

Schlussbericht

Verbundprojekt

Neue elektronische Betriebsweisen von HID-Lampen

Teilvorhaben INP

Grundlegende Untersuchungen der Plasmaausbildung und des Elektrodenverhaltens

Leiter des Teilvorhabens

Dr. M. Kettlitz

Mitarbeiter

S. Peters, Dr. M. Wendt, Dr. S. Hadrath, Dr. H. Schneidenbach, Dr. R. Kozakov,
M. Spiller, M. Pfafferott, C. Tietz, M. Schmidt, H. Höft,
C. Breitenfeldt, M. Himpel

Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V.
Felix-Hausdorff-Str. 2
17489 Greifswald

FKZ 13N8604

Projektträger

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

Laufzeit

01.01.05 bis 31.12.07
(Verlängerung: 01.01.08 - 31.05.08)

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. Lampen

II.1.2. Experimente zum Dimmen von HID Lampen (AP1 – 3)

II.1.3. Modellrechnungen zum Dimmen von HID Lampen (AP4)

II.1.4. Experimente zum Zünden (AP5 – 7)

II.1.5. Modellrechnungen zum Zünden (AP8)

II.1.6. Modellrechnungen zu Elektroden (AP9 - 10)

II.1.7. Spektrensimulation in der Anlaufphase (AP11)

II.1.8. Experimente zum Wiederzünden (AP12, 13)

II.1.9. Modellrechnungen zum Wiederzünden (AP14, 15)

II.1.10. Experimente zum Oberflächendurchschlag (AP16)

II.1.11. Modelle zum Oberflächendurchschlag (AP17)

II.1.12. 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

Ziel des Projektes war es, ein grundlegendes Verständnis für das Verhalten des Plasmas und der Elektroden beim Dimmen und Starten von HID-Lampen zu entwickeln. Dieses Wissen sollte neuartige Betriebsbedingungen ermöglichen, mit deren Hilfe die nachteiligen Auswirkungen des nicht optimalen Betriebes auf die Lichtqualität und die Lebensdauer der Lampe abgefangen werden.

Hierzu wurden Experimente und Modellrechnungen durchgeführt. Zur Charakterisierung des Plasmas werden spektroskopische, pyrometrische und andere optische Untersuchungen sowie elektrische Messungen der Lampenparameter vorgenommen. Insbesondere sollte ein Verständnis der Beiträge der einzelnen im Plasma enthaltenen Komponenten zur Gesamtabstrahlung erzielt und eine Energiebilanz der Entladung in der Dimmphase aufgestellt werden. Dies erfolgt durch Messung von Temperatur- und Teilchendichteverteilungen im Plasma, durch Spektrensimulation der Abstrahlung wichtiger Spektrallinien sowie durch Berechnung der Entmischung im Plasma und Lösung der Energiebilanz. Experimente und Modellrechnungen zum Durchschlag sollten Möglichkeiten zum Zünden von HID-Lampen bei hohen Xenon Drücken untersuchen. Insgesamt sollten die Ergebnisse der Messungen und Rechnungen neben dem Verständnis der Entladung zu einer Optimierung des Betriebs führen.

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

Einer der Schwerpunkte des INP ist seit vielen Jahren die Erforschung von Hochdrucklampenplasmen. Dadurch verfügt das INP über ein hohes Maß an Erfahrung sowohl bei der physikalischen Beschreibung und numerischen Modellierung von Lampenplasmen als auch bei der Messung relevanter spektroskopischer, elektrischer und thermischer Lampenparameter. Wie Osram war es bereits Teilnehmer an verschiedenen BMBF-Projekten [4-7] und hat dabei seine Fachkompetenz und projektorientierte Arbeitsweise in einer langjährigen erfolgreichen Partnerschaft unter Beweis gestellt [13-21].

In unserer Abteilung waren zu Beginn des Projekts bereits große Teile des Equipments für die elektrischen, optischen, pyrometrischen und spektroskopischen Messungen vorhanden und sind durch Kauf eines schnellen Pyrometers und einer CCD Kamera erweitert worden. Weiterhin konnte zum Teil auf existierende Programme für die Berechnung von Linienprofilen zurückgegriffen werden.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Fachlich war das Vorhaben in die drei Teilaspekte Dimmen, Durchschlag und Heißwiederzünden gegliedert. Zur Bearbeitung im Teilvorhaben waren je ein Physiker für die Modellierung und für die Experimente vorgesehen. Herr Dr. M. Wendt stand von Beginn an für die Arbeiten im Projekt zur Verfügung, Frau S. Peters ab März 2005. Herr Dr. S. Hadrath arbeitete für 3 Monate im Sommer 2006 im Projekt mit, Herr Dr. R. Kozakov und Herr M. Spiller als Techniker in der Projektverlängerung 2008. Zusätzlich waren Studenten an Experimenten beteiligt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen wurden auf halbjährig stattfindenden Projekttreffen vorgestellt. Weiterhin wurden auf Arbeitstreffen bei Osram aktuelle Ergebnisse und Daten diskutiert und das weitere Vorgehen abgestimmt. Von Osram wurde eine Vielzahl von verschiedenen Versuchslampen gefertigt und mit diversen Füllungen versehen.

Auf dem Meilensteintreffen im Juni 2006 in München waren die Ergebnisse des TV erfolgreich präsentiert worden. Die Fortführung des Projektes wurde beschlossen. Der Arbeitsplan wurde

dahingehend modifiziert, dass aufgrund von intensiven Untersuchungen und Erkenntnissen zum Heisswiederzünden in HID-Lampen bei Sylvania und in Absprache mit dem Projektpartner auf die geplanten Arbeitspakete (AP) zum Heisswiederzünden verzichtet wurde. Stattdessen wurden die in der ursprünglichen Planung kürzer angesetzten Untersuchungen zum Durchschlag ausgedehnt, die sich von großer Bedeutung für das Vorhaben herausstellten. Zusätzlich sind in der Projektverlängerung Arbeiten zum Oberflächendurchschlag geleistet worden.

Die Ergebnisse des Projektes sind auf verschiedenen Tagungen in Form von Vorträgen und Postern präsentiert worden, verbunden mit folgenden Auslandsdienstreisen:

- COST Model Inventory Workshop, Funchal, Portugal, April 2005
- XXVII ICPIG, Eindhoven, NL, Juli 2005
- Licht 2006, Bern, Schweiz, September 2006
- XXVIII ICPIG, Prag, Tschechien, Juli 2007
- Workshop on streamers, sprites, leaders, Leiden, NL, Oktober 2007

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

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

HID besitzen hervorragende Eigenschaften wie hohe Effizienz, hohe Leuchtstärke, lange Lebensdauer usw. finden aber in der Allgemeinbeleuchtung im privaten Wohnbereich noch keinen entsprechenden Eingang. Da liegt vor allem daran, dass sie nur in sehr geringem Maße dimmbar sind, dass sie nach dem Start erst nach etwa 1 min Licht abgeben und erst nach etwa 5 min ihre volle Lichtleistung haben.

Seit April 2003 werden z.B. von der Firma Philips elektronische Vorschaltgeräte angeboten (HID-Dynavision DALI 70-150 W SON/CDM [3]), die ein Dimmen von HID-Lampen von 100 auf 60 % der Nennleistung ermöglichen. Dieses Ziel wird ohne substanzielle Änderungen an der Lampe oder der Betriebsweise erreicht und dient vorrangig der Energieeinsparung während eines „Sparbetriebs“ in der Außenbeleuchtung. Dabei wird der Lichtstrom auf etwa 50 % reduziert und eine deutliche Farbverschiebung in Kauf genommen. Das Sinken des Lichtstroms um den Faktor 2 wird physiologisch noch nicht als deutliches Dimmen empfunden. Eines der Ziele des beantragten Projekts ist es, die Grundlagen für ein Dimmen auf unter 30 % der Leistung zu schaffen. Dies stellt qualitativ und technisch einen deutlich höheren Anspruch an die HID-Lampe.

Für die weiteren Ziele des Projektes (Sofortlicht, Heißwiederzündung) gibt es nur einige wenige spezielle technische Realisierungen, wie z.B. „Powerzündung“ bei Automobillampen oder in Videoprojektoren mit Zündspannungen von bis zu 25 kV und extrem großen Startströmen, die spezielle Installationen benötigen und dadurch im Bereich der Allgemeinbeleuchtung nicht anwendbar sind. Es gibt noch keine gesicherten Ansätze, wie solche Verfahren in geeigneter Weise für HID-Lampen der Allgemeinbeleuchtung nutzbar gemacht werden können, ohne z.B. ihre Lebensdauer deutlich zu verkürzen.

Für einzelne Problemstellungen des Projekts gibt es zwar einige technische Realisierungen, diese sind jedoch auf Spezialgebiete beschränkt und nehmen an anderer Stelle Nachteile in Kauf. Zudem benötigen sie spezielle Installationen und sind dadurch im Bereich der Allgemeinbeleuchtung nicht anwendbar [1-3].

Spezielle Fragen zu Hochdruckplasmen, die auf Plasmalampen anwendbar sind, werden seit langem in der Literatur behandelt. Methoden zur Temperatur- und Druckbestimmung in Hochdruckplasmen werden in [8, 20-27, 31] beschrieben. Fragen zur Entmischung werden

z.B. in [22, 47] behandelt. Viele Arbeiten beschäftigen sich mit Elektroden in HID [21, 25, 48-51]. Arbeiten zum Durchschlag in Hochdruckentladungen findet man z.B. in [9-12, 32-39] zu Gleitentladungen in [40-46].

I.4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur

- [1] Osram-Katalog + Philips-Katalog.
- [2] Ankündigung Philips Light Fair.
- [3] http://www.eur.lighting.philips.com/int_en/oem/ca/general/highlights/dynavision
- [4] Industrielles Verbundprojekt: *Grundlagenuntersuchungen zu neuartigen Füllungen für Hochdrucklampen und Wechselwirkung mit Gefäßwänden*, FKZ: 13N7411.
- [5] Industrielles Verbundprojekt: *Grundlagenuntersuchungen zu Hg-freien Kurzbogen-Hochdrucklampen für Fahrzeug-Scheinwerfer*, FKZ: 13N8069.
- [6] Industrielles Verbundprojekt: *Grundlegende Charakterisierung von Elektroden für zeitveränderliche Energieeinkopplung in umweltfreundliche Hochdruck-Plasmalampen* FKZ: 13N7762.
- [7] Industrielles Verbundprojekt: *Energieeffiziente Hg-freie Hochdrucklampen* FKZ: 13N8261.
- [8] Engel, A. v., Steenbeck, M., *Elektrische Gasentladungen*, Springer Verlag Berlin (1934), Bd.2.
- [9] Liland, K. B., *Transient evolution of low pressure glow discharges with application to discharge lamps*, PhD-Theses, University of Tromsø (1997).
- [10] Lay, B.; Moss, R. S.; Rauf, S.; Kushner, M. J.: Breakdown processes in metal halide lamps. *Plasma Sources Sci T* 12 (2003) 1, 8-21
- [11] Lay, B., Moss, R.S., *Breakdown processes in metal halide lamps*, *Plasma Sources Sci. Technol.* **12**, 8-21(2003).
- [12] Brok, W.J.M., Dijk, J. van, et al., *A model study of propagation of the first ionization wave during breakdown in a straight tube containing argon*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36**, 1967–1979 (2003).
- [13] Kettlitz, M., and Oltmanns, P., *Shift of the Na I 467- and 498-nm lines in a dense plasma*, *Phys. Rev. E* **54**, 6741-6745 (1996).
- [14] Hartel, G., Kettlitz, M., Schöpp, H. and Serick, F., *Pulsed alkali pump light sources for Nd:YAG lasers*, *Optics and Laser Technology* **28**, 437-443 (1996).
- [15] Hartel, G. and Schöpp, H., *Determination of the radial temperature profile in a high-pressure mercury discharge using the electrical conductivity*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29**, 2881-2884 (1996).
- [16] Kindel, E., Kettlitz, M., Schimke, C. and Schöpp, H., *Application of the hook method and emission spectroscopy for the determination of radial density and temperature profiles in high-pressure mercury discharges*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31**, 1352-1361 (1998).
- [17] Hartel, G., Schöpp, H., Hess, H. and Hitzschke, L., *Radiation from an alternating current high-pressure mercury discharge: A comparison between experiments and model calculations*, *J. Appl. Phys.* **85**, 7076-7088 (1999).

- [18] Kloss, A., Schneidenbach, H., Schöpp, H., Hess, H., Hitzschke, L. and Schalk, B., *Electrode-sheath voltages in high-pressure mercury arcs*, J. Appl. Phys. **88**, 1271-1275 (2000).
- [19] Kloss, A., Schneidenbach, H. and Hess, H., *Electrode sheath voltage in pulsed high-pressure mercury arcs*, Appl. Phys. Lett. **78**, 3027-3028 (2001).
- [20] Kettlitz, M. and Grossjohann, R., *On the plasma constriction close to the electrodes of high-pressure mercury and sodium lamps*, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, 1702-1706 (2002).
- [21] Pursch, H., Schoepp, H., Kettlitz, M. and Hess, H., *Arc attachment and fall voltage on the cathode of an ac high-pressure mercury discharge*, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, 1757-1760 (2002).
- [22] Dakin, J.T., Gillard, R.P., *Model and diagnostics of high-pressure mercury discharge with sodium iodide additives*, J. Appl. Phys. **60**, (1986) 1281-1288.
- [23] Funk, W., Kloss, H.-G., Serick, F., *Temperaturbestimmung nach Bartels an einer Quecksilberhochdruckentladung mit Thalliumjodidzusatz*, Beitr. Plasmaphys. **10**, (1970) 487-496.
- [24] Karabourniotis, D., *Plasma temperature determination from the maximum intensity of a symmetric self-reversed line*, J. Phys. D: Appl. Phys. **16**, (1983) 1267-1281.
- [25] Jüttner, B., *Cathode spots of electric arcs*, J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, (2001) R103-R123.
- [26] Bartels H., *Zeitschrift für Physik* **127** (1950), 243 und **128** (1950), 546.
- [27] Stormberg H.-P., *J. Appl. Phys.* **51** (4), (1980) 1963-1969.
- [28] Peach G., *Adv. Phys.* **30** (3), (1981) 367-474.
- [29] Al'Saqabi B. N. I. und Peach G., *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **20**, (1987) 1175-1191.
- [30] Murphy M. A., *Phys. Rev. E* **48** (5), (1993) 3594.
- [31] Unsöld A., "Physik der Sternatmosphären: mit besonderer Berücksichtigung der Sonne", Springer, Berlin (1968).
- [32] Ebert, U., (*Phys. Rev. E* **55** (1997) 1530).
- [33] Ebert, U.; Montijn, C. ; Briels, T.M.P.; Hundsdorfer, W.; Meulenbroek, B.; Rocco, A. ; Veldhuizen, E. M. v.: *The multiscale nature of streamers. Plasma Sources Science and Technology* (2006), 25.
- [34] Ebert, U., *Plas. Sources Sci. Tech.* **15** (2006) 118.
- [35] Briels, T. M. P.; Veldhuizen, E. M. v.; Ebert, U.: *Positive streamers in air and nitrogen of varying density: experiments on similarity laws. Journal of Physics D: Applied Physics* (2008)
- [36] Briels, T.M.P., Veldhuizen, E.M.v., Ebert, U.: *Branching of Positive Discharge Streamers in Air at Varying Pressures. IEEE Transactions on Plasma Science* **33** (2005), 2.
- [37] Moss, R. S.; Eden, J. G.; Kushner, M. J.: *Avalanche processes in an idealized lamp: I. Measurements of formative breakdown time. J Phys D Appl Phys* **37** (2004) 18, 2502-2509.
- [38] Bhoj, A. N.; Kushner, M. J.: *Avalanche process in an idealized lamp: II. Modelling of breakdown in Ar/Xe electric discharges. J Phys D Appl Phys* **37** (2004) 18, 2510-2526.

- [39] Raizer Yu P 1991 Gas Discharge Physics (Berlin: Springer).
- [40] Trusov, K. K., J. Phys. D: Appl. Phys. **40** (2007) 786–794.
- [41] Adalev, A. S.; Hayakawa, M.; Korovkin, N. V.; Iudin, D. I.; Trakhtangerts, V. Yu.: Simulation of surface discharge dynamics by means of cellular automata. Journal of Applied Physics **101** (2007), 083302-1 – 10.
- [42] A Shvydky, V P Nagorny and V N Khudik, J. Phys. D: Appl. Phys. **37** (2004) 2996–2999.
- [43] Dubinov, A. E., Plasma Sources Sci. Technol. **9** (2000) 597–599.
- [44] Atanasov, P. A., Vasilev, S. G., Kovalyov, I. O., Kuzmins, G. P. and Nesternko, A. A., J. Phys. D: Appl. Phys. **21** (1988) 1750-1754.
- [45] Arad, B., Gazit, Y. and Ludmirsky, A., J. Phys. D: Appl. Phys. **20** (1987) 360-367.
- [46] Rutkevich, I. M.: Structure of grazing discharge front. Zh. Tekh. Fiz. **56** (1986), 1419-1422.
- [47] Nimalasuriya, T.: Transport phenomena in metal-halide lamps a poly-diagnostic study. Dissertation, TU Eindhoven (2007)
- [48] Benilov, M S; Cunha, M. D.: Heating of refractory cathodes by high-pressure arc plasmas: J Phys D Appl Phys Teil I: **35** (2002), 1736-1750, Teil II **36** (2003), 603-614
- [49] Hartmann, T.: Die Leistungsbilanz von Elektroden in effizienten Hochdruck-Entladungslampen. Dissertation, TU Berlin (2002)
- [50] Dabringhausen, L.: Charakterisierung von Elektroden für Hochdruck-Plasmalampen durch Pyrometrie und Simulation. Dissertation RU Bochum (2004)
- [51] Lichtenberg, S.: Charakterisierung von Elektroden für Hochdruck-Plasmalampen durch elektrische Messungen und Modellierungen. Dissertation (2004)
- [52] Loffhagen, D., Winkler, R., A New Nonstationary Boltzmann Solver in Self-Consistent Modelling of Discharge Pumped Plasmas for Excimer Lasers, *J. Comp. Phys.* **12**, 91-101 (1994).
- [53] Belasri, A., Boeuf, J.P., Pitchford, L.C., Cathode sheath formation in a discharge-sustained XeCl laser, *J. Appl. Phys.* **74** 1553-1567 (1993).

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 umgehend reagiert. Die Messungen wurden in enger Zusammenarbeit abgestimmt und die Erkenntnisse in Veränderungen bei neuen Lampen umgesetzt. In der Anfangsphase erfolgte ausschließlich bei Osram die Berechnung von Plasmazusammensetzungen, welche später mit den im INP begonnenen Rechnungen verglichen wurden. Die Druckbestimmung in den Lampen erfolgte bei den Partnern zum Teil nach verschiedenen Verfahren und wurde in einem Methodenabgleich vervollkommenet. Bei Osram wurde das Elektrodenverhalten während des Dimmvorgangs in Modelle implementiert und mit Messungen am INP verglichen. Dieses gemeinsame Vorgehen war sowohl für unsere Rechnungen als auch Messungen notwendig.

Parallel zum Projekt sind an der RU Bochum in Kooperation mit Osram/AM Untersuchungen zum Durchschlag an Hg-freien Autolampen durchgeführt und von Dr. M. Czichy in einer Promotion zusammengefasst worden. Im INP sind ebenfalls Messungen an D4 Lampen mit reiner Xe Füllung durchgeführt und mit diesen verglichen worden. Außerdem erfolgte ein regelmäßiger Austausch zu messtechnischen Fragen zum Durchschlag.

Eine erfolgreiche Durchführung des Projekts war nur in enger Kooperation möglich.

II. Eingehende Darstellung

II.1. Erzielte Ergebnisse

II.1.1. Experimenteller Aufbau und Versuchslampen

II.1.1.1. Experimenteller Aufbau

Elektrische Versorgung und Messungen

Der Lampenbetrieb erfolgte in vertikaler Brennlage mit einem Rechteckstrom von 120 Hz (Standardbetrieb). Hierzu erzeugte ein Funktionsgenerator (HP33120A, Agilent) eine Rechteckspannung, die über einen Leistungsverstärker als Stromquelle (FM1295, FM Elektronik Berlin) in die Lampe eingekoppelt wurde. Aussagen zur Leistungsaufnahme und zu teilweise auftretenden Wiederspitzten ließen sich aus dem Strom- und Spannungsverlauf ermitteln. Für die Strom- und Spannungsmessung wurden Tektronix Oszilloskope (TDS7800) und zugehörige Stromzangen (TCP202) und Tastköpfe (P5205) verwendet.

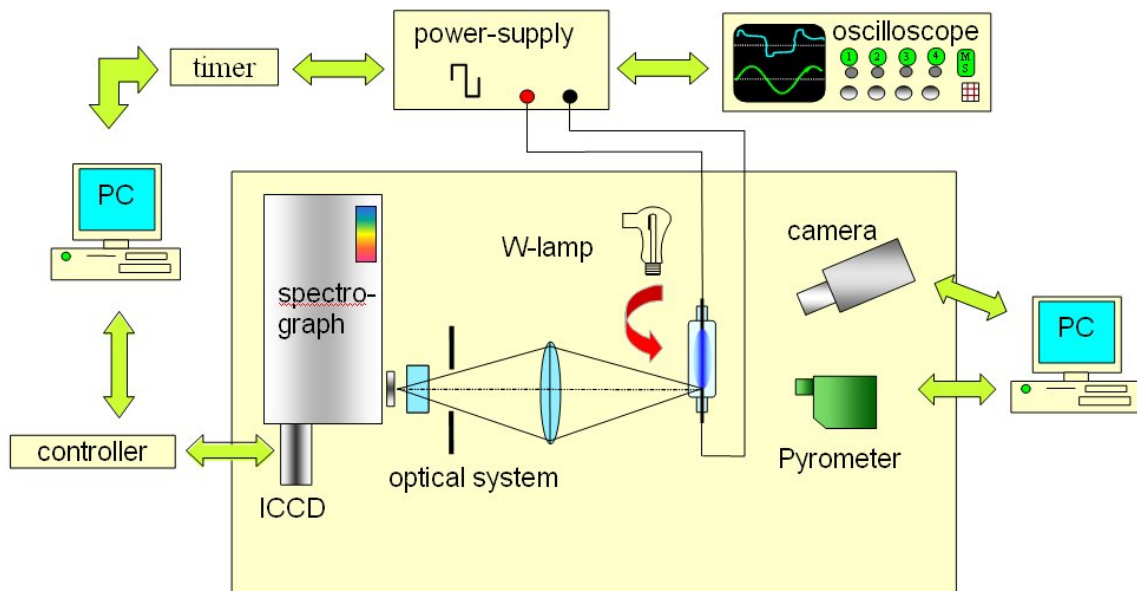


Abb. 1: Experimenteller Aufbau zur Emissionsspektroskopie und Pyrometrie.

Lichtstrom und Farbdaten

Die lichttechnischen Messungen wurden in einer Ulbricht-Kugel (1,5 m Durchmesser, LMT Lichtmesstechnik Berlin) durchgeführt. Ein mit Normallampen kalibriertes Photometer (Lichtmesstechnik Berlin) hat den Lichtstrom gemessen. Zur Bestimmung des allgemeinen Farbwiedergabeindex $R_a(8)$ und der Farbtemperatur T_n wurden ein an die Ulbricht-Kugel angeschlossenes Spektrometer (AH4000, 367 – 740 nm, American Holographic) verwendet und die gemessenen Spektren ausgewertet.

Pyrometrische Messungen

Um die Temperaturverteilung der Elektroden zu messen, hat ein Schrittmotor das verwendete Pyrometer (IS10, IMPAC) entlang der Elektrode bewegt. Das Pyrometer ist in einem Wellenlängenbereich von 700 nm bis 1100 nm spektral empfindlich und überstreicht einen Messbereich zwischen 800 °C und 3500 °C. Der Durchmesser des Messflecks betrug 0,3 mm. Bei den finalen Messungen wurden die Temperatur-Profile wegen der besseren Ortsauflösung und der Abschirmung der Elektrodenstrahlung vom Lampenplasma nur noch spektroskopisch bei 790 nm mit dem OES-Aufbau bestimmt.

Emissionsspektroskopie (OES)

Entsprechend dem in Abb. 1 gezeigten Versuchsaufbau wurde der Lampendurchmesser im Verhältnis 1:1 auf den Eintrittsspalt eines 1m-Spektrographen (AM510, Acton) mit angeschlossener ICCD-Kamera (1024 x 1024, Proscan) abgebildet. Die Intensitätskalibrierung erfolgt mit einer Wolfram-Bandlampe (Osram), während für die Wellenlängenkalibrierung verschiedene Referenzlampen (Pen-Ray, LOT) verwendet wurden.

Zur Messung radialer Temperaturverläufe wurden die optisch dicke Hg Linie bei 546 nm und die Tl Linie bei 535 nm, die Selbstumkehr zeigten, herangezogen. Nach Entfaltung mit dem gemessenen Apparateprofil ist die Plasmatemperatur mittels der Bartelsmethode [26] aus der Intensität der Umkehrkuppen berechnet worden. Die Bestimmung des Hg-Partialdrucks erfolgte anhand der optisch dünnen Hg Linien bei 577/579 nm. Alle Temperaturverläufe wurden mittig zwischen den Elektroden gemessen.

Aufbau Zünden

Für die Zündexperimente sind Spannungsquellen mit positiven Ausgangsspannungen bis zu 40 kV verwendet worden. Zur Erzeugung unterschiedlich schneller Spannungsanstiegsflanken im Bereich von 1 MV/s bis 100 GV/s wurden verschiedene Zündgeräte verwendet (Osram-EVG/AM, Zündspule, HV-Netzteil + Behlke-Schalter). Die elektrischen Größen wurden mit schnellen Spannungs- (Tektronix P6015A) und Stromsonden (Pearson 2877 + 2878) gemessen. Außerdem wurde die räumliche und zeitliche Entwicklung des Durchschlags mit einer Framingkamera (Imacon468, 4 Kanäle) beobachtet. Dadurch waren Bildfolgen von 4 Bildern zu einem Vorgang mit einer minimalen Belichtungszeiten von 10 ns möglich. Um den Einfluss von UV-Strahlung auf das Durchschlagsverhalten zu ermitteln, konnten die Versuchslampen auch mit einer 17 W Hg-Niederdruckentladung bestrahlt werden. Die Dampfdrücke von zusätzlichen Füllsubstanzen (neben Xe noch Hg, NaI, I) wurden durch externe Erwärmung mittels eines Heizkastens kontrolliert.

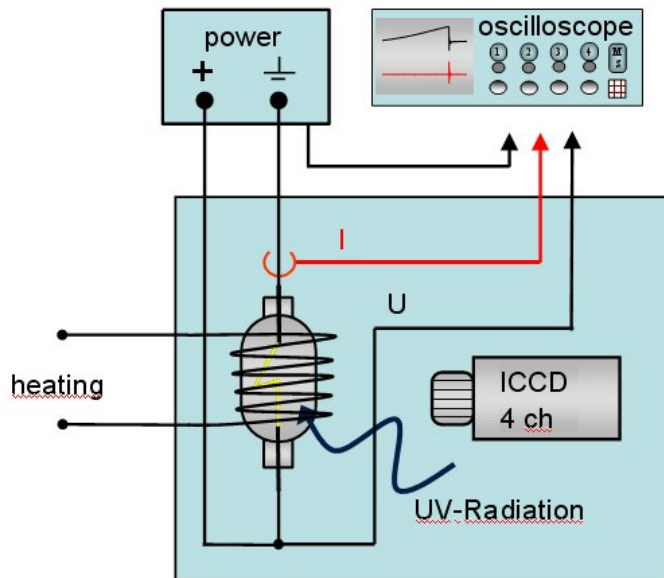


Abb. 2: Experimenteller Aufbau Zünden.

II.1.1.2. Lampen

Für die Untersuchungen zum Dimmen wurden von Osram zahlreiche Versuchslampen mit unterschiedlichem Innendurchmesser und diversen Füllung hergestellt. Brenner und Hüllkolben wurden aus Quarzglas gefertigt (Abb. 3). Der Innendurchmesser der Brenner betrug 8 mm oder 12 mm. Die Wolfram-Stift-Elektroden besaßen einen Abstand von 18,8 mm und der Elektrodendurchmesser wurde zwischen 0,5 mm und 0,7 mm variiert. In den gestauchten Endräumen des Lampenkörpers waren die Elektroden gut sichtbar, so dass sich Elektrodentemperaturen pyrometrisch erfassen ließen (s. Abb. 1). In allen Lampen wurde Ar als Startgas verwendet. Außerdem wurden Lampen mit variierender Hg-Zumischung und Zugabe von Selten-Erdjodiden gefertigt.



Abb. 3: HID-Lampe für Untersuchungen zum Dimmen.

Für Zünduntersuchungen wurden andere Lampen als zum Dimmen verwendet. Um einen Volumendurchschlag zu garantieren, wurden Modelllampen/Z (Abb. 4) aus Quarzrohr mit einem Durchmesser von 19 mm bei Osram gefertigt. Der Elektrodenabstand betrug 5 mm und der Durchmesser der verlängerten BSD-Elektroden 0,5 mm. Die Lampen waren mit 0,1 bis 5 bar Xe gefüllt. Außerdem wurden bei Osram Lampen mit 5 bar Xe und Zusätzen von 1 mg entweder Hg, I oder NaI hergestellt.

Zusätzlich wurden D4-(Vorstadium)-Lampen ohne Leuchtzusätze untersucht. Diese Lampen bestehen aus Quarz ($\varnothing = 4$ mm), haben G7-Elektroden ($\varnothing = 0,25$ mm, Gap = 4 mm) und waren mit 5, 10 und 15 bar Xe gefüllt. Aufgrund der Geometrie treten hier sowohl Volumendurchschläge als auch Durchschläge, die teilweise an der Lampenwand entlang laufen, auf. Mit beiden Lampenkonfigurationen wurde ein großer Druckbereich überstrichen.

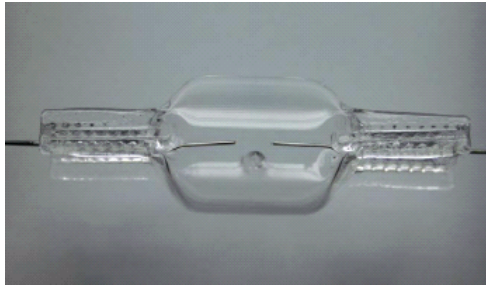


Abb. 4: Modelllampe für Zündexperimente.

Für die Zündexperimente an Oberflächen wurden bei Osram Speziallampen gefertigt. Sie bestehen aus einem Quarzkolben ($\varnothing_i = 12 \text{ mm}$) und waren mit 4,5 bar Xe gefüllt. Kernstück der Modelllampe ist ein Keramik- bzw. Quarzplättchen (1 mm dick), das zwischen 2 Wolframdrähten ($\varnothing = 0,35 \text{ mm}$) aufgehängt ist, welche als Elektroden dienen (Abb. 5). Der Elektrodenabstand ist durch Bohrungen in den Plättchen vorgegeben und betrug ca. 4 mm. Die Versuche haben gezeigt, dass die gewählte Konstruktion die gewünschten Experimente ermöglichen und der Funken Kontakt zur Oberfläche hat.

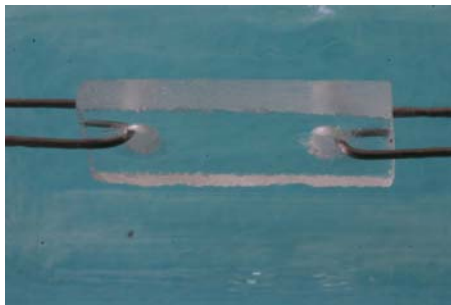


Abb. 5: Modelllampe für Zündexperimente an Oberflächen.

II.1.2. Experimente zum Dimmen von HID Lampen (AP1 – 3)

In AP1 bis AP3 sind experimentelle Arbeiten, in AP4 theoretische Arbeiten durchgeführt worden. Ziel der experimentellen AP war die Gewinnung lichttechnischer Daten und die Charakterisierung des Elektroden- sowie des Plasmaverhaltens von Modelllampen mit reduzierter (Hg, NaI), erweiterter (Hg, NaI, CeI₃, AlI₃, Xe, TmI₃) und konventioneller Füllung (MHK4: Hg, NaI, TII, Selten-Erdjodide).

Dazu wurden von Osram diverse Versuchslampen mit unterschiedlichem Innendurchmesser und variierender Füllung hergestellt. Der Brennerdurchmesser wurde von 12 auf 8 mm verringert, um den Einfluss der Wand auf das Plasma zu untersuchen und höhere Cold-Spot Temperaturen zu erreichen. Außerdem wurden der Einfluss der Hg-Zumischung und die Zugabe von Selten-Erdjodiden untersucht. Es wurden Vergleiche der lichttechnischen Größen mit 150 W-Glühlampen und -Keramiklampen vorgenommen.

Der Lampenbetrieb erfolgte in vertikaler Brennlage mit Gleich- und Rechteckstrom (120 Hz).

Von Interesse waren die leistungsabhängigen Grenzen, in denen sich die Lampen betreiben lassen und die jeweils abgestrahlte Strahlungsleistung sowie die Parameter des Lampenplasmas. Daher wurden für einzelne Dimmstufen neben den elektrischen Daten auch die Strahlungseigenschaften der Lampen gemessen. Die Messungen erfolgten in einem Leistungsreich von 40 bis 180 W.

AP1 Modelllampe mit reduzierter Füllung

Die Modelllampe mit einer reduzierten Füllung (Hg/NaI) ist so gewählt worden, dass sie sich in den interessierenden Charakteristiken ähnlich einer Lampe mit vollständiger Füllung verhält, aber nur Hg sowie Na für die Abstrahlung und Energiebilanz verantwortlich sind. Diese Vereinfachung ermöglicht einen besseren Vergleich mit dem Modell. Die visuellen Beobachtungen der Lampen zeigten sowohl radiale als auch axiale Entmischung, die bei Leistungsreduktion zunahm. Gleichzeitig kontrahierte die Entladung.

In den Übersichtsspektren (U-Kugel) dominieren Hg und Na Linien. Mit sinkender Leistung (180 \Rightarrow 50 W) kondensiert NaI verstärkt aus und die Entladung wird von Hg dominiert, was zu einer Blauverschiebung im Spektrum führt. Daraus resultiert ein Anstieg in der Farbtemperatur von ca. 3000 K auf 7000 K. Der Farbwiedergabeindex bleibt unverändert schlecht bei ca. 30. Die Lichtausbeute fällt von 80 auf 20 lm/W. Ein Einfluss des Brennerdurchmessers auf die Farbdaten ist nicht eindeutig erkennbar. Eine Füllungsvariation mit sinkendem Hg-Anteil führt zu geringeren Farbtemperaturen und einer stark verminderten Lichtausbeute.

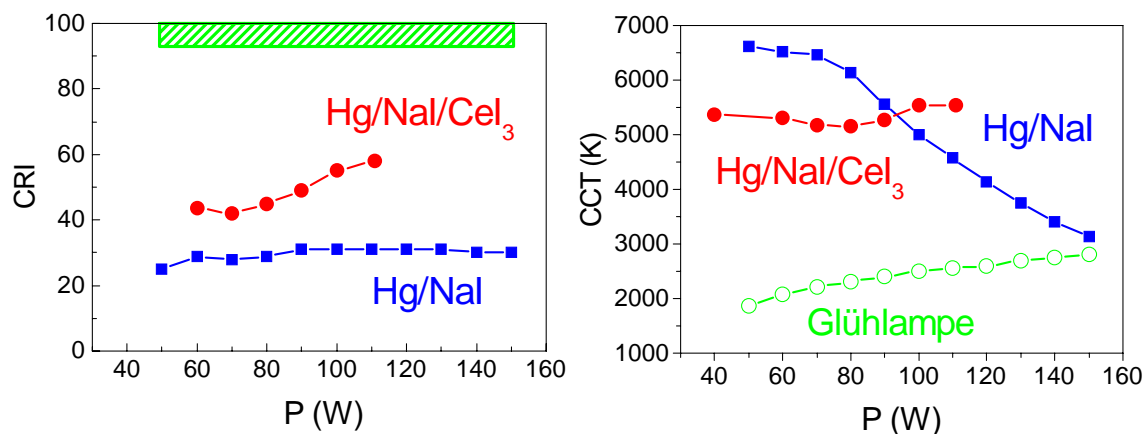


Abb. 6: Verhalten von Farbwiedergabe (CRI) und Farbtemperatur (CCT) für eine Glühlampe, eine Lampe mit Hg/NaI- und Hg/NaI/CeI₃ Füllung während einer Leistungsreduktion von 150 auf 50 W.

Die Plasmatemperatur im Bogenkern steigt bei Leistungsreduktion leicht von 5750 K auf 5900 K an und die T-Profile schnüren ein. Der Hg-Partialdruck fällt bei Leistungsreduktion. Vergleiche von OES Experimenten mit Liniensimulationen und Resonanzmessungen bei Osram stimmen gut überein (Abb. 8).

Die Temperatur der Elektroden fällt monoton mit sinkendem Strom. Der Bogenansatz ist vorwiegend diffus.

AP2 Neue Betriebsweise von Modelllampen mit reduzierter Füllung

Die Stromform wurde sowohl für Lampen mit reduzierter wie kompletter Füllung variiert. Es wurde sowohl mit Rechteck- wie Sinusspannung gearbeitet und die Frequenz wurde im Bereich von 50 bis 500 Hz variiert. Ein Betrieb mit Rechteckspannungen wirkt sich wegen der geringeren Wiederzündspitzen im Vergleich zu Sinusspannungen positiv auf ein stabiles Lampenverhalten aus. Gleichspannungsbetrieb hingegen führt zu einer Zunahme der axialen Entmischung verglichen mit Rechteckbetrieb bei 120 Hz. Für Lampen mit reduzierter Füllung liegt die Farbtemperatur bei DC deutlich über der bei Rechteckbetrieb und die Lichtausbeute ist geringer. Beides spricht für einen Rechteckbetrieb. Weitere Untersuchungen zur Stabilität der Entladungen bei Frequenzvariation wurden bei Osram vorgenommen.

Für ein optimales Elektrodenverhalten wäre ein Gleichspannungsbetrieb besser geeignet, da hier der Wechsel von Kathoden- und Anodenphase wegfällt und damit der Wechsel zwischen verschiedenen Elektrodentemperaturen in den Phasen bei unterschiedlicher Leistungseinspeisung. Dadurch könnte das Abdampfen von Wolfram im Vergleich zum Rechteckbetrieb bei Leistungsvariation vermindert werden. Hierzu sind umfangreiche Rechnungen wie Experimente bei Osram vorgenommen worden.

AP3 Lampen mit kompletter Füllung

Auch Lampen mit MHK4 Füllung zeigen sowohl radiale als auch axiale Entmischung, die bei Leistungsreduktion zunimmt. Gleichzeitig kontrahiert die Entladung. Einen visuellen Eindruck des Lampenverhaltens unter Leistungsminderung vermittelt Abb. 7. Im Bereich der Nominalleistung zeigt das Plasma einer MHK4-Lampe ein weißes Erscheinungsbild mit rötlichem Saum, d.h. es tritt Entmischung auf. Zu kleinen Leistungen hin tritt eine Verschiebung ins Grün-Blaue auf. Mit abnehmendem Lampenstrom sinkt die Wandtemperatur des Brenners. Infolgedessen kondensieren abhängig von ihrem jeweiligen Dampfdruck einzelne Füllungsbestandteile aus. Im Falle der kommerziellen Füllung ist die Farbverschiebung entlang der Elektrodenachse deutlich sichtbar. Gleichzeitig schnürt das Plasma entlang der Elektrodenachse ein.

Übersichtsspektren (U-Kugel) der MHK4-Lampe bestätigen den visuellen Eindruck. Bei 180 W weist das Spektrum ein breites Kontinuum mit dominanten Linien von Hg, Tl und Na auf. Mit abnehmender Leistung sinkt das Kontinuum, zugleich verändert sich das Verhältnis der Linien zugunsten von Hg. Unterhalb von 90 W waren die intensiven Na D Linien im Spektrum nicht mehr eindeutig erkennbar, so dass bei 60 W ein Hg Linienspektrum mit einer schwachen Tl Linie vorlag. Infolge der Blauverschiebung im Spektrum stieg die Farbtemperatur nahezu linear von ca. 5000 K auf 7000 K an. Gleichzeitig sank der Farbwiedergabeindex von 77 auf 23 und der gemessene Lichtstrom fiel auf ein Drittel des Wertes von 180 W ab.

Eine CeI_3 Zugabe zur reduzierten Füllung führte zu einer höheren Farbtemperatur als bei reiner Hg/NaI Füllung (s. Abb. 6). Die Farbtemperatur stieg zu kleinen Eingangsleistungen ebenfalls an. Mit dem Auskondensieren von CeI_3 und NaI fand auch hier der Übergang zu einer Hg-Entladung im Bogenkern statt. In diesem Leistungsbereich war die Farbtemperatur der Lampen mit und ohne CeI_3 vergleichbar. Hg-freie Lampen mit 1 bar Xe, AlI_3 , CeI_3 , NaI zeigten zwar eine schlechte Performance oberhalb 80 W (Drehen, Spotansatz), hatten aber eine fallende Farbtemperatur. Lichtausbeute und Farbwiedergabeindex haben aber noch einen deutlichen Spielraum nach oben.

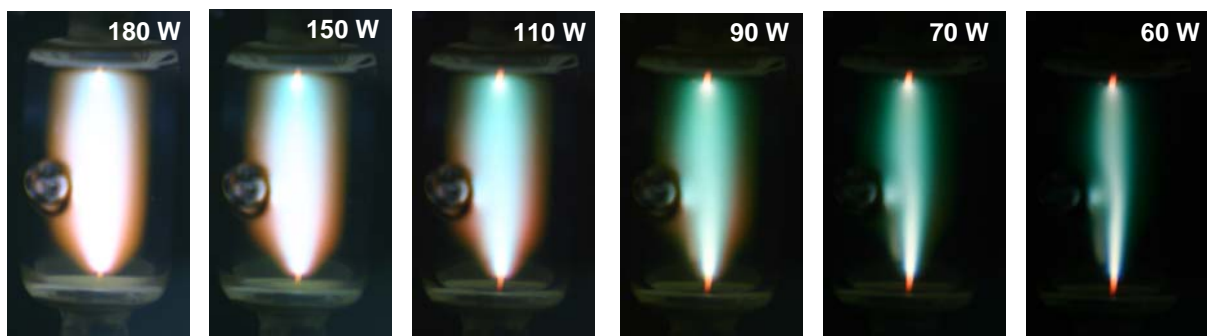


Abb. 7: Visueller Eindruck einer MHK4-Lampe bei Reduktion der Lampenleistung

Für Lampen mit einer kommerziellen Füllung wurde zusätzlich die Tl Linie bei 535 nm zur Diagnostik herangezogen, da sie eine ausgeprägte Selbstumkehr innerhalb des gesamten untersuchten Leistungsbereichs zeigte. Von der Hg 546 nm konnten erst ab Leistungen kleiner 110 W die Umkehrkuppen zur Auswertung herangezogen werden. Ebenso erhöhte sich die Temperatur im Bogenkern, wie bei den Lampen mit einer reduzierten Füllung. Unterhalb von 80 W erfolgte im Bogenkern der Übergang zu einer Hg-Entladung. Als Folge glich sich für kleine Leistungen der Verlauf der Bogenkerntemperatur dem der Hg/NaI-Lampe mit gleichem Radius an.

Im Gegensatz zu Lampen mit reduzierter Füllung lag die Elektrodentemperatur einer Lampe mit CeI_3 im Bereich hoher Leistung bei 2700 K (3000 K bei reduzierter Füllung). Dies kann möglicherweise durch eine Ce-Bedeckung der Elektroden bedingt sein. Ein ähnlicher Effekt trat bei der MHK4 Füllung auf.

Außerdem wurden reine Hg- und Ar-Lampen für einen Vergleich mit den Modellrechnungen zu Elektroden (Osram) und zur Spektrensimulation untersucht.

II.1.3. Modellrechnungen zum Dimmen von HID-Lampen (AP4)

Parallel zu den Messungen erfolgte eine Modellierung des Plasmas in den Versuchslampen. Für die Modellsysteme wurden die Transportgrößen (Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit, Komponentenanteile) berechnet, eine Spektrensimulation wichtiger Spektrallinien vorgenommen sowie die Energiebilanz gelöst. Es erfolgte ein Vergleich der Modellrechnungen mit den gemessenen Spektren und Temperaturverteilungen für Lampen mit Hg/NaI-Füllung.

Durch die Modellrechnungen ergaben sich:

1. eine Erhärtung der im Experiment bestimmten Drücke und Temperaturprofile
2. eine Bestimmung von realistischen Verbreiterungskonstanten der Linien, die zur Diagnostik herangezogen wurden
3. ein vertieftes Verständnis des Strahlungshaushaltes
4. eine Einschätzung des Einflusses der Entmischung auf den Energiehaushalt der untersuchten Lampen während des Dimmens.

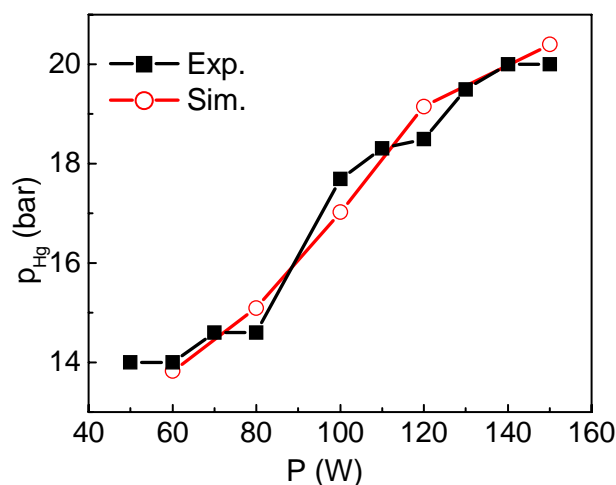


Abb. 8: Veränderung des Gesamtdrucks bei Leistungsvariation, Vergleich von experimentellen Werten aus der Hg 577/579 nm und Werten aus der Liniensimulation der Hg 546 nm.

Die side-on-Spektren können sowohl mit dem Linienprofil von Stormberg [27] als auch dem von Peach [28, 29] gut angepasst werden (Abb. 9). Mit fallender Leistung zeigen sich ein Einschnüren des Temperaturprofils bei gleichzeitiger Erhöhung der Achsentemperatur und ein Fallen des Gesamtdruckes. Drücke und Temperaturprofile stimmen gut mit den experimentellen Werten überein (Abb. 8). Die Wahl des Linienprofils und der Verbreiterungskonstanten hat auf das Temperaturprofil einen geringeren Einfluss als auf den Druck.

Um die Druckbestimmung zu verbessern, wurde ein konsistenter Satz von Verbreiterungskonstanten durch Anpassung einer neu vermessenen reinen Quecksilberlampe ermittelt. Es wurde außerdem der Einfluss der Entmischung auf die Spektrallinien des Natriums in der Hg/Na Entladung untersucht.

Zur Bestimmung des Natrium-Druckes wurden die Mittenspektren der Na D Linien angepasst. Bei hohen elektrischen Leistungen gelang dies gut, bei $P < 80$ W war die Anpassung nicht mehr möglich. Der starke Abfall des Na-Partialdruckes mit fallender Leistung entsprach dem experimentellen Befund.

In reaktiven Gasen und Plasmen kommt es durch eine Kombination von Diffusion und Reaktionen der im Plasma vorhandenen chemischen Spezies zu einer räumlichen Variation der Elementenanteile (Entmischung). Diese wurde berechnet und mit Rechnungen von Osram verglichen. Bei Kenntnis der Elementenanteile im Bogenkern kann die Entmischung bei hohen Temperaturen gut im Modell erfasst werden, da die relevanten Querschnitte in der Regel besser bekannt sind als die Querschnitte der bei niedrigen Temperaturen relevanten Molekülstöße.

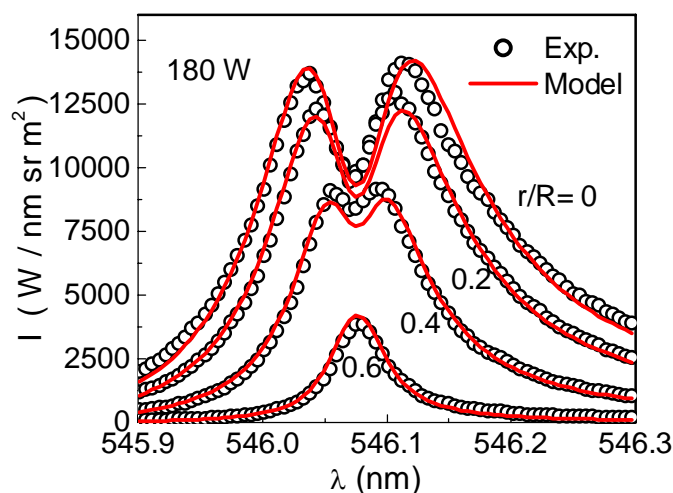


Abb. 9: Vergleich gemessener und durch χ^2 -Minimierung angepasster Spektren der Hg 546 nm für verschiedene Abstände vom Bogenkern.

Die Kuppenintensitäten der Na D Linien werden bei Berücksichtigung der Entmischung vermindert, da im achsfernen Bereich die Absorberdichte erhöht ist. Es empfiehlt sich daher, bei der quantitativen Analyse der Spektren der Leuchtzusätze Entmischung mit einzubeziehen. Außerdem hängt die Kühlung des Bogens durch die Molekülkontinua im achsfernen Bereich ebenso von der Stärke der Entmischung ab.

Der geringere Leistungsinput beim Dimmen führt zu beträchtlichen Änderungen der Verteilung der Temperatur sowie der Plasmakomponenten und damit zu entsprechend modifizierten Lampeneigenschaften. Zur Abschätzung dieser Vorgänge wurde die Energiebilanz einer Quecksilberentladung mit Zusätzen von NaI (Modellampe mit reduzierter Füllung) bei variierender Leistung untersucht.

Die aus den Energiebilanzrechnungen resultierenden Temperaturverteilungen stimmen mit den experimentellen Ergebnissen sehr gut überein. Es wird durch das Modell sowohl der radiale als auch der zeitliche Verlauf der Temperatur während des Dimmens quantitativ wiedergegeben (Abb. 10). Bei Reduzierung der Leistungseinspeisung gewinnt die Molekülstrahlung (im wesentlichen des NaI) im Entladungssaum an Bedeutung. Die entsprechend erhöhte Bogenkühlung in diesen Bereichen führt zur Einschnürung der Entladung. Dabei kann die von außen aufgeprägte elektrische Stromstärke nur durch eine Temperaturerhöhung im Bogenkern gewährleistet werden. Der auf diese Weise verstärkte Energietransport aus dem Kern in das angrenzende Gebiet begrenzt die Ausbildung des Temperatur-"Plateaus" im Bogensaum. Die Absenkung der Temperatur im Plateau-Bereich bewirkt eine Verringerung des Gesamtdruckes und damit eine zusätzliche Änderung der thermodynamischen und Transportparameter, der Entmischung sowie der Strahlung. Dieses komplexe Zusammenspiel der verschiedenen Mechanismen stellt ein allgemeines Charakteristikum des Dimmens auch komplexer Plasmamischungen dar. Eine Verringerung der eingespeisten Leistung führt in der Modelllampe zu einer Dominanz der Strahlung der Puffergasatome (Quecksilber) aus dem Bogenkern. Die Relation zwischen der Atom (Ionen)-Strahlung aus dem Bogenzentrum und der Molekülstrahlung aus den Randbereichen hängt von der jeweiligen Plasmamischung ab. Mit dem gewonnenen Verständnis der Entladungsmechanismen ist eine wesentliche Voraussetzung für die Optimierung des Dimmverhaltens in technisch relevanten Lampenplasmen (modifizierte Betriebsweisen, Lampenfüllungen, Lampengeometrien) gegeben.

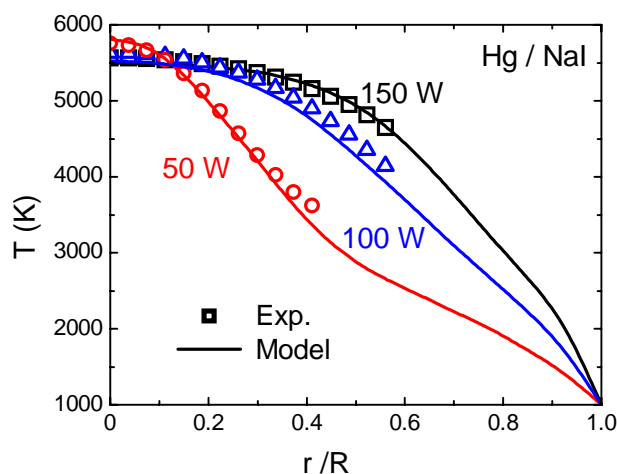


Abb. 10: Vergleich von gemessenen und aus der Energiebilanz berechneten Plasmatemperatur-Profilen für eine Hg/NaI-Entladung.

Die gezeigten Ergebnisse lassen folgende Hinweise für eine dimmbare Lampe zu. Aussichtsreich wäre:

- ein Übergang zu kleinem Brennerdurchmesser (höherer Dampfdruck möglich)
- das Verwenden von Keramik (höhere Wandbelastung möglich)
- das Verwenden von Hg-armen oder -freien Füllungen (bessere Farbtenenz möglich)
- ein Betreiben der Lampen mit Rechteckspannungen.

Zur Umsetzung in ein fertiges Produkt sind weitere, umfangreiche Untersuchungen notwendig.

II.1.4. Experimente zum Zünden (AP5 – 7)

Die ursprünglich geplanten Arbeiten sind während des Projektverlaufs im Umfang erheblich erweitert worden. Im Zentrum der Untersuchungen zum Durchschlag stand die Frage der Abhängigkeit der Zündspannung vom Xenon Fülldruck p_{Xe} , von der Art der Zumischung (verschiedene Lampen), von der Steilheit der Spannungsanstiegsflanken ($dU/dt \sim 1 \text{ MV/s} - 100 \text{ GV/s}$) und von einer zusätzlichen UV-Bestrahlung. Dazu wurden die elektrische Spannung und der Strom gemessen. Außerdem wurde die räumliche und zeitliche Entwicklung des Durchschlags mit einer Framingkamera beobachtet. Zur Erzeugung unterschiedlich schneller Spannungsanstiegsflanken wurden verschiedene Zündgeräte verwendet.

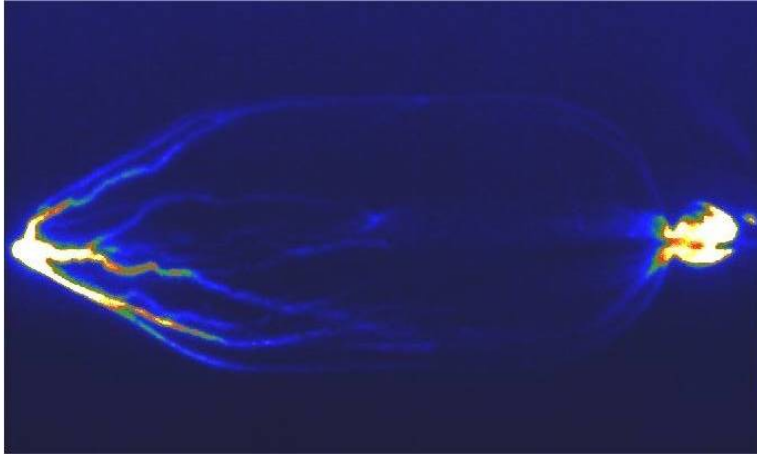


Abb. 11: Zündkanäle an der Wand und im Volumen einer D4 Lampe.

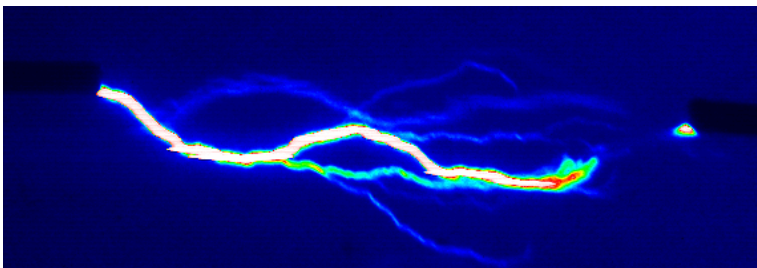


Abb. 12: Streamer zwischen W-Elektroden (Anode links) in der Modelllampe.

In konventionellen Lampen mit hohen Fülldrücken treten aufgrund der Geometrie sowohl Volumendurchschläge als auch Durchschläge, die teilweise an der Lampenwand entlang laufen, auf (Abb. 11). Bei den Versuchen zum Durchschlag haben wir uns auf den Volumendurchschlag in Speziallampen konzentriert, um die Effekte sauber zu trennen und eine gute Möglichkeit zum Vergleich mit Modellrechnungen zu bekommen (Abb. 12).

Die Ergebnisse für die Modelllampe/Z (Volumendurchschlag) zeigen, dass die Zündspannung generell mit steigendem Xenon-Fülldruck und mit wachsender Flankensteilheit ansteigt (Abb. 13 + 14).

Die Kurzaufnahmen der Zündung mit der Framingkamera legen nahe, dass oberhalb 1 bar kein diffuser Durchschlag erfolgt, sondern nur Streamer auftreten. Die Verzweigung der Streamer scheint unabhängig vom Xe-Druck zu sein. In Lampen mit Fülldrücken von 1 bis 5 bar Xe lässt sich ein dunkler Bereich vor der Kathode beobachten. Die räumliche Ausdehnung dieses Bereiches ist unabhängig von der zeitlichen Streamer-Entwicklung.

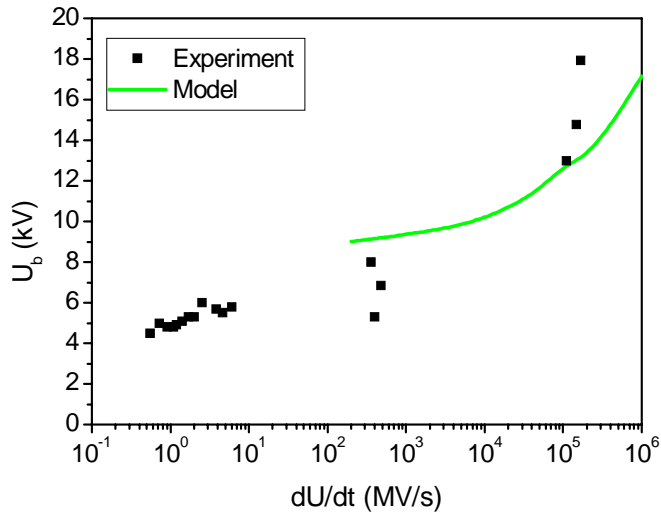


Abb. 13: Veränderung der Durchbruchspannung mit wachsender Flankensteilheit, berechneter Verlauf (rot) und gemessene Werte (Xe, 1 bar).

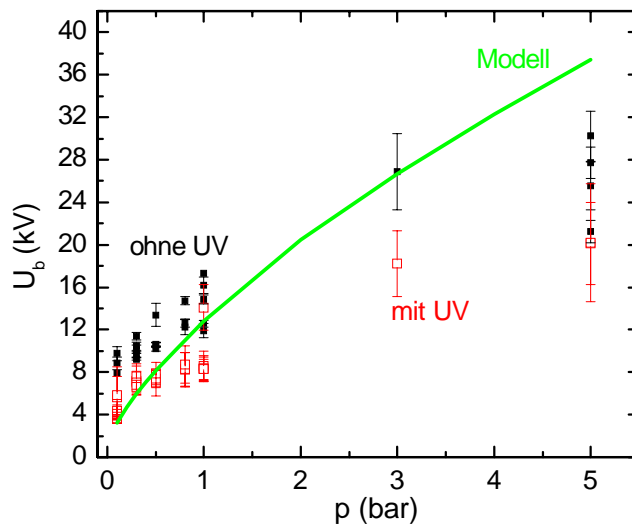


Abb. 14: Veränderung der Durchbruchspannung mit wachsendem Xe-Druck, berechneter Verlauf (—) und gemessene Werte.

Durch zusätzliche UV-Bestrahlung kann die Durchschlagspannung der Lampen gesenkt werden (Abb. 14). Bei Lampen mit Fülldrücken kleiner als 1 bar vermindert sich die Durchbruchspannung drastisch (um ca. 5 kV). Außerdem verändert sich der Durchbruchkanal von einem breiten, diffusen zu einem schmalen Kanal, die Streamerverzweigung erfolgt stets anodenseitig. Dieses Verhalten findet man sowohl bei langsamen ($dU/dt = 0,4 \text{ GV/s}$) wie schnellen Anstiegsflanken ($dU/dt = 100 \text{ GV/s}$). Außerdem verringert sich die Ausdehnung des dunklen Bereichs vor der Kathode bei UV-Bestrahlung und mit zunehmendem Druck.

Neben Lampen mit reiner Xe-Füllung waren auch Lampen mit Zusätzen, wie sie in handelsüblichen Lampen verwendet werden, hergestellt und vermessen worden. Durch Heizen dieser Lampen wurde der Dampfdruck der Zusätze erhöht und deren Einfluss auf das Zündverhalten untersucht. Die Experimente wurden in einem Heizofen bei Raumtemperatur und Temperaturen bis zu $350 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt. Wie bei reinen Xe-Füllungen wurde auch hier der Einfluss von UV-Bestrahlung auf die Durchschlagspannung verfolgt.

Bei allen Lampen mit Zumischung waren die Streamer stärker verzweigt als bei reinen Xe-Lampen. Auch ist bei allen Lampen ein Einfluss von UV-Strahlung auf die Streamerform nicht erkennbar, aber die Durchbruchspannung ist in Abhängigkeit von der jeweiligen Füllung um einige kV vermindert. Durch Heizen und dem damit verbundenen erhöhten Dampfdruck der Zusätze wurde der Streamerverlauf nicht beeinflusst. Auch bei geheizten Lampen lässt sich die Durchbruchspannung durch UV-Bestrahlung um einige kV verringern.

II.1.5. Modellrechnungen zum Zünden (AP8)

Die Arbeiten zum Durchschlag sind in Absprache mit den Projektpartnern im Umfang erweitert worden. Um den Einfluss des Plasmas und der äußeren elektrischen Beschaltung auf die Anstiegszeit und die Höhe der Durchbruchspannung zu klären, sind Rechnungen durchgeführt worden. Es wurde hierbei in drei Schritten vorgegangen.

Ausgehend von den Arbeiten von Bhoj und Kushner [38] wurde das Plasma zunächst als variabler Kondensator angenommen dessen Kapazität C infolge der Verkürzung des virtuellen Plattenabstandes mit der Zeit steigt. Eine der Platten repräsentiert hierbei die Kathode und die andere die Front des kathodengerichteten Streamers. Es wurde ein RC-Ersatzschaltkreis entsprechend den experimentellen Gegebenheiten gewählt und Schaltkreis und Plasma miteinander verknüpft. Der Anstieg des Verschiebungsstromes durch das Ansteigen von C führt über den Spannungsabfall am Vorwiderstand zum Zusammenbruch der Entladungsspannung. Der Anstieg der Durchbruchspannung mit der Anstiegsrate dU/dt kann durch die endliche Propagationszeit des Streamers erklärt werden. Bei geeignet gewählter Verkürzungsrate des Plattenabstandes decken sich die modellierte und die gemessene Abhängigkeit der Durchbruchspannung von dU/dt .

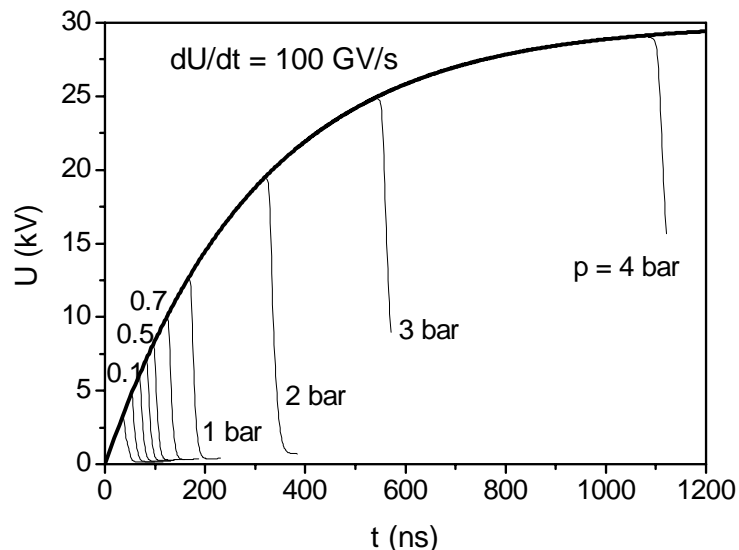


Abb. 15: Spannungsanstieg an der Lampe und berechnete druckabhängige Durchbruchzeiten- und Spannungen (wie sie in auch Abb. 11 zu sehen sind).

Im zweiten Schritt wurde das Plasma durch ein Fluid-Modell beschrieben. Nach einer Literaturrecherche wurde das Modell von Ebert [32] favorisiert. Es beschreibt die grundlegenden Eigenschaften von sowohl positiven, d.h. kathodengerichteten, als auch negativen, d.h. anodengerichteten Streamern. Hierbei wird angenommen, dass die Dicke der Ionisationsfront ($\sim \mu\text{m}$) wesentlich kleiner als der Streamerradius ist ($\sim \text{mm}$). Ein zwei-dimensionales numerisches Modell von Ebert lässt eine Streameraufspaltung zu. Es beschränkt sich bis jetzt zwar auf anodengerichtete Streamer, scheint aber für unsere Untersuchungen aussichtsreich zu sein. Um das Modell von Ebert auf Xenon anzuwenden, wurden die Transportparameter der

Elektronen in Xenon als Funktionen der reduzierten Feldstärke E/N durch Lösen der Elektronen-Boltzmann-Gleichung bestimmt [52]. Es zeigte sich, dass die Feldstärken im Experiment für die Ausbildung von positiven und negativen Streamern ausreichen. Die Propagationsgeschwindigkeit der positiven Streamer war aber zu klein, um die Experimente wiederzugeben.

Im dritten Schritt wurde das Modell von Ebert um bewegliche Ionen und die Emission von Sekundärelektronen an der Kathode erweitert. Es ähnelt somit dem von Belasri, Boeuf und Pitchford behandelten Modell [53]. Das Modell löst die Poisson- und die Kontinuitätsgleichungen für Elektronen und Ionen. Die Teilchenflüsse werden in Drift-Diffusions-Näherung bestimmt. Das Plasma ist durch die Schaltkreisgleichung an den Ersatzschaltkreis gekoppelt. Das 1-dimensionale Modell wird auf einem inhomogenen Gitter mit adaptivem Zeitschritt gelöst. Jeder Zeitschritt wird in einen advektiven und einen nicht-advektiven Zeitschritt aufgeteilt. Letzterer wird durch das Crank-Nicholson-Verfahren behandelt.

Die Berechnungen liefern eine kathodengerichtete Ionisationsfront, die sich zu einer Kathodenschicht entwickelt. Durch die Wahl einer homogenen Anfangsionisation wird die Ionisationsfront nicht, wie ein positiver Streamer im Modell von Ebert, durch Diffusion der Elektronen gegen das elektrische Feld, sondern durch an der Kathode von Sekundärelektronen ausgelöste Ladungslawinen und Feldkomprimierung aufrechterhalten. Die Geschwindigkeit der Ionisationsfront liegt für $p = 1$ bar bei $v_{\max} = 0,5$ mm/ns. Die berechneten Durchbruchspannungen wachsen mit steigendem Druck und wachsendem dU/dt (Abb. 15) und stimmen gut mit den experimentellen Ergebnissen überein (Abb. 13, 14).

II.1.6. Modellrechnungen zu Elektroden (AP9 - 10)

AP9 und 10 zum Verhalten von Elektroden beim Start sind bei Osram vorgenommen und in diesem TV gestrichen worden.

II.1.7. Spektrensimulation in der Anlaufphase (AP11)

Auf die geplanten kurzen Berechnungen von Spektren in der Anlaufphase wurde verzichtet.

II.1.8. Experimente zum Wiederzünden (AP12, 13)

Die bei Osram/Sylvania durchgeführten Arbeiten und auf der LS11 vorgestellten Ergebnisse haben zu dem gemeinsamen Entschluss geführt, den Komplex zur Heißwiederzündung zugunsten von erweiterten Untersuchungen zum Durchschlag fallen zu lassen.

II.1.9. Modellrechnungen zum Wiederzünden (AP14, 15)

Der Komplex zur Heißwiederzündung ist zugunsten von erweiterten Untersuchungen zum Durchschlag entfallen.

II.1.10. Experimente zum Oberflächendurchschlag (AP16)

In den bisherigen Untersuchungen zum Durchschlag haben wir uns bei konsequenter Trennung von Wand- und Oberflächenzündung mit dem Volumendurchschlag beschäftigt. In der Projektverlängerung haben wir uns gezielt mit dem Durchschlag an Oberflächen beschäftigt. Zu diesem Zweck wurden bei Osram Speziallampen (\varnothing_i 12 mm) mit eingearbeiteten Quarz- und Keramikplättchen und einer 4,5 bar Xe-Füllung gefertigt. Die Versuche haben gezeigt, dass die ge-

wählte Konstruktion die gewünschten Versuche ermöglichen und der Funken Kontakt zur Oberfläche hat (Abb. 16). Dadurch können Durchschläge an verschiedenen Oberflächen (Quarz / Keramik) getestet werden.

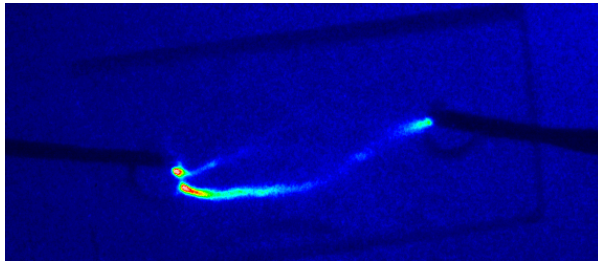


Abb. 16: Modelllampe für Oberflächenzündversuche, mit Streamern auf dem Quarzplättchen zwischen den Wolframdrähten.

Ziel der Untersuchungen war es, Aussagen zum Durchschlag an Oberflächen zu treffen, d.h. Einflüsse auf die Durchbruchspannung zu bestimmen und wesentliche Unterschiede zum Volumendurchschlag herauszuarbeiten. Die Durchbruchspannung ist bei allen Lampen unabhängig von der Oberfläche geringer als beim Volumendurchschlag (Quarz: $13,7 (\pm 2,7)$ kV; PCA: $12,4 (\pm 0,9)$ kV). Es ist auch kein UV-Einfluss auf die Höhe der Durchbruchspannung und den qualitativen Streamerverlauf erkennbar. Der Streameransatz bildet sich stets im Bereich von Rissen und Kratzern des Bohrlochs nahe den Elektroden und die Streamer verlaufen einseitig auf den Plättchen und bilden einen „diffusen Kanal“. Während der Versuche ist kein Einbrennen von Mustern oder Kanälen in die Plättchen beobachtet worden.

Die eingebauten PCA-Plättchen sind leicht gewölbt. Dort verläuft der Streamer bevorzugt auf der nach außen gewölbten Plättchenseite und besitzt eine hohe Verzweigungswahrscheinlichkeit. Außerdem wirkt der Streamerkanal auf PCA weniger diffus als bei Quarz.

II.1.11. Modelle zum Oberflächendurchschlag (AP17)

Anhand der Literaturrecherche zum Oberflächendurchschlag hat sich gezeigt, dass wenige Modelle in der Lage sind, eine Propagation von Elektronenlawinen an Oberflächen zu erklären. Viele Arbeiten zu Gleitentladungen widmen sich anderen Gesichtspunkten und behandeln nicht explizit den Durchbruch oder sind rein experimentell [40-46].

In [42] wird die Dynamik einer Elektronenlawine behandelt, die sich entlang einer dielektrischen Oberfläche in einem Kanal bewegt. Hier gelten die Townsend Durchbruchskriterien nicht länger. Es wird gezeigt, dass die Elektronenlawine bei Unterschreiten eines kritischen Winkels zwischen elektrischem Feld und der Wand wächst. Die kritischen Werte wurden durch kinetische Monte-Carlo Simulationen für eine Mischung aus Xe and Ne berechnet. Aufgrund von Diffusionsprozessen quer zum elektrischen Feld kann die Elektronenlawine nahe der dielektrischen Oberfläche sogar propagieren wenn die elektrischen Feldlinien die Oberfläche kreuzen. Die entstehende Elektronenwolke wächst exponentiell mit der Zeit und expandiert entlang der dielektrischen Oberfläche wenn ein kritischer Winkel unterschritten wird. Dieses Phänomen gibt es jedoch nicht an Metallflächen, wo das elektrische Feld immer gleichgerichtet ist. Die kinetischen Simulationen zeigen, dass sich der kritische Winkel bei kleinen Feldstärken schnell ändert und bei großen Feldstärken nur leicht steigt. Außerdem hängt er nur schwach von den Absorptions- und Reflektionseigenschaften der dielektrischen Oberfläche ab. Wenn der Kanal lang genug ist, kann die Elektronenlawine eine genügend große Ladung erzeugen, die das elektrische Feld beeinflusst. Die weitere Entwicklung der

Entladung hängt dann von den äußeren Bedingungen ab. Die an der Wand des Kanals deponierte Ladung kann die elektrischen Feldlinien wieder entlang des Kanals ablenken, was wieder die Ladungsträgererzeugung im Kanal erhöht. Während eine DBE durch Effekte wie Sekundärelektronenemission und Ladungsdeposition an der Wand bestimmt ist, kann die Gleitlawine als ein Fragment in verschiedenen Typen von Entladungen existieren solange eine dielektrische Oberfläche und ein schräges elektrisches Feld vorhanden sind.

II.1.12. Balkendiagramm zum Erfüllungsstand der geplanten Aufgaben

Das Balkendiagramm gibt eine Übersicht über die Erfüllung der ursprünglich vorgesehenen Aufgaben.

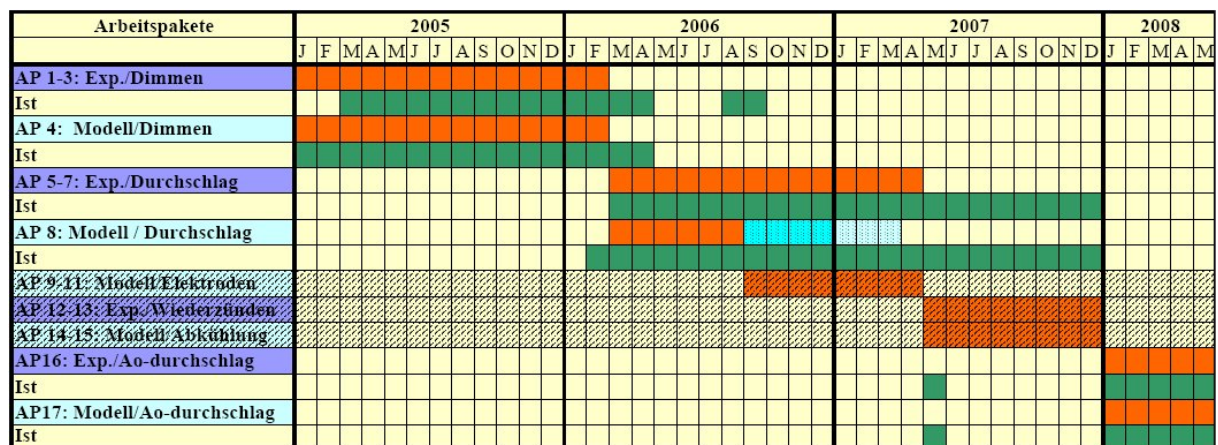


Abb. 17: Balkendiagramm des Projektverlaufs, wobei die Farben folgende Bedeutung haben: **Aufgabe geplant**, **erfüllt**, **gestrichen**.

Der Bearbeitungsstand der einzelnen Arbeitspakete ist kurz wie folgt charakterisiert:

Dimmen:

I: Die Modelllampen mit reduzierter Füllung wurden bei Osram gefertigt und an das INP geliefert. Für einen Leistungsbereich von 40 bis 180 W wurden elektrische, optische und spektroskopische Messungen durchgeführt, die Plasmaparameter und Elektrodeneigenschaften bestimmt und mit Modellrechnungen verglichen.

II: Die elektrische Betriebsweise wurde variiert und der Einfluss auf das Farb-, Plasma- und Elektrodeneigenschaften bestimmt.

III: Die OES-Untersuchungen wurden an Lampen verschiedener Bauform und mit unterschiedlichen Füllungen vorgenommen. Es wurden modifizierte 150 W-Lampen mit einer Selten-Erd-Füllung (MHP4) ohne und mit Hg-Zusatz verwendet. Die Messungen erfolgten wie unter I angegeben.

IV: Es erfolgten Spektrensimulationen sowie Modellrechnungen zur Entmischung in HID Lampen und zur Energiebilanz für reduzierte Füllungen. Der Vergleich mit den Experimenten ergab jeweils gute Übereinstimmungen.

Zünden:

V: Im Experiment wurde an Modelllampen die Abhängigkeit der Durchschlagspannung vom Xe-Druck (0,1 – 5 bar), von der äußeren Beschaltung sowie von externer UV-Strahlung

untersucht. In Abänderung des ursprünglichen Planes sind diese Versuche ausgedehnt worden.

VI: Das Anlaufverhalten wurde an D4 Lampen untersucht, beginnend mit dem Durchschlag, dem Übergang in eine Glimmentladung und der folgenden Bogenphase.

VII: Das Elektrodenverhalten während des Startvorgangs wurde nach Absprache im Experiment wie im Modell bei Osram untersucht.

VIII: Die Modellrechnungen zum Durchschlag wurden erheblich ausgedehnt. Für einen Streamerdurchschlag in Xe wurde das Durchbruchverhalten in Abhängigkeit von der Flankensteilheit des Zündpulses und des Xe-Drucks berechnet. Der Vergleich mit den Experimenten gab eine gute Übereinstimmung.

IX: Das Elektrodenverhalten während der Glimmentladungsphase sowie das mögliche Auftreten von Vapor-Spots wurde nach Absprache bei Osram analysiert.

X: Die Untersuchungen zur Ausnutzung des Hohlkathodeneffekts wurden in Absprache gestrichen.

XI: Auf die geplanten, knappen Berechnungen von Spektren in der Anlaufphase wurde verzichtet.

Heißwiederzündung

XII - XV: Der Komplex zur Heißwiederzündung ist zugunsten von erweiterten Untersuchungen zum Durchschlag entfallen.

Oberflächendurchschlag

XVI: In der Projektverlängerung haben wir uns gezielt mit dem Durchschlag an Oberflächen beschäftigt. Zu diesem Zweck wurden bei Osram Speziallampen gefertigt und Durchbruchspannungen an Quarz- und Keramikoberflächen untersucht.

XVII: Es sind Literaturrecherchen zum Oberflächendurchschlag durchgeführt worden. Unter der Vielzahl an Arbeiten zu Gleitentladungen gibt es nur wenige Modelle, die in der Lage sind, eine Propagation von Elektronenlawine an dielektrischen Oberflächen zu erklären.

Alle im Projektverlauf nicht gestrichenen Arbeitspakete wurden planmäßig durchgeführt und ihre Ziele erreicht. Außerdem wurden die Untersuchungen zum Durchschlag im Vergleich zum ursprünglichen Plan erheblich ausgedehnt und in der Projektverlängerung der gezielte Durchschlag an Oberflächen untersucht. Die enge und gut funktionierende Zusammenarbeit mit den Projektpartnern führte zu einem erfolgreichen Projektabschluß.

II.2. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit

Das Ziel des Vorhabens ist mit den erzielten Ergebnissen zu den Grundlagen des Dimmens und des Durchschlages von HID Modelllampen erreicht worden.

Der Nutzen der im Rahmen des Teilvorhabens gewonnenen Erkenntnisse besteht in der Erkenntnis der Bedeutung der Molekülstrahlung und der Entmischung der Elemente für den Energiehaushalt von Metall-Halogenid-Entladungen.

Es wurde gezeigt dass die Spektrens simulation, d. h. die χ^2 -Anpassung gemessener, selbstumgekehrter Spektrallinien, eine vollwertige Alternative zur Bartelsmethode darstellt. Es können außer dem Temperaturprofil die Partialdrücke des Strahlers und die Verbreiterungskonstanten der verwendeten Linien gewonnen werden. Das verwendete Linienprofil von Peach [28, 29]

gestattet im Gegensatz zu demjenigen von Stormberg [27] eine physikalisch widerspruchsfreie Beschreibung der van der Walls-Wechselwirkung. Die gewonnenen Verbreiterungskonstanten stellen somit eine realistische Charakterisierung der Wechselwirkung dar und können auf die Auswertung der jeweiligen Linie in anderen Experimenten übertragen werden. Partialdrücke von Leuchtzusätzen werden üblicherweise durch Abelinversion optisch dünner Linien bestimmt. Die verwendete Spektrenanpassung erweitert die Möglichkeiten der Partialdruckbestimmung durch ihre Anwendbarkeit auf selbstumgekehrte Spektrallinien. Die hier im Projekt erzielten 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 Nachwuchses am INP ein und wird Verwendung im Vorlesungsbetrieb an der Uni finden.

Die Ergebnisse sind auf Konferenzen und Workshops präsentiert worden, wo sie auf großes Interesse stießen. Außerdem wurden sie in Fachzeitschriften publiziert.

Es wurden keine Schutzrechte angemeldet.

II.3. Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind Ergebnisse zum Durchschlag, zur Heißwiederzündung und zur Diagnostik an HID Lampen auf der LS11 in Shanghai präsentiert worden.

II.4. Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

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

- Vortrag COST Model Inventory Workshop, Funchal, Portugal (2005)

M. Wendt

“Calculation of transport parameters with the Chapman-Enskog method”

- Poster XXVII ICPIG, Eindhoven (2005)

R. Böttcher, M. Kettlitz

„Gathering evidence of mode changes of cathodic arc attachment in mercury discharges“

- Poster DPG Augsburg (2006)

S. Peters, M. Wendt, M. Pfafferoth, H. Schneidenbach, M. Kettlitz, A. Kloss

„Vergleichende numerische und experimentelle Untersuchungen an leistungsreduzierten HID-Lampen“

- Vortrag COST529 Mierlo (2006)

M. Kettlitz and R. Böttcher

“Dynamic mode changes of cathodic arc attachment in mercury discharges”

- Poster ESCAMPIG XVIII, Lecce (2006)

M. Wendt, S. Peters, H. Schneidenbach and M. Kettlitz

„Analysis of a dimmed HID discharge with a Hg/NaI filling“

- Vortrag Licht2006, Bern (2006)
M. Kettlitz, A. Kloss, R. Methling, S. Peters, H. Schneidenbach, M. Wendt
„Grundlagenuntersuchungen zum Dimmen von HID (High Intensity Discharge)-Lampen“

- Vortrag 59. GEC, Columbus, Ohio (2006)
M. Wendt, S. Peters, H. Schneidenbach and M. Kettlitz
„Fitting of asymmetric spectral lines as a diagnostics for HID-lamps“

- Vortrag PT13 Bochum, März 2007
M. Kettlitz, H. Schneidenbach
„Neuere Ansätze zur Temperaturbestimmung in technisch relevanten Bogenplasmen“

- Poster DPG Düsseldorf (2007)
M. Schmidt, S. Peters, M. Kettlitz
„Vergleichende Temperatur-Meßmethoden an Elektroden von HID-Lampen“

- Vortrag LS11 Shanghai (2007)
M. Kettlitz, M. Wendt, S. Peters, H. Schneidenbach, A. Kloss
„Studying dimming characteristics of HID model lamps“

- Poster ICPIG XXVIII Prag (2007)
S. Peters, S. Hadrath, M. Wendt, A. Kloss, and M. Kettlitz
„Breakdown in Xenon Model Discharge Lamps“

- Poster, Streamer-Workshop Leiden (2007)
S. Peters, M. Wendt, A. Kloss and M. Kettlitz
„Breakdown in Xenon Model Discharge Lamps“

- Außerdem sind folgende Artikel erschienen:
- R. Böttcher and M. Kettlitz
„Dynamic mode changes of cathodic arc attachment in vertical mercury discharges”
J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) 2715-2723

- M. Wendt, S. Franke Broadening constants of mercury lines as determined from experimental side-on spectra. *Journal of Physics D: Applied Physics* **41** (2008), 11

- S. Peters, M. Kettlitz, H. Schneidenbach, M. Wendt, A. Kloss
„Dimming Characteristics of Metal Halide Plasma Lamps”, *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **36** (2008), 1178-1179