ICPIG Warsaw (1999), Vol. 2, 147-148
- [6] M. Kettlitz, R. Grossjohann, Bull. Of the Am. Phys. Soc. Vol. 44, No. 4 (1999) 30, 52. Ann. Gaseous El. Conf. Norfolk
- [7] M. Kettlitz, 1. Zwischenbericht (1998)
- [8] M. Kettlitz, 2. Zwischenbericht (1999)
- [9] W. Lochte-Holtgreven, „Plasma diagnostics“ (North-Holland, 1968)
- [10] G. Pretzler, Z. Naturforsch. 46a, 639 (1991)
- [11] J. J. de Groot, J. A. J. M. van Vliet, „The High-Pressure Sodium Lamp“ (Deventer, 1986)
- [12] W. Graser, B. Freisinger, priv. Mitteilungen
- [13] J. J. de Groot, Diss. (Eindhoven, 1974)
- [14] W. L. Wiese, M. W. Smith, B. M. Miles, National Stand. Ref. Data Ser., Nat. Bur. Stand., USA, 22, vol. 2, (1969)
- [15] G. Hartel, H. Schöpp, H. Hess, L. Hitzschke, J. Appl. Phys. 85, 7076 (1999)
- [16] R. Rompe, M. Steenbeck, „Ergebnisse der Plasmaphysik“ Bd. 1, 26 (Akademie-Verlag, 1967)

[17] J. Wendelstorf, Vortrag Projekttreffen (Bochum, Jan. 2000)

[18] H. Schmitz, Diss. (Bochum, 1999) / Vortrag Projekttreffen (Bochum, Jan. 2000)

[19] B. Schalk, priv. Mitteilungen