Schlußbericht

Verbundprojekt
Grundlagenuntersuchungen zu quecksilberfreien Kurzbogen-Hochdrucklampen
für Fahrzeugscheinwerfer

Teilvorhaben INP
Charakterisierung des Plasmas in quecksilberfreien
Kurzbogen-Entladungen

Leiter des Teilvorhabens
Dr. M. Kettlitz

Mitarbeiter
O. Krylova, M. Spiller, Dr. M. Wendt, Dr. H. Schneidenbach

Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik
Friedrich-Ludwig-Jahn-Straße 19
17489 Greifswald

FKZ **13N8069**

Projektträger
VDI-TZ, Physikalische Technologien
Frau Dr.-Ing. K. Reichel

Laufzeit
01.05.01 bis 30.04.04
(Verlängerung: 01.05.04 - 31.07.04)

Inhalt

I. Kurze Darstellung

I.1. Aufgabenstellung

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

I.4.1. Angabe von Ergebnissen, die für die Durchführung benutzt wurden

I.4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

II. Eingehende Darstellung

II.1. Erzielte Ergebnisse

II.1.1. Experimenteller Aufbau und Versuchslampen

II.1.1.1. Experimenteller Aufbau

II.1.1.2. Aufbau des Hakenexperiments (AP1)

II.1.1.3. Lampen

II.1.2. Interferometrische Bestimmung von Teilchendichten mit der Hakenmethode (AP2)

II.1.3. Strahlungseigenschaften von Kurzbogenlampen (AP3, 8, 9)

II.1.4. Bestimmung von Plasmaparametern (AP4, 5, 6)

II.1.5. Pyrometrie (AP7)

II.1.6. Simulation von Spektrallinien

II.1.7. Balkendiagramm zum Erfüllungsstand der geplanten Aufgaben

II.2. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit

II.3. Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen

II.4. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

I. Kurze Darstellung

I.1. Aufgabenstellung

Das Ziel des Verbundvorhabens bestand darin, die Machbarkeit einer quecksilberfreien Entladungslampe zu untersuchen, die für die Beleuchtung in Kfz-Frontscheinwerfersystemen geeignet ist und nach Möglichkeit die gleichen elektrischen und optischen Parameter besitzt wie die herkömmlichen Hg-haltigen Lampen. Damit sollen die Voraussetzungen für die Schaffung eines Scheinwerfersystems für die Beleuchtung von Kraftfahrzeugen gelegt werden, das auf einer quecksilberfreien Lampe basiert.

Gegenstand der Untersuchungen des Teilvorhabens im INP war das Entladungsplasma in von OSRAM gefertigten Kurzbogen-Entladungslampen mit Metalldampffüllungen. Zur Charakterisierung des Plasmas waren spektroskopische und andere optische Untersuchungen sowie elektrische Messungen der Betriebsparameter erforderlich. Insbesondere sollte ein Verständnis der Beiträge der einzelnen im Plasma enthaltenen Komponenten zur Gesamtabstrahlung erzielt und eine Energiebilanz der Kurzbogen-Entladung aufgestellt werden. Dies erfolgte durch Messung von Temperatur- und Teilchendichteverteilungen im Plasma. Die Ergebnisse der Messungen sollten neben dem Verständnis der Entladung zu einer Optimierung der Füllungen führen. Deshalb war eine Variation der Füllungen zur Beeinflussung der Strahlungsprozesse und außerdem die Variation der elektrischen Betriebsweise zur Realisierung einer optimalen Betriebsweise und Spektralverteilung der Lampen vorgesehen. Weiterhin wurden thermische Messungen zur Bestimmung von Temperaturprofilen der Lampenteile wie Brennerwand, Zuführungen und Außenkolben durchgeführt, um Aussagen zum Energiehaushalt und zur Materialbelastung treffen zu können.

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben war in der Abteilung „Plasmastrahlungstechnik“ des INP (Dr. E. Kindel) angesiedelt. In der Hochdruckgruppe dieser Abteilung werden seit langem Untersuchungen zu Hochdruckplasmen durchgeführt, die in Lichtquellen und in Schweißlichtbögen zur Anwendung kommen. Aus diesem Grund waren wesentliche Voraussetzungen wie eine moderne experimentelle Ausstattung und Erfahrung bei der Bearbeitung von grundlegenden Fragestellungen zu HID (high intensity discharge) Lampen bereits zum großen Teil vorhanden. Während der Projektlaufzeit wurde in der Abteilung außerdem an folgenden geförderten Teilvorhaben gearbeitet, die in größere Verbundprojekte eingebunden waren:

Vom BMBF gefördert:

Charakterisierung der Übergangsbereiche zwischen Plasma und Elektroden in HID-Lampen; FKZ: 13N7762

Quecksilberfreie Hochdruck-Entladungen mit hohem Wirkungsgrad für die Allgemeinbeleuchtung; FKZ: 13N8262

Spektralanalyse eines Metall-Lichtbogenplasmas; FKZ: 02PP2481

Von der DFG gefördert:

Strahlungstransport in Hochdruck-Entladungen mit periodisch überlagertem impuls-förmigem Energieeintrag; SCHN 671/1

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Projekt waren ein Physiker und ein Techniker für die Themenbearbeitung vorgesehen. Während die Technikerstelle zu Projektbeginn von Herrn M. Spiller eingenommen wurde, konnte die Wissenschaftlerstelle erst nach intensiver Suche ab Februar 2002 mit Frau O. Krylova besetzt werden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen wurden auf halbjährig stattfindenden Projekttreffen vorgestellt. Weiterhin wurden auf Arbeitstreffen bei OSRAM und an der TU Berlin aktuelle Ergebnisse und Daten diskutiert und das weitere Vorgehen abgestimmt. Von OSRAM wurden Versuchslampen mit verschiedenen Füllungen geliefert.

Auf dem Meilensteintreffen im Januar 2003 in Berlin sind die Ergebnisse des TV erfolgreich präsentiert worden. Die Fortführung des Projektes wurde beschlossen. Der Arbeitsplan wurde dahingehend modifiziert, daß auf Anraten des industriellen Beirats und in Absprache mit den anderen Projektgruppen auf interferometrische Messungen zur Bestimmung von Teilchendichten verzichtet wird. Statt dessen wurden die thermografischen Messungen ausgedehnt, die für die weitere Brennerfertigung von großer Bedeutung sind. Zusätzlich ist eine Simulation von Spektren durchgeführt worden.

Die Ergebnisse des TV sind auf folgenden Tagungen in Form von Postern präsentiert worden:

- 11. Bundesdeutsche Fachtagung „Plasmatechnologie“, Ilmenau, März 2003
- 56th GEC, San Francisco, California USA, Oktober 2003
- LS10 in Toulouse, Juli 2004
- GRC on High Temp. Mat., Proc. & Diagn., August 2004

Außerdem konnten interessante Einblicke zu neuen Entwicklungen auf dem Gebiet der Fahrzeugbeleuchtung durch Besuch des „5. International Symposium on Progress in Automobile Lighting“ im September 2003 in Darmstadt gewonnen werden.

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

I.4.1. Angabe von Ergebnissen, die für die Durchführung benutzt wurden

In fast allen HID Lampen ist Quecksilber als sogenanntes Puffergas enthalten und beeinflußt sowohl chemische wie physikalische Eigenschaften des Lampenplasmas. Vorteile des Quecksilbers sind seine leichte Verdampfbarkeit und der große Streuquerschnitt für elastische Stöße mit Elektronen, wodurch die Entladung die gewünschte Impedanz annimmt. Zusätzlich entstehen nur geringe thermische Verluste durch die kleine thermische Leitfähigkeit des Quecksilbers. Außerdem ist das chemisch inerte Verhalten von Quecksilber in Halogen-Metalldampflampen ein wichtiger Aspekt für stabile elektrische und lichttechnische Lampeneigenschaften. Zur Strahlung trägt das Hg kaum bei. Die in Form von Metall-Halogeniden eingefüllten Leuchtzusätze haben geringe Anregungsenergien und bestimmen die komplexen Strahlungsprozesse. Es erfolgt eine Aufteilung der Funktionen der Füllsubstanzen, wobei das Quecksilber im wesentlichen die Leistungsaufnahme und die elektrischen Eigenschaften bestimmt, während die Abstrahlung durch die Auswahl und die Konzentration der Halogenide beeinflußt wird [4-18].
Erst in den letzten Jahren wurden an Zinkdampf-Entladungen und an leicht verdampfbaren Metall-Halogeniden industrielle Grundlagenuntersuchungen vorgenommen, die auch zu schutzrechtlichen Aktivitäten geführt haben [5, 7]. Die Untersuchungen haben bisher zu keinem kommerziell gefertigten Produkt geführt und die publizierten Ergebnisse lassen eine Reihe von Schwierigkeiten beim Betreiben solcher Lampen erkennen (Verlust an Lichtausbeute, veränderte Bogenkontur, thermische Belastung etc.).

Zur Diagnostik an Metallhalogenid-Entladungen sind verschiedene Verfahren angewendet worden, die sich auf optische Emissionsspektroskopie und laserinterferometrische Verfahren stützen [17-21, 25-38]. Dabei wird entsprechend den verschiedenen Füllsubstanzen auf die Bestimmung von Temperaturen aus der Flächenstrahldichte optisch dicker Linien oder aus der Volumenstrahldichte optisch dünner Spektrallinien zurückgegriffen.
Weitere Arbeiten beschäftigen sich eingehend mit der chemischen Wechselwirkung der Füllsubstanzen mit den Gefäß- und Elektrodenmaterialien [22-24].

I.4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur

[1] Jakobi H.W.
Umweltbelastung durch Quecksilber und Gasentladungslampen
Vortrag beim Fachgespräch des VDI-TZ Düsseldorf, 13.04.2000
[2] ECE Regulation 98: Uniform Provisions Concerning the Approval of Motor Vehicle Head Lamps Equipped with Gas-Discharge Light Sources, 26 March 1996
[3] ECE Regulation 99: Uniform Provisions Concerning the Approval of Gas-Discharge Light Sources for Use in Approved Gas-Discharge Lamp Units of Power Driven Vehicles, 25 March 1996
[4] Günther K.
Electronic Stabilization of HID Lamps
Vortrag auf dem Workshop Non-Coherent Light Sources, 52nd Gaseous Electronics Conference, Norfolk, VA, (1999)
[5] Born M.
Line Broadening Measurements and Determination of the Contribution of Radiation Diffusion to Thermal Conductivity in a High-Pressure Zinc Discharge
J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (1999) 2492
[6] Szekacs G.
Low wattage HPS lamps for vehicle headlamps
J. Ill. Eng. Soc. 15(2) (1986) 59-75
[7] Born M.
Mercury Free Metal Halide Lamp
Patent Appl. WO 99/05699
[8] Dakin J.T., Gilliard R.P.
Model and diagnostics of the high-pressure mercury discharge with sodium iodide additives
J. Appl. Phys. 60 (1986) 1281-1288 .
[9] Dakin J.T., Rautenberg Jr. T.H., Goldfield E.M.
Anatomy of a vertical metal halide discharge
J. Appl. Phys. 66 (1989) 4074-4088
[10] Dakin J.T., Gilliard R.P.
Energy balance of the high-pressure mercury discharge with sodium- and scandium-iodide additives
J. Appl. Phys. 62 (1987) 79-87
[11] Work D.E.
Axial species densities in 175-watt sodium-scandium metal halide lamps
J. of IES, January 1978 118-124
[12] Zollweg R.J., Liebermann R.W., McLain D.K.
A radiation and convection model of the vertical mercury arc containing sodium and scandium iodides
J. Appl. Phys. 52 (1981) 3293-3303.
[13] Damelincourt J.J., Aubes M., Fragnac P.
Effect of modulated high-pressure mercury discharges on the shape of self-reversed lines

J. Appl. Phys. 54 (1983) 3087-3097
[14] Damelincourt J.J., Salon J., Sevigne M., Scoarnec L., Herbet P.
Effect of axial segregation on the electric field strength in 50 Hz Hg-Tl-I discharges
J. Phys. D: Appl. Phys. 13 (1980), 583-92
[15] Fischer E.
Axial Segregation of Additives in Mercury-Metal-Halide Arcs
J. Appl. Phys. 47 (1976) 2954-2960
[16] Funk W., Hartel G., Kloss H.-G.
Über die Plasmazusammensetzung in Quecksilberhochdrucklampen mit Zusätzen von Natrium-, Thallium- und Indiumjodid
Beitr. Plasmaphys. 13 (1973), 179-188
[17] Funk W., Kloss H.-G.
Über die Intensität optisch dicker Linien in zylindersymmetrischen inhomogenen Plasmen
Beitr. Plasmaphys. 13 (1973), 101-111
[18] Funk W., Kloss H.-G., Serick F.
Temperaturbestimmung nach BARTELS an einer Quecksilberhochdruckentladung mit Thalliumjodidzusatz
Beitr. Plasmaphys. 10 (1970), 487-496
[19] Zwicker H.
Die Bestimmung der Linienform aus der Linienkorrektur bei Linien mit Selbstumkehr - II. Anwendung auf Linien eines Quecksilberhöchstdruckbogens
Z. Phys. 166, (1962) 163-175
[20] Karabourniotis D.
Plasma temperature determination from the maximum intensity of a symmetric self-reversed line
J. Phys. D: Appl. Phys. 16 (1983), 1267-1281
[21] Schirmer H.
Temperaturbestimmung an einer Metalljodid-Hochdruckentladung
Abhandl. der OSRAM-Gesell. Bd. 9 (1965) 1-14.
[22] Hilpert K., Niemann U.
High temperature chemistry in metal halide lamps
Thermochimica Acta 299 (1997) 49-57
[23] Karwath T., van Erk W., Hilpert K.
Quartz Corrosion Reaction in the Discharge Vessel of Metal Halide Lamps
Poster LS8, (1998) 336-337
[24] Mucklejohn S.
The evolution of low wattage metal halide lamps with ceramic arctubes, in: Poster LS8 (1998) 230-231
[25] Hartel G., Schöpp H.
Determination of the Radial Temperature Profile in a High-Pressure Mercury Discharge Using the Electrical Conductivity
J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (1996) 2881 - 2884
[26] Hartel G., Schoepp H., Hess H., Hitzschke L.
Radiation from an AC High-Pressure Mercury Discharge: Comparison between Experiments and Model Calculations
J. Appl. Phys. 85 (1999) 7076 - 7088
[27] Kloss A., Schneidenbach H., Schoepp H., Hess H., Hitzschke L., Schalk B.
Electrode-sheath voltages in high-pressure mercury arcs
J. Appl. Phys. 88 (2000) 1271-1275
[28] Kindel E., Schimke C., Kettlitz M., Schöpp H.

The Use of the Hook Method for the Determination of Absolute Particle Number Densities in High-Pressure Mercury Discharges
Proc. 12th Int. Conf. on Gas Disch. and their Appl., Greifswald, Contr. Pap. II (1997) 504
[29] Kindel E., Schimke C., Schöpp H., Kettlitz M.
Determination of Temperature Profiles and Particle Number Densities in High-Pressure Mercury and Mercury-Iodide Plasmas
Proc.XXIIIrd ICPIG, Toulouse/France, Contr. Pap. IV (1997) 108
[30] Elloumi H., Kindel E., Schimke C., Zissis G. and Schöpp H.
Characterization of a Mercury Discharge in Non-LTE Conditions
Proc. 8th Int. Symp. on the Science & Technology of Light Sources, Greifswald/Germany (1998) 346
[31] Kindel E., Kettlitz M., Schimke C., Schöpp H.
Determination of Absolute Densities of Additives in HID Lamps
Proc. 8th Int. Symp. on the Science & Technology of Light Sources, Greifswald/Germany (1998) 358
[32] Kindel E., Kettlitz M., Schimke C., Schöpp H.
Application for the Hook Method and Emission Spectroscopy for the Determination of Radial Temperature Profiles in High-Pressure Mercury Discharges
J. Phys. D: Appl. Phys. 31 (1998) 1352 - 1361
[33] Elloumi H., Kindel E., Schimke C., Zissis G.
Experimental investigations on the mercury ground-state density in non-LTE conditions
J. Phys. D: Appl. Phys. 86 (1999) 4134-4141
[34] Kettlitz M., Großjohann R.
Investigation of the Plasma Sheath Near the Electrodes in High-Pressure Sodium Lamps
Proc. GD2000 in Glasgow, Vol. 2, (2000) 839-842
[35] Kettlitz M., Grossjohann R.
Investigation of Temperature and Density Profiles in the Electrode Region of High-Pressure Sodium Lamps
52nd Gaseous Electronics Conference, Norfolk, VA, (1999) 30
[36] Kettlitz M., Wendt R.
Investigation of the Cathode Plasma Sheath in High-Pressure
Sodium Discharges Proc. 8th International Symposium on the Science & Technology of Light Sources, Greifswald/Germany (1998) 202
[37] Kettlitz M., Grossjohann R., Wendt R.
Investigation of Temperature and Density Profiles Near the Electrodes of High-Presure Sodium Lamps Proc. XXIVth ICPIG, Warszawa 1999, Contr. Papers, Vol. 2, p. 147
[38] Kettlitz M., Wendt R.
Investigation of the Cathode Plasma Sheath in High-Pressure Sodium Discharges
Proc. 8th International Symposium on the Science & Technology of Light Sources, Greifswald/Germany (1998) 202

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeitsteilung und Zusammenarbeit der Projektpartner war essentiell wichtig, da die Partner über spezielle Fähigkeiten und Kenntnisse verfügen. OSRAM war für den Bau von Versuchslampen verantwortlich und hat dabei auf unsere Wünsche bezüglich geometrischer und Füllungsänderungen reagiert. Außerdem erfolgte dort die Berechnung der Plasmazusammensetzung und die Simulation der Wärmeverteilung in der Lampe. Beides war für unsere Rechnungen notwendig und außerdem wurden unsere Meßwerte mit den Simulationen verglichen.

Die an der TU gemessenen Abstrahlcharakteristiken der Lampen wurden mit der räumlichen Struktur der am INP gemessenen Spektren verglichen. Außerdem flossen die Erkenntnisse zu Störungen in der Lampengefäßwand in die Messungen mit ein. Es erfolgte ein Vergleich der Plasmatemperaturmessungen an der TU und im INP.

Parallel zu unseren Messungen an D2-Lampen erfolgten Rechnungen am LTI Karlsruhe zu Plasmaparametern und zum Elektrodenverhalten in HID Lampen. Am INP gemessene Temperaturprofile in D2-Lampen ergaben eine gute Übereinstimmung mit Simulationsergebnissen von Dr. P. Flesch am LTI.

Aus dem Zwang zur Schaffung einer Abstrahlcharakteristik der Lampen im Scheinwerfer, die den Anforderungen entsprechen (Hella), erfolgte die Modifizierung der Lampe sowie des Entladungsplasmas.

II. Eingehende Darstellung

II.1. Erzielte Ergebnisse

II.1.1. Experimenteller Aufbau und Versuchslampen

II.1.1.1. Experimenteller Aufbau

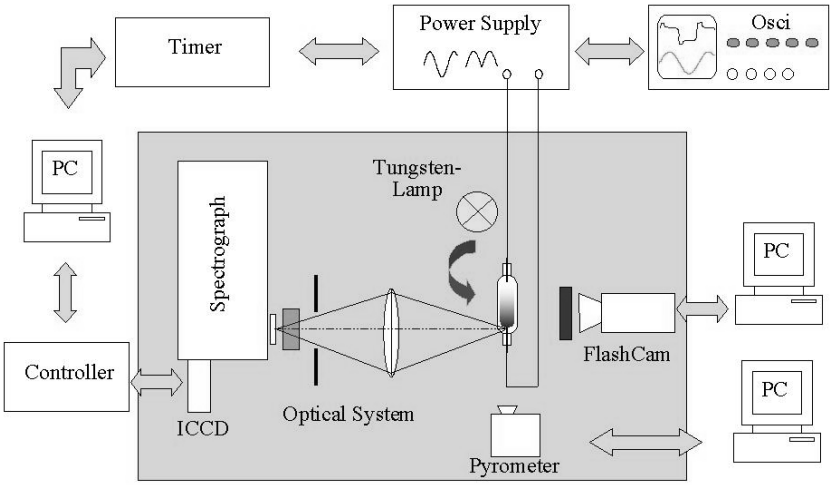

Abb. 1: Experimenteller Aufbau zur Emissionsspektroskopie und Thermografie.

Die für die Spektralmessungen benutzten optischen Meßaufbauten sind in Abbildung 1 dargestellt. Das Meßsystem besteht aus einem 1-Meter-Spektrograf (AM 510; Sopra GmbH) mit angeschlossener ICCD-Kamera (1024 x 1024; Proscan), der Versuchslampe, einer Wolframbandlampe zur Intensitätskalibrierung, Referenzlampen zur Wellenlängenkalibrierung sowie einem optischen Abbildungssystem, mit dem die Strahlung der Lampe auf den Eintrittsspalt des Spektrografen abgebildet wird.

Die Temperatur der Lampenwand sowie der Zuführungen wurde pyrometrisch gemessen (Varioscan, Jenoptik [300x200 „Pixel“, 7,5 bis 12 µm, -40 bis 1200 °C, Makro-Objektiv, $\Delta x = 0{,}1$ mm]). Dazu wurden die Lampen sowohl an Luft als auch in einer Vakuumapparatur (mit IR-Fenstern) betrieben. Außerdem wurde mit einer Videokamera (FlashCam, PCO) das Lampenplasma im sichtbaren Spektralbereich abgebildet. Hierdurch wurde u.a. die räumliche

Ausdehnung des Plasmas im Brenner und die Lage der Schmelze der Leuchtzusätze beobachtet.

II.1.1.2. Aufbau des Hakenexperiments (AP1)

Eine Möglichkeit unabhängig von der Emissionsspektroskopie Teilchendichten im Entladungsplasma zu bestimmen ist durch die Hakenmethode gegeben. Die Hakenmethode ist eine interferometrische Methode zur Bestimmung von Besetzungsdichten von Atomen im angeregten und im Grundzustand. Sie beruht auf einer Kombination von Interferometrie und Spektroskopie und nutzt die Änderung des Brechungsindexes in der Nähe einer isolierten Absorptionslinie, um die Besetzungsdichte des optischen Übergangs der entsprechenden Spektrallinie zu bestimmen. Dabei ändert sich die Form der Interferenzstreifen in der Umgebung der Wellenlänge der Linie aufgrund der anomalen Dispersion. Bei schief gestellten Interferenzstreifen (durch Veränderung des optischen Weges zwischen den Interferometerarmen) bilden sich Haken um die Linie im Interferenzbild. Aus dem Hakenabstand läßt sich die Teilchendichte im unteren Zustand der Linie bestimmen.

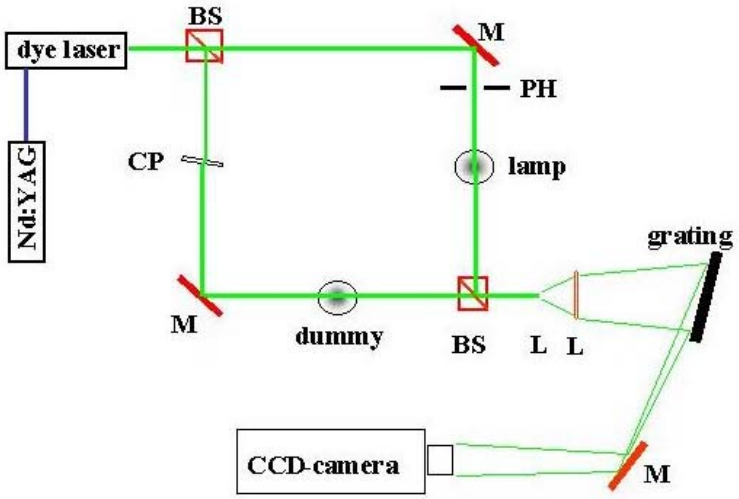

Abb. 2: Experimenteller Aufbau für die Hakenmethode.

Für das Experiment (Abb. 2) ist ein Hintergrundstrahler notwendig, der auf die Wellenlänge des optischen Übergangs der jeweils zu untersuchenden Substanz eingestellt werden kann, entsprechend intensiv ist und die Kohärenzbedingung erfüllt. Das dazu notwendige Lasersystem wurde aus Projektmitteln gekauft (ein von einem Nd:YAG-Laser [Spectra-Physics, Wiederholrate 10 Hz, Output bei 355 nm: 150 mJ] gepumpter Farbstofflaser [Cobra-Stretch, Fa. Sirah, gepumpt bei 355 nm, Bandbreite mit Prisma ~ 0,5 nm, mit Gitter ~ 0,1 cm^{-1}, Frequenzverdopplung]). Das Hakenexperiment wurde aufgebaut und wie im Plan vorgesehen Mitte 2002 in Betrieb genommen.

II.1.1.3. Lampen

Die Untersuchungen wurden an Lampen verschiedener Bauform und mit unterschiedlichen Füllungen vorgenommen. Die Lampen wurden mit einem Schieder-NG mit Leistungen zwischen 10 und 50 W mit 300 Hz Rechteck betrieben. Es wurden HCI-35W-Lampen mit einer

Selten-Erd-Füllung (MHP4: DyI_3, HmI_3, TmI_3, NaI, TlI) ohne und mit Hg-Zusatz verwendet. Der Innendurchmesser der Keramikgefäße beträgt $\varnothing_i = 4{,}9$ mm.

Weiterhin wurden D2-Lampen ($\varnothing_i = 3{,}8$ mm) mit und ohne Hg in der Füllung untersucht. Beide Lampensorten enthalten Xe, ScI_3 und NaI. In den Hg-freien Lampen ist das Hg durch ZnI ersetzt worden.

Außerdem wurden Safir-Lampen mit NaI-Füllung (pur) und mit Zusätzen (MHP4) untersucht. Der Elektrodenabstand beträgt 4,2 mm und der Innendurchmesser 1,5 mm (s. Bericht OSRAM). Diese Lampen wurden auch an der TU Berlin bzgl. der Leuchtdichte vermessen und bei Hella in Scheinwerfern getestet. In allen Lampen ist Xe als Puffergas enthalten, das mit Drücken zwischen 1 und 20 bar bei Raumtemperatur gefüllt wurde.

II.1.2. Interferometrische Bestimmung von Teilchendichten an Kurzbogenlampen mit der Hakenmethode (AP2)

Es erfolgten Vorversuche in Zusammenarbeit mit Dr. Kindel (INP) zur Teilchendichtebestimmung an D2-Lampen. Die Entladung der Kurzbogenlampe brannte waagerecht zwischen reinen Wolframelektroden in einer Xenon-Atmosphäre (Fülldruck: 8 bar). Gefüllt sind die Lampen weiterhin mit Quecksilber und Zusätzen von Metallhalogeniden (ScI_3, NaI). Der Elektrodenabstand beträgt 4,2 mm und der Durchmesser der Lampen 3,8 mm. Die Lampen werden mit einem elektronischen Vorschaltgerät betrieben. Untersucht wurden die Übergänge bei 630,6 nm (Grundzustand Scandium $z^2\,D^0_{5/2} \rightarrow a^2\,D_{5/2}$) und bei 589,0 nm (Grundzustand Natrium $3^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{1/2}$).

Für Scandium konnte zwar ein Streifenversatz registriert werden, aber die Ausprägung ist so gering, daß er nicht auswertbar ist. Deutliche Hakenbilder konnten für Na-Atome erzielt werden. Für gemessene Hakenabstände von 1,9 nm wurde eine mittlere Teilchendichte der Na-Atome von $3 \cdot 10^{16}$ cm^{-3} bestimmt. Die Methode liefert die mittlere Dichte auf dem Sehstrahl und mit der experimentellen mittleren Temperatur folgt ein Na-Partialdruck der Größenordnung 10 mbar.

Das heißt, es ist möglich Teilchendichten zu bestimmen, wir bewegen uns aber bei geringen Dosierungen an der Nachweisgrenze.

Weitere Experimente zur interferometrischen Bestimmung von Teilchendichten sind zuerst verschoben worden, da die ersten gefertigten Lampen aufgrund optischer Unzulänglichkeiten in der Brennerwand noch keine Laserinterferometrie zuließen. Auf dem Meilensteintreffen im Januar 2003 wurde dann auf Anraten des industriellen Beirats und in Absprache mit den anderen Projektgruppen der Arbeitsplan dahingehend modifiziert, daß auf interferometrische Messungen zur Bestimmung von Teilchendichten verzichtet wurde. Statt dessen wurden die thermografischen Messungen zur Charakterisierung der thermischen Eigenschaften des Brenners ausgedehnt, die für die weitere Lampenfertigung von großer Bedeutung sind. Außerdem wurden Simulationsrechnungen zur Druckbestimmung durchgeführt (II.1.6.).

II.1.3. Strahlungseigenschaften von Kurzbogenlampen (AP3, 8, 9)

Angestrebtes Ziel zum Meilenstein war die Untersuchung des elektrischen Verhaltens und der Strahlungseigenschaften verschiedener Versuchslampen. Das umfaßte die zeitlich und räumlich aufgelöste Aufnahme der spektralen Flächenstrahldichte der Lampen, woraus die Vorstellungen über die räumliche Struktur des Plasmas gewonnen und eine Bewertung der Abstrahlung erarbeitet wurde. Im Vordergrund stand deshalb zunächst die Frage, welche Auswertungsverfahren sich zur Bestimmung der Temperatur- und Teilchendichteverteilung an-

hand der spektralen Eigenschaften der auftretenden Atom-, Molekül- und Ionenstrahlung eignen. Diese Verfahren mußten an die jeweilige Lampenfüllung angepaßt werden.

Eine Bewertung der Strahlungseigenschaften, Temperaturprofile und Teilchendichten führte anschließend zur weiteren Optimierung der Lampenfüllung.

Weiterhin wurde ein Vergleich von Füllungen mit und ohne Quecksilber in D2-Lampen vorgenommen. Beide Lampensorten enthalten Xe, ScI_3 und NaI. In den Hg-freien Lampen ist das Hg durch ZnI ersetzt worden. Durch das Weglassen des Quecksilbers sinkt die Brennspannung in den Lampen auf die Hälfte (45 V) und führt zu einer entsprechend höheren Stromstärke (was Probleme mit der herkömmlichen Stromversorgung verursachen kann).

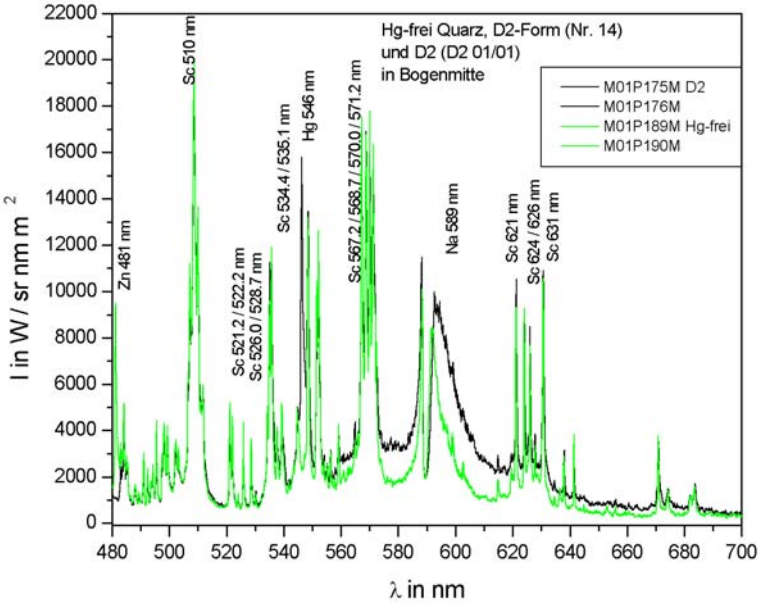

Abb. 3: Spektrenvergleich einer Hg-freien und normalen D2-Lampe in Lampenmitte.

Der Spektrenvergleich bei 35 W für die Bogenmitte ist in Abb. 3 dargestellt. Man erkennt im blauen und grünen Spektralbereich kaum Unterschiede in der Intensität. Die Na D Linie ist jedoch in den herkömmlichen Lampen stärker verbreitert (wegen der Stoßverbreiterung durch das Hg) und hebt das Spektrum stark an. Dies führt zu einer um 20 % höheren Abstrahlung aus dem Bogenkern. Die höhere Temperatur im Spotplasma führt zu einer noch stärkeren Dominanz der Hg-Linien und einer um 60 % höheren Abstrahlung als in den Hg-freien Lampen. Dies wirkt sich durch die relativ kleine räumliche Ausdehnung des Spotplasmas aber nicht so dramatisch auf die Gesamtabstrahlung aus.

Anhand von hochauflösenden Spektren ist für die Diagnostik mit der Hakenmethode eine Auswahl an Spektrallinien für die Teilchendichtebestimmung getroffen worden. Für das Sc-System werden Übergänge bei 391 und 402 nm favorisiert. Zur Temperaturbestimmung in Lampen mit Selten-Erd-Füllungen wurde vorerst auf die optisch dicken Na-Linien bei 819 nm und die Tl-Linie bei 535 nm orientiert.

In Abb. 4 sind Spektren im Bereich der Tl 535 nm und der Na D Linien der HCI-35W (mit Hg) im Außenkolben für Leistungen zwischen 25 und 40 W gezeigt. Die Spektren verhalten sich ähnlich denen der Safir-Lampen mit gleicher Füllung (aber ohne Hg).

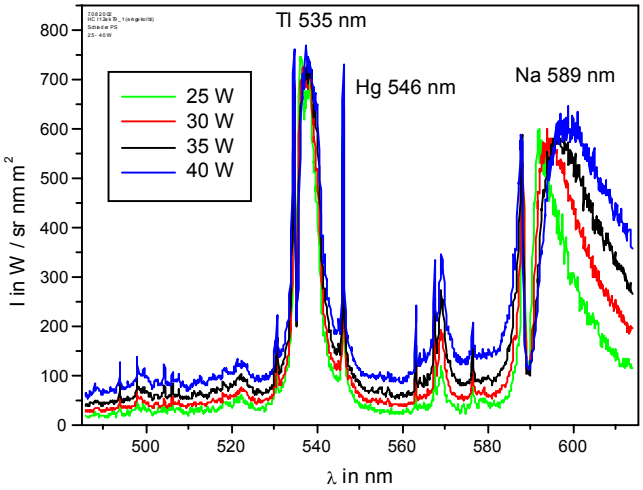

Abb. 4: Spektren der HCI-35W im Außenkolben.

Abbildung 5 zeigt Spektren der im Vakuum betriebenen Safir-Lampe für Leistungen von 20 und 35 W. Auffällig ist hier die größere Zahl an Linien die im Vergleich zu den Sc-Füllungen (s. Meilensteinbericht) zur Abstrahlung beitragen. Außerdem findet man einen höheren Anteil an Kontinuumstrahlung. Allerdings spielen die Na D Linien eine weniger dominante Rolle als in den D2-Lampen.

Abbildung 6 zeigt die Spektren einer Safir-Lampe mit einer reinen NaI-Füllung bei verschiedenen Xe-Kaltfülldrücken. Die Spektren werden von den Na D Linien and den Na Linien bei 819 nm dominiert. In Abbildung 7 sind die Spektren der an Luft betriebenen Safir-Lampen mit MHP4-Füllung für 30 W und p_{Xe} von 5, 10 und 20 bar zu sehen. Durch die stärkere Wandkühlung an Luft ist die Cold-Spot-Temperatur kleiner, was zu geringeren Dampfdrücken der Leuchtzusätze führt und sich im Spektrum durch eine geringere Abstrahlung im sichtbaren Spektralbereich äußert (s. auch Berichte TU Berlin und Hella). In Abbildung 8 erkennt man die Auswirkung der unterschiedlichen Xe-Drücke auf die Linienform der Na D bei gleicher Lampenleistung.

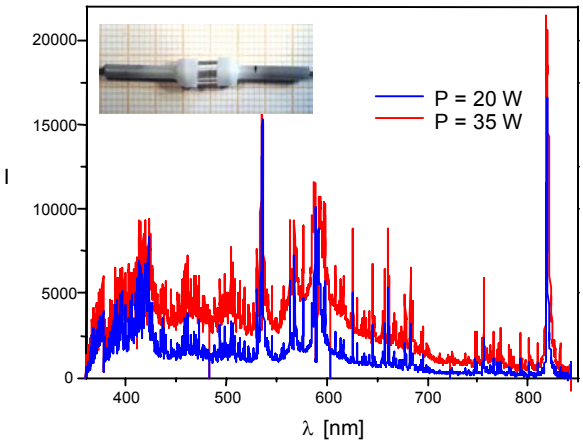

Abb. 5: Spektren einer Safir-Lampe (MHP4) in Vakuum für Leistungen von 20 und 35 W.

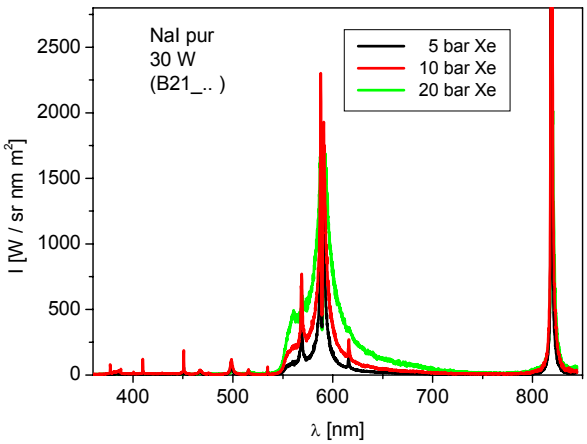

Abb. 6: Spektren einer Safir-Lampe (NaI pur) an Luft für 30 W und p_{Xe} von 5, 10 und 20 bar.

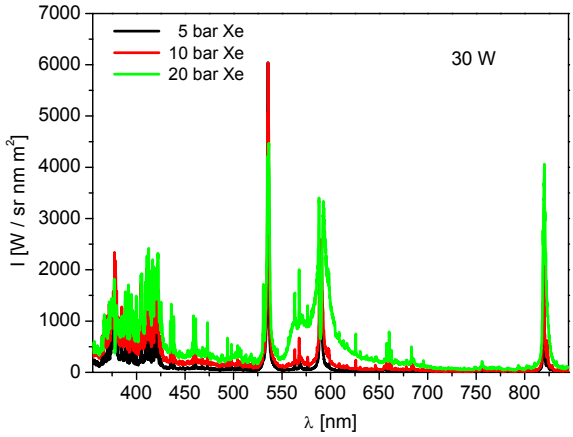

Abb. 7: Spektren der Safir-Lampen (MHP4) an Luft für 30 W und p_{Xe} von 5, 10 und 20 bar.

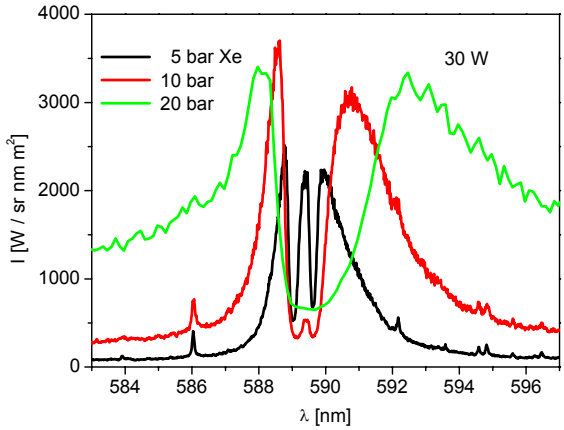

Abb. 8: Spektren der Na D Linien (Safir-Lampen an Luft, MHP4) für 30 W und p_{Xe} von 5, 10 und 20 bar.

II.1.4. Bestimmung von Plasmaparametern (AP4, 5, 6)

Die Bestimmung der Plasmatemperatur aus der gemessenen Flächenstrahldichte erfolgte nach zwei unterschiedlichen Methoden einmal aus optisch dünnen (A) oder optisch dicken Spektrallinien (B):

A) Aus der gemessenen Flächenstrahldichte wird die Volumenstrahldichte berechnet (Abelinversion), aus der dann die Plasmatemperatur ermittelt werden kann (Kenntnis des Partialdrukkes notwendig).

B) Für Plasmen größerer Dichte wird die Temperatur aus den Intensitäten der Umkehrkuppen einer selbstabsorbierten Spektrallinie berechnet (Bartels-Methode).

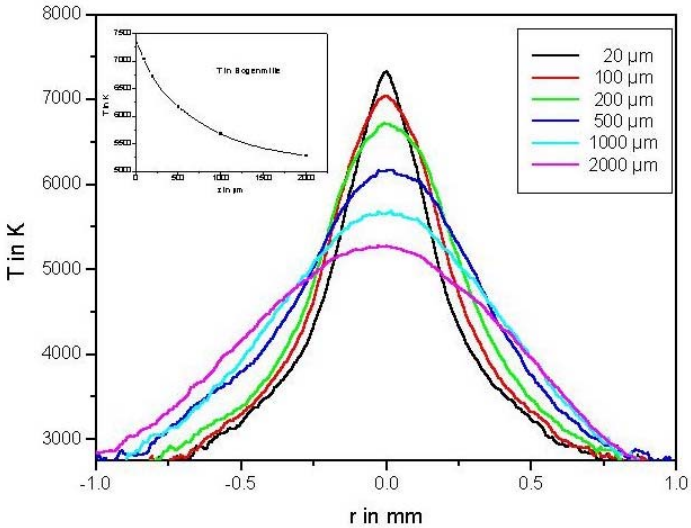

Abb. 9: Temperaturprofile in einer D2-Lampe in Abhängigkeit vom Abstand zur Elektrodenspitze.

Teilchendichten lassen sich aus den OES-Messungen unter Kenntnis des Temperaturprofils aus dem Intensitätsverlauf einer optisch dünnen Linie berechnen oder durch Laserinterferometrie bestimmen.

Die Temperaturprofile des Plasmas sind für D2-Lampen und Safir-Lampen mit Füllungen von NaI und Zusätzen von Selten-Erd-Jodiden (MHP4) aufgenommen worden. Die Plasmatemperatur wurde aus der gemessenen Flächenstrahldichte der Umkehrkuppen einer selbstabsorbierten Spektrallinie bestimmt (Bartels-Methode). Für die Temperaturbestimmung in reinen NaI-Füllungen wurden die optisch dicken Na-Linien bei 819 nm und für Zumischungen von Selten-Erd-Jodiden die Tl 535 nm (Abb. 10) verwendet. Die Temperaturen im Bogenkern liegen zwischen 4000 und 5300 K für die NaI-Füllungen und 5000 K und 5900 K für die MHP4-Füllungen (Abb. 11).

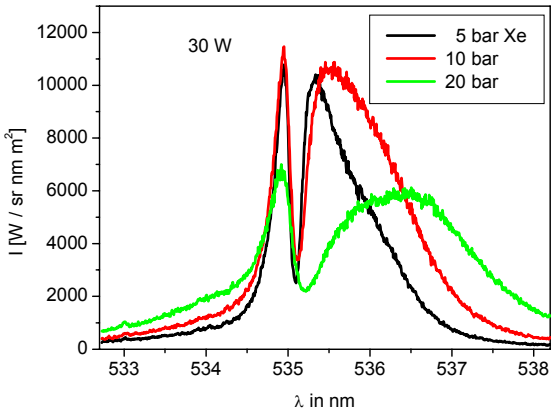

Abb. 10: Spektren der Tl 535 nm (Safir-Lampen an Luft, MHP4) für 30 W und p_{Xe} von 5, 10 und 20 bar.

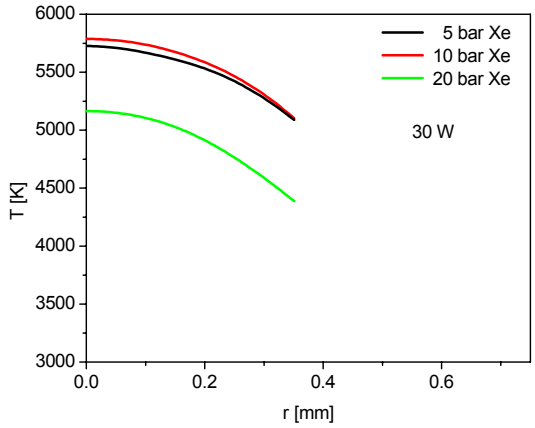

Abb. 11: Plasmatemperatur (Safir-Lampen an Luft, MHP4) für 30 W und p_{Xe} von 5, 10 und 20 bar.

II.1.5. Pyrometrie (AP7)

Thermografische Messungen der Temperaturverteilungen der Entladungsgefäße sind für die Berechnung des Wärmehaushaltes von HID-Lampen und zur Vermeidung extremer Materialbelastungen von großer Bedeutung. Die hier untersuchten Lampen werden gesättigt betrieben, d.h. daß die gefüllten Leuchtzusätze nicht vollständig verdampfen und ein „Sumpf“ im Brenner zurückbleibt. Die Temperatur dieses Sumpfes bestimmt den Dampfdruck der Leuchtzusätze, der wiederum die Abstrahlung entscheidend beeinflußt. Eine genaue Kenntnis der Temperaturverhältnisse der Brennerwände und der Zuführungen spielt also sowohl für die Abstrahlung als auch für die Lebensdauer dieser Lampen eine große Rolle.

Zur thermografischen Vermessung des Brennergefäßes muß der Glasaußenkolben der handelsüblichen Lampen entfernt werden, da dieser keine IR-Durchlässigkeit über 4 µm hat. Die Brenner ohne Außenkolben wurden in dem beschriebenen Vakuumgefäß betrieben und zur Vermessung wurde eine Kombination von Spektroskopie und Thermografie eingesetzt. Hierbei wurde der Umstand ausgenutzt, daß der Kuppenabstand einer selbstabsorbierten Spektrallinie mit steigendem Partialdruck zunimmt und somit als Maß für die Cold-Spot-Temperatur genutzt werden kann. Dies ist für verschiedene Lampen (ohne Außenkolben im Vakuumgefäß mit IR-Fenster) für den Kuppenabstand der Na D Linien durchgeführt worden. Aus den gleichzeitig gemessenen Wandtemperaturen der Brenner und den Spektren ergibt sich der

Zusammenhang zwischen Kuppenabstand Δλ der Na D Linien und der Cold-Spot-Temperatur. Hier wurden zur gemessenen Temperatur der Brenneraußenwand 20 K (Angabe von OSRAM für den Temperaturgradienten für diese Verhältnisse) addiert, um die Temperatur auf der Innenseite zu erhalten, die der Temperatur des Sumpfes entspricht. Dieses Verfahren kann zur visuellen Kontrolle der geeigneten Brennertemperatur eingesetzt werden.

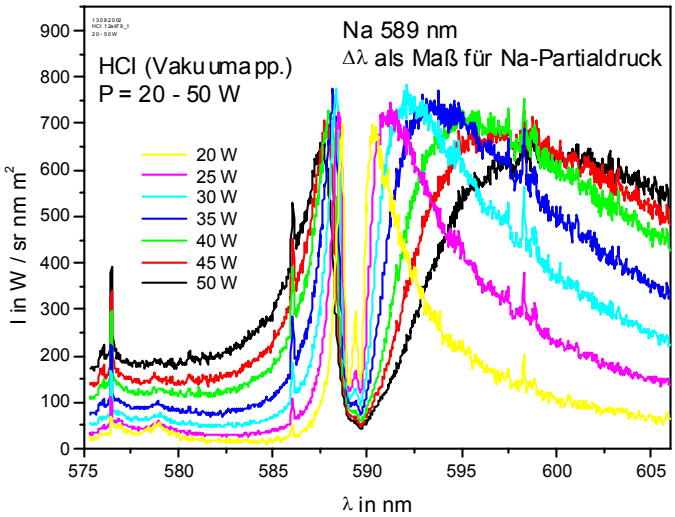

Abb. 12: Variation des Kuppenabstands der Na D Linien für verschiedene Lampenleistungen (HCI-35W in Vakuumanlage).

Abbildung 12 zeigt die zunehmende Verbreiterung der Na D Linien und das Anwachsen des Kuppenabstands mit Leistungserhöhung von 20 bis 50 W. Aus den gleichzeitig gemessenen Wandtemperaturen der Brenner und den Spektren ergibt sich der Zusammenhang zwischen Kuppenabstand Δλ der Na D Linie und Cold-Spot-Temperatur (s. Abb. 13 + 14).

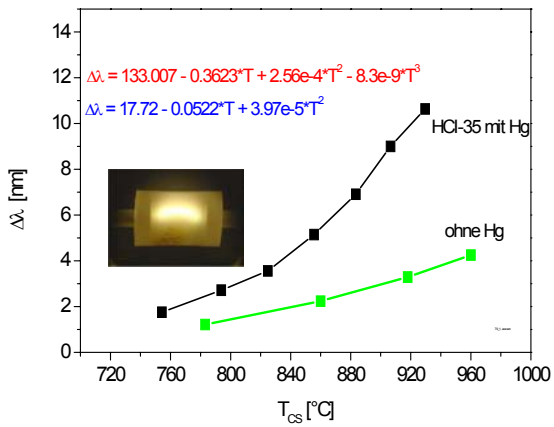

Abb. 13: Zusammenhang zwischen Kuppenabstand der Na D Linien und Temperatur der Brennerwand für HCI-35 mit und ohne Hg.

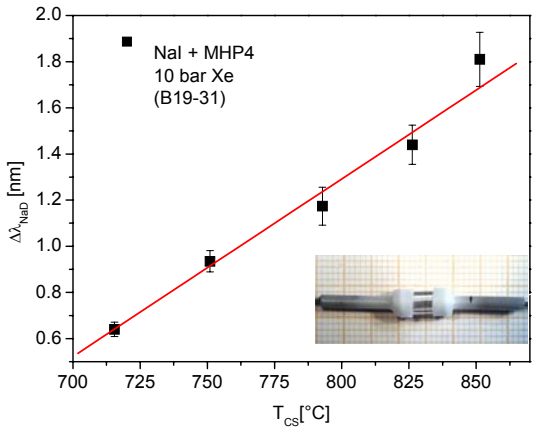

Abb. 14: Zusammenhang zwischen Kuppenabstand der Na D Linien und Temperatur der Brennerwand für Safir-Lampen mit MHP4 (10 bar Xe).

Da sich der Dampfdruck über Gemischen jedoch in Abhängigkeit vom Mischverhältnis als auch von der Sorte der im Gemisch vorhandenen Elemente einstellt, ist es notwendig, diesen Zusammenhang für die verschiedenen Füllungen und Lampengeometrien neu zu vermessen. Aussagen über zugehörige Partialdrücke lassen sich dann über Strahlungstransportrechnungen oder Besetzungsdichtemessungen mit der Hakenmethode gewinnen.

II.1.6. Simulation von Spektrallinien

Zusätzlich zu den geplanten Arbeiten ist die Simulation von Spektrallinien ins Programm aufgenommen worden. Generelles Ziel der Spektrensimulation ist die Vertiefung des Verständnisses der Abstrahlungsmechanismen in Hochdruck-Entladungslampen. Außerdem dienten die Arbeiten zur Absicherung der aus dem Experiment gewonnenen Plasmaparameter.

Die Abstrahlung aus solchen Lampen wird von einer Vielzahl verbreiterter Linien und Kontinuumstrahlung dominiert. Daher ist es notwendig, Strahlungstransportrechnungen durchzuführen. Wir befassen uns mit der Linienstrahlung. Das Profil der Spektrallinien wird durch die einzelnen Spezies im Plasma und deren Partialdrücke ($\sim T_{cs}$) beeinflußt. Es gilt, durch die Rechnungen zu klären, welche Verbreiterungsmechanismen wesentlich sind. Deshalb sind Versuche für Lampen mit unterschiedlichem Xe-Druck durchgeführt worden. Für diese experimentellen Parameter sind dann Linienprofile der Na D Linien berechnet und mit dem Experiment verglichen worden. Dahinter steht der Wunsch, später eine Abstrahlungsoptimierung durch Wahl der Komponenten, deren Partialdrücke und einer geeigneten Plasmatemperatur vornehmen zu können.

In den Plasmen von HID-Lampen führen Stöße der strahlenden Atome mit den anderen im Plasma vorhandenen Spezies sowohl zu einer Verbreiterung als auch zu einer Verschiebung des Linienprofils, welches die spektrale Verteilung der Strahlung beschreibt. In Hochdruckplasmen dominieren neben der Resonanzverbreiterung (Störung durch gleichartige Teilchen), die van-der-Waals-Verbreiterung und bei höheren Elektronendichten der quadratische Starkeffekt. Der Einfluß eines Störungstyps auf das Linienprofil hängt von der jeweiligen Stoßdauer ab. Alle Verbreiterungen können in der Stoßnäherung, aus der sich Dispersions- bzw. Lorentzprofile ergeben, betrachtet werden. Für die van-der-Waals-Verbreiterung muß zusätzlich ein Beitrag in quasistatischer Näherung berücksichtigt werden. Dieser quasistatische Anteil führt zu einer Asymmetrie des resultierenden Gesamtprofils, daß sich aus der Faltung der Profile aller Verbreiterungsmechanismen ergibt.

Eine weitere Voraussetzung zur Berechnung der Linienform ist die Kenntnis der Plasmazusammensetzung. Hierzu wird ein wandstabilisiertes, radialsymmetrisches, axial homogenes Hochdruck-Plasma im lokalen thermischen Gleichgewicht betrachtet. Konvektion wird vernachlässigt und der Druck als zeitlich und räumlich konstant angesetzt. Die in den Experimenten realisierten Drücke und Partialdrücke der Leuchtzusätze wurden durch H. Sarroukh (OSRAM) abgeschätzt und waren Basis der Plasmazusammensetzungsrechnungen. Die wesentlichen Quellen für die atomaren Daten sind hier die über das Internet zugänglichen Datenbänke NIST, AMDOS und Kurucz.

Die berechneten Profile in Abbildungen 15 und 16 zeigen die Auswirkung einer Variation des Xe Druckes (Brenndruck 60 bis 100 bar) und des Na Partialdruckes (für T_{CS} von 1023 und 1073 K) auf die Linienform. Man erkennt, daß sich eine Druckänderung stärker als eine Änderung des Temperaturprofils (Abb. 17, 18) in der Linienform bemerkbar macht. Sowohl Linienflügel, Umkehrkuppen als auch das Selbstabsorptionsminimum werden bei Druckvariation verändert.

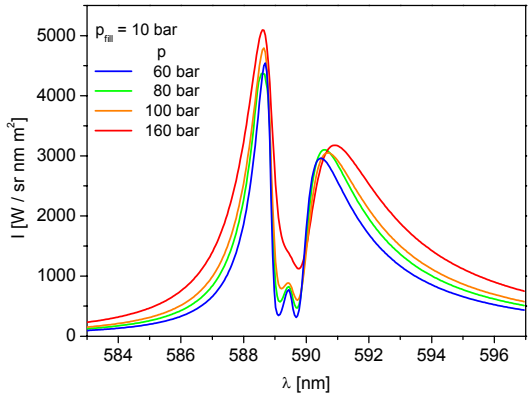

Abb. 15: Variation des Na D Linienprofils für veränderten Xe-Druck.

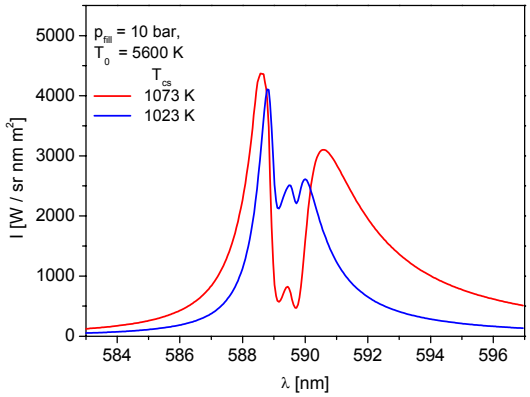

Abb. 16: Variation des Na D Linienprofils für veränderten Na-Druck.

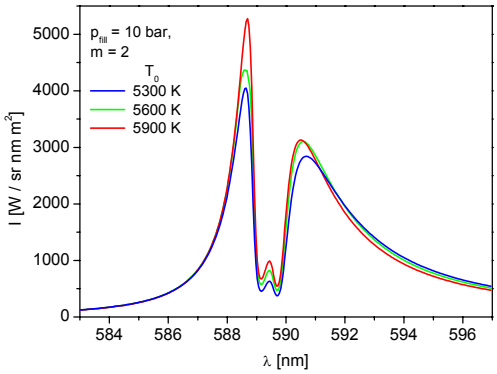

Abb. 17: Variation des Na D Linienprofils für veränderte Plasmatemperatur.

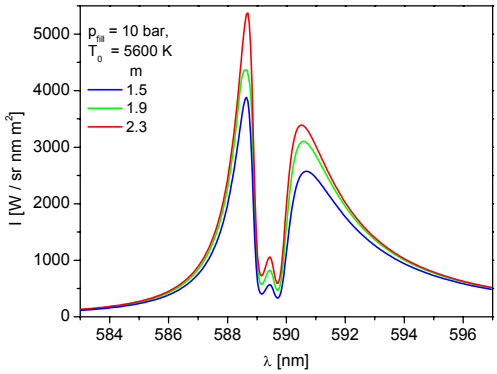

Abb. 18: Variation des Na D Linienprofils für verändertes Temperaturprofil.

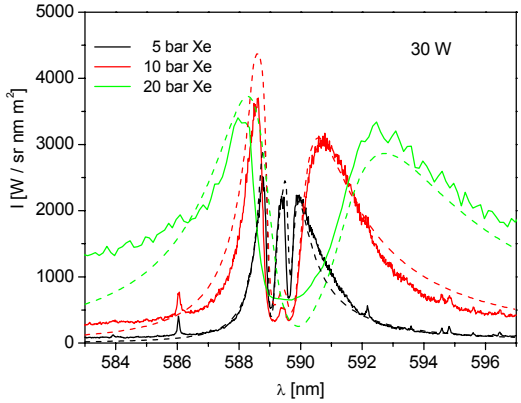

Abb. 19: Vergleich der berechneten Na D Linienprofile mit dem Experiment (MHP4) für Xe-Drücke von 5, 10 und 20 bar.

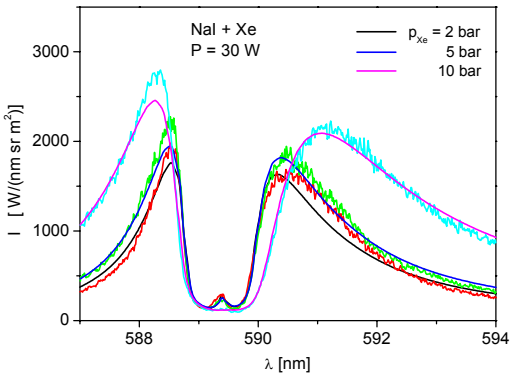

Abb. 20: Vergleich des berechneten Na D Linienprofils mit dem Experiment (NaI) für 2, 5 und 10 bar Xe.

In den Abbildungen 19 und 20 ist der Vergleich der Spektrensimulation des Na D Profils mit Experimenten in MHP4 und NaI-Füllung für verschiedene Xe-Drücke dargestellt. Die berechneten Linienprofile zeigen insgesamt eine akzeptable Übereinstimmung für beide Füllungen. Sowohl Linienflügel, Umkehrkuppen und Selbstabsorptionsminima können für kleine Xe-Drücke gut wiedergegeben werden. Abweichungen im blauen Linienflügel für höhere Drücke lassen sich auf Strahlung des Na-Moleküls zurückführen, die in der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Stark-Verbreiterung ist zu vernachlässigen. Die Na D Verbreiterung wird durch den Xe-Druck dominiert.

II.1.7. Balkendiagramm zum Erfüllungsstand der geplanten Aufgaben

Das Balkendiagramm gibt eine Übersicht über die Erfüllung der ursprünglich vorgesehenen Aufgaben, wobei die Farben folgende Bedeutung haben:

Aufgabe geplant

Aufgabe erfüllt

zusätzliche Aufgabe erfüllt

	2001	2002		2003		2004
	II	I	II	I	II	I
I. Aufbau des Interferometers						
II. Teilchendichtebestimmung						
III. Emissionsspektroskopie						
IV. Temperatur der Gefäßwand						
V. Messung elektrischer Parameter						
VI. Variation der elektr. Betriebsweise						
VII. Spektrensimulation						

Der Bearbeitungsstand der einzelnen Arbeitspakete ist kurz charakterisiert wiefolgt:

I: Das Lasersystem wurde geliefert, das Interferometer aufgebaut und 2002 wie geplant in Betrieb genommen.

II: In Vorversuchen wurde an D2-Lampen die Hakenmethode erprobt und für den Grundzustand von Na Dichten von 3×10^{16} cm^{-3} bestimmt. Zum Meilensteintreffen Anfang 2003 wurde auf Anraten des industriellen Beirats und in Absprache mit den anderen Projektgruppen der Arbeitsplan dahingehend modifiziert, daß auf interferometrische Messungen zur Bestimmung von Teilchendichten verzichtet wurde. Die Bestimmung von Partialdrücken erfolgte im weiteren Projektverlauf über OES und zusätzlich in den Plan aufgenommene Spektrensimulation.

III: Die OES-Untersuchungen wurden an Lampen verschiedener Bauform und mit unterschiedlichen Füllungen vorgenommen. Es wurden HCI-35W-Lampen mit einer Selten-Erd-Füllung (MHP4) ohne und mit Hg-Zusatz verwendet. Außerdem wurden Safir-Lampen mit NaI-Füllung (pur) und mit Zusätzen (MHP4) untersucht (p_{Xe}:1 - 20 bar). Zusätzlich wurden herkömmliche und Hg-freie D2-Lampen untersucht.

IV: Es sind an allen Lampen thermografische Messungen der Temperaturverteilungen der Entladungsgefäße durchgeführt worden, die für die Berechnung des Wärmehaushaltes von HID-Lampen und zur Vermeidung extremer Materialbelastungen von großer Bedeutung sind. Für einige Lampen ist ein optisches Verfahren zur Bestimmung der Cold-Spot-Temperatur aus dem Kuppenabstand der Na D Linien ausgearbeitet worden.

V: Die Messung der elektrischer Parameter erfolgte laufend für die verschiedenen Lampenmodelle und die jeweiligen Füllungen.

VI: Die Lampen wurden im wesentlichen mit einem Schieder-NG mit 300 Hz Rechteck betrieben. Die eingespeiste Leistung wurde zwischen 10 und 50 W variiert. Auf Variationen der Impulsform wurde verzichtet.

VII: Zusätzlich zum ursprünglichen Plan wurden Simulationsrechnungen zur Abstrahlung von optisch dünnen und selbstabsorbierten Na-Spektrallinien vorgenommen. Ziel der Spektrensimulation ist die Vertiefung des Verständnisses der Abstrahlungsmechanismen in Hochdruck-Entladungslampen. Außerdem dienten die Arbeiten zur Absicherung der aus dem Experiment gewonnenen Plasmaparameter. Die berechneten Linienprofile zeigen insgesamt eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Aus diesen an das Experiment gefitteten Linienprofilen lassen sich der Na-Partialdruck, die Plasmatemperatur und der experimentell unzugängliche Xe-Druck bestimmen.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die einzelnen Arbeitspakete gut erfüllt wurden. Die Hakenmethode wurde nicht auf Safir-Lampen angewendet. Diese fehlenden Daten wurden aus der OES und der zusätzlich durchgeführten Spektrensimulation ermittelt. Außerdem wurde die Thermografie zum ursprünglichen Plan ausgedehnt.

Für die Anwendung in einem Autoscheinwerfer wird augenblicklich eine mit 30 W betriebene Safir-Lampe mit einer NaI + MHP4 Füllung und einem Xe Fülldruck von 10 bar bevorzugt.

Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern war sehr eng. Es wurde zu unseren Experimenten gerechnet bzw. wurden von uns Experimente zu aktuellen Fragen modifiziert.

II.2. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit

Das Ziel des Vorhabens ist mit dem Nachweis der Machbarkeit einer quecksilberfreien Entladungslampe, die für die Beleuchtung in Kfz-Frontscheinwerfersystemen geeignet ist, erreicht worden.

Der Nutzen der im Rahmen des Teilvorhabens gewonnenen Erkenntnisse besteht - allgemein gesprochen - in einer erweiterten Kenntnis des Plasmas in Metall-Halogenid-Entladungen.

Anhand der Spektrensimulation können Partialdrücke und Plasmatemperatur bestimmt werden und man erhält zum Experiment zusätzlich Möglichkeiten. Außerdem kann dieses Wissen auf andere HID-Lampen übertragen werden und hier im Projekt erzielte Ergebnisse werden z.T. in weitere Förderprojekte Eingang finden. Insbesondere ist hier die Modellierung der Spektrallinien bei höheren Drücken zu nennen.

Anhand der im Laufe des Projekts erzielten Ergebnisse ist es zu einer Zusammenarbeit mit Prof. Karabourniotis / Uni Heraklion zu Fragen der Plasmadiagnostik in HID-Lampen im Rahmen einer Aktion des COST-Programms gekommen und zukünftige Projekte sind in der Antragsphase.

Das hier erworbene Wissen fließt unmittelbar in die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchs am INP ein und wird Verwendung im Vorlesungsbetrieb an der Uni finden.

Die Ergebnisse sind auf Konferenzen präsentiert worden, wo sie auf großes Interesse stießen. An einer Publikation in J. Phys. D: Appl. Phys. wird gearbeitet.

Es wurden keine Schutzrechte angemeldet.

II.3. Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Im Parallelprojekt unter der Koordination von Philips sind Hg-freie Autolampen in der herkömmlichen Bauform auf Quarzbasis entwickelt und die Ergebnisse auf der LS10 in Toulouse präsentiert worden.

Weiterhin sind keramische Projektionslampen patentiert worden (s. Schlußbericht OSRAM), die mit Einschränkungen für Fahrzeugscheinwerfer Verwendung finden könnten.

II.4. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

- M. Kettlitz, O. Krylova, M. Spiller
Temperaturdiagnostik an Keramiklampen mit Mischfüllungen
11. Bundesdeutsche Fachtagung "Plasmatechnologie", Ilmenau, (2003) 84

- M. Kettlitz, O. Krylova, M. Wendt, H. Schneidenbach
Broadening of the Na D lines in dependence on the Xe pressure in HID lamps
56th GEC, San Francisco, California USA, (2003)

- M. Wendt, H. Schneidenbach, M. Kettlitz, M. Sieg, M. Redwitz
Study of high-pressure xenon discharges with metal-halide additives
56th GEC, San Francisco, California USA, (2003)

- M. Kettlitz, O. Krylova, M. Wendt, H. Schneidenbach
Broadening of spectral lines in high pressure mercury-free short arc lamps
Proc. LS10 in Toulouse (2004) 625-626

- M. Wendt, M. Kettlitz, H. Schneidenbach
Electrical conductivities of Hg, Na, and rare-gas plasmas for HID-lamps calculated with the Chapman-Enskog method in higher approximation orders
GRC on High Temp. Mat., Proc. & Diagn. (2004)

- M. Kettlitz, O. Krylova, M. Wendt, H. Schneidenbach
Plasma diagnostics in Hg free short arc lamps for automotive lighting
J Phys. D: Appl. Phys., geplant für 2005