

Verbundprojekt: Grundlegende Charakterisierung von Elektroden für
zeitveränderliche Energieeinkopplung in umweltfreundliche
Hochdruck-Plasmalampen

Teilvorhaben: **Charakterisierung der Übergangsbereiche
zwischen Plasma und Elektroden in HID-Lampen**

Gefördert vom BMBF unter dem Förderkennzeichen **13N7762**
Projektträger: VDI-TZ, Physikalische Technologien
Projektbetreuer: Frau Dr.-Ing. K. Reichel

Schlußbericht

M. Sieg, H. Pursch*, B. Nehmzow, M. Kettlitz, H. Schneidenbach,
H. Schöpp, E. Kindel, R. Boetticher, H. Heß

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

Laufzeit: 01.02.2000 - 31.01.2003
(Verlängerung: 01.02.2003 - 31.08.2003)
Leiter des Teilvorhabens: H. Heß

*jetzt bei: Moeller GmbH, Hein-Moeller-Straße 7-11, 53115 Bonn

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
 - Angabe von Ergebnissen, die für die Durchführung benutzt wurden
 - Angabe der verwendeten Fachliteratur
- I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

II. Eingehende Darstellung

II.1. Erzielte Ergebnisse

- II.1.1. Messung der radialen und der axialen Temperaturverteilungen an Kurzbogenlampen (AP1)
- II.1.2. Dichtebestimmung an Kurzbogenlampen mit der Hakenmethode (AP2)
- II.1.3. Verifizierung der Modellrechnungen zum Wechselstrom-Hochdruckbogen in Quecksilber des Unterauftragnehmers Universität Hannover (AP4)
 - II.1.3.1. Modenwechsel an Elektroden einer Hg-Lampe
 - II.1.3.2. Bestimmung der elektrischen Feldstärke und des Spannungsabfalls in den elektrodennahen Gebieten
 - II.1.3.3. Erfüllungsstand des AP4
- II.1.4. Laseraufheizung der Elektroden (AP3)
 - II.1.4.1. Messung der Elektrodentemperatur und Bestimmung der absorbierten Laserleistung
 - II.1.4.2. Auswirkung der Laserheizung auf die Entladungsspannung und die Elektrodentemperatur
 - II.1.4.3. Interpretation der Ergebnisse der Laseraufheizung
 - II.1.4.4. Erfüllungsstand des AP3
- II.1.5. Feldstärke und Elektrodenschichtspannung bei verschiedenen Füllgasen und Betriebsweisen (AP5)
- II.1.6. Vergleich der pyrometrischen Verfahren der Verbundpartner (AP7)
- II.1.7. Literatur zum Abschnitt II.1.
- II.1.8. 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

Untersuchungsgegenstand waren die Übergangsbereiche zwischen Plasma und Elektroden in HID (high intensity discharge)-Lampen. In diesen Bereichen wird der Stromfluß durch den Entladungskreis beim Übergang vom Festkörper (Elektrode) zur gasgefüllten Entladungsstrecke (Plasma) u. u. sichergestellt. An der Kathode wird eine Kathodenfallspannung aufgebaut, die einen hinreichend hohen Ionenstrom auf die Kathode bewirkt, so daß die dadurch bedingte Aufheizung der Kathode einen Elektronenstrom liefert, der den Ionenstrom zum Gesamtstrom (bei unseren Experimenten vorgegeben!) ergänzt. An der Anode erscheint der Übergang zunächst einfacher, da nur die hier den Gesamtstrom tragenden Elektronen aufgesammelt werden müssen. Starke Temperatur- und Dichtegradienten in unmittelbarer Nähe der Anode erfordern aber auch an der Anode eine gewisse Fallspannung, die unter bestimmten Umständen sogar negativ werden kann.

Diese Übergangsbereiche sollten mit Hilfe von spektroskopischen und anderen optischen Untersuchungen sowie durch elektrische Messungen der Betriebsparameter charakterisiert werden. Die erhaltenen Daten sollten dazu dienen, Modellrechnungen anzuregen bzw. vorliegende Modelle zu verifizieren.

Der Unterauftrag an die Universität Hannover, der auf 1½ Jahre befristet war, sollte dazu dienen, die Wechselwirkung zwischen Plasma und Elektrode räumlich dreidimensional und zeitabhängig modellmäßig zu beschreiben und mit entsprechenden Messungen im INP Greifswald zu vergleichen.

Auf Vorschlag des Projektkoordinators wurde ein Laser beschafft und die Reaktion von elektrodenrelevanten Größen (Entladungsspannung, Elektrodentemperatur, Elektrodenschichtspannung) auf die Bestrahlung der Elektroden mit dem Laser ermittelt. Die Ergebnisse waren so interessant, daß der Beirat des Verbundprojekts in seinen Protokollen zum 4., 5. und 6. Verbundtreffen die Bedeutung dieser Untersuchungen und der damit erzielten Ergebnisse herausstellte.

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

Das Vorhaben war in der Abteilung „Plasmastrahlung“ des INP (Leitung: Dr. E. Kindel) angesiedelt. In der Hochdruckgruppe dieser Abteilung werden Untersuchungen zu Hochdruckplasmen durchgeführt, die in Lichtquellen und in Schweißlichtbögen zur Anwendung kommen. Zur Zeit wird an folgenden geförderten Teilvorhaben (TV) gearbeitet, die in größere Verbundprojekte eingebunden sind:

Vom BMBF gefördert:

TV Charakterisierung des Plasmas in quecksilberfreien Kurzbogenentladungen; FKZ: 13N8069

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

TV Spektralanalyse eines Metall-Lichtbogenplasmas; FKZ: 02PP2481

Von der DFG gefördert:

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

Die Einbettung des Berichtsthemas in die vorstehend charakterisierte Forschungsumgebung schuf optimale Voraussetzungen personeller und gerätemäßiger Art, die auch zu Synergieeffekten führten. Eine weitere günstige Voraussetzung für die Durchführung des Teilvorhabens war die ausgesprochen effektive und erfolgreiche Zusammenarbeit mit Dr. R. Bötticher (Uni Hannover) in der

ersten Hälfte der Projektlaufzeit sowie mit Dr. P. Flesch (Uni Karlsruhe) in der zweiten Hälfte. Die theoretischen Arbeiten dieser Kollegen haben maßgeblich zum Verständnis und zu einer quantitativen Analyse unserer experimentellen Ergebnisse beigetragen. Die gemeinsamen Experimente mit den Kollegen von der Uni Bochum, die mit einem Austausch von Geräten und Anlagen verbunden waren, haben Einsichten gebracht, wie sie so von den Gruppen allein nicht hätten erhalten werden können.

Insgesamt war auch der ständige Austausch mit den Gruppen von OSRAM Berlin, München und Schwabmünchen sowie von Philips Aachen sehr lebhaft und fruchtbar, wobei insbesondere die Lieferung von Lampen, die nach unseren Wünschen bezüglich der Geometrie und der Füllung modifiziert waren, durch den Partner OSRAM München hervorzuheben ist.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Teilvorhaben war sorgfältig und in Abstimmung mit den anderen Verbundpartnern geplant. Nachdem wir den Zuwendungsbescheid mit dem Starttermin 01.02.2000 am 30.03.2000 erhalten hatten, konnten wir mit der Arbeit beginnen, da der wissenschaftliche Projektmitarbeiter Dr. H. Pursch sofort zur Verfügung stand. Einen geeigneten technischen Mitarbeiter konnten wir erst am 01.08.2000 einstellen. Nach dem Erreichen des Meilensteins verließ uns Dr. Pursch im Juli 2001 auf eigenen Wunsch; als Nachfolger konnten wir bereits im September Dipl.-Phys. M. Sieg einstellen, der die Arbeiten erfolgreich fortführte.

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

● Angabe bekannter Ergebnisse, die für die Durchführung benutzt wurden

Die verwendeten Ergebnisse wurden zum Teil der im Anschluß zitierten Fachliteratur einschließlich der Patentliteratur entnommen. Weitere Informationen wurden von den Verbundpartnern bei den halbjährlichen Verbundtreffen sowie bei bilateralen Treffen übermittelt. Ganz wesentliche Informationen ergaben sich auch im Fachgespräch mit Kollegen anlässlich des Besuches von nationalen und internationalen Tagungen.

● Angabe der verwendeten Fachliteratur

- [1] R. Schäfer und H. P. Stormberg
Time-Dependent Behavior of the Contraction Regions of High-Pressure Mercury Arcs
J. Appl. Phys. **57** (1985) 2512 - 2518
- [2] J. T. Dakin, T. H. Rautenberg, and E. M. Goldfield
Anatomy of a Vertical Metal Halide Discharge
J. Appl. Phys. **66** (1989) 4047 - 4088
- [3] J. T. Dakin and W. Shyy
The Prediction of Convection and Additive Demixing in Vertical Metal Halide Discharge Lamps
J. Electrochem. Soc. **136** (1989) 1210 - 1215
- [4] J. Haidar and A. J. D. Farmer
Surface Temperature Measurements for Tungsten-Based Cathodes of High-Current Free-Burning Arcs
J. Phys. D: Appl. Phys. **28** (1995) 2089 – 2094

- [5] D. Nandelstädt, J. Luhmann, and J. Mentel
Measuring the Power Losses of Thermionic Arc Cathodes
Proc. XXIVth ICPIG, Warsaw 1999, p. 15
- [6] J. Luhmann, D. Nandelstädt, and J. Mentel
Measurement of the Cathode Fall in a High Pressure Argon Model Lamp
Proc. XXIVth ICPIG, Warsaw 1999, p. 13
- [7] M. S. Benilov
Nonlinear Surface Heating of a Plane Sample and Modes of Current Transfer to Hot Arc Cathodes
Phys. Rev. E **58** (1998) 6480 - 6494
- [8] M. S. Benilov
Mathematical Modelling of Multiple Regimes of Current Transfer to Hot Arc Cathodes
Proc. 8th Int. Symp. on the Science & Technology of Light Sources, Greifswald 1998,
p. 392
- [9] M. S. Benilov
Temperature of Spots on Thermionic Cathodes in Atmospheric-Pressure Arc Discharges Proc.
XXIV ICPIG, Warsaw 1999, p. 223
- [10] H. Schmitz and K.-U. Riemann
Theoretical Modelling of the Cathodic Region of High Intensity Discharge Lamps
Proc. 8th Int. Symp. on the Science & Technology of Light Sources, Greifswald 1998,
p. 390
- [11] H. Schmitz and K.-U. Riemann
Consistent Analysis of the Boundary Layer of a Saha Plasma
Proc. XXIV ICPIG, Warsaw 1999, p. 5
- [12] P. Flesch and M. Neiger
Modeling of High-Pressure Discharge Lamps Including Electrodes
IEEE Trans. Plasma Sci. **27** (1999) 18
- [13] M. Kettlitz and R. Wendt
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, p. 202
- [14] M. Kettlitz, R. Grossjohann, and R. Wendt
Investigation of Temperature and Density Profiles Near the Electrodes of High-Pressure
Sodium Lamps
Proc. XXIVth ICPIG, Warszawa 1999, Contr. Papers, Vol. 2, p. 147
- [15] F. Könemann, E. Schulz-Gulde, M. Kock
Evidence of Non-Equilibrium Near the Cathode of a Low Current Argon Arc
Proc. XXIVth ICPIG, Warszawa 1999, Contr. Papers, Vol. 2, p. 195

- [16] H. Hess, G. Hartel, H. Schöpp and L. Hitzschke
A Further Step to a Complete Description of the High-Pressure Discharge in Mercury
Proc. 8th International Symposium on the Science & Technology of Light Sources,
Greifswald/Germany 1998, p. 200
- [17] G. Hartel, H. Schöpp, H. Hess and L. Hitzschke
Radiation from an AC High-Pressure Mercury Discharge: Comparison between
Experiments and Model Calculations
J. Appl. Phys. **85** (1999) 7076 - 7088
- [18] A. Kloss, H. Schneidenbach, H. Schöpp, and H. Hess
Electrode-Sheath Voltages in High-Pressure Mercury Arcs
J. Appl. Phys. **88** (2000) 1271
- [19] A. Kloss, H. Schneidenbach, and H. Hess
Electrode Sheath Voltages in Pulsed High-Pressure Mercury Arcs
J. Appl. Phys. **88** (2000) 1271
- [20] A. D. Rakhel, A. Kloss, and H. Hess
On the Critical Point of Tungsten
Int. J. Thermophys. **23** (2002) 1369
- [21] E. Kindel, M. Kettlitz, C. Schimke, and H. Schöpp
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** (1998) 1352

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Interaktion im Verbund muß als sehr eng und sehr erfolgreich bezeichnet werden. Aus der Sicht des INP war während der ersten Hälfte der Laufzeit die Zusammenarbeit mit unserem Unterauftragnehmer R. Böttcher (Uni Hannover) besonders fruchtbar. Einerseits verwendete Böttcher unsere experimentellen Parameter für seine Rechnungen, andererseits kamen wir ihm bezüglich der verwendeten Stromformen entgegen, wodurch gute Vergleichsmöglichkeiten geschaffen wurden. Es wurden Modenwechsel des Bogenansatzes an der Kathode sowie die Kathodenfallspannung behandelt, wobei gute Übereinstimmung erzielt wurde.

In der zweiten Hälfte der Laufzeit wurden gemeinsame Experimente mit der Gruppe um Prof. Mentel, besonders mit L. Dabringhausen (Uni Bochum) durchgeführt. Dabei ging es um einen Vergleich der Ergebnisse in Edelgasen (Ar, Xe; Bochumer Lampe) mit denen in Quecksilber (INP-Anordnung) bezüglich der Feldstärke und der Elektrodenschichtspannung (electrode sheath voltage - ESV), wobei auch der Einfluß einer Heizung der Elektroden mit einem Laser erfaßt wurde.

In dieser Zeit forcierte der Beirat des Verbundprojekts (s. Protokolle zum 4., 5. und 6. Verbundtreffen) die Experimente mit der Laseraufheizung der Elektroden. Es wurde ein sehr interessanter Zusammenhang zwischen Heizleistung und Kathodenfallspannung gefunden, der physikalisch gut interpretierbar war. Diese Ergebnisse führten zu einer engen Kooperation mit P. Flesch (Uni Karlsruhe), der in der Lage war, die Ergebnisse z. T. quantitativ bis in Details hinein zu interpretieren.

II. Eingehende Darstellung

II.1. Erzielte Ergebnisse

II.1.1. Messung der radialen und axialen Temperaturverteilung an Kurzbogenlampen (AP1)

Die Funktion von Hochdruck-Plasmalampen wird durch die Wechselwirkungsprozesse zwischen den Elektroden und dem Plasma der elektrodennahen Bereiche mitbestimmt. Das gilt insbesondere für Kurzbogenlampen, wo diese Bereiche einen wesentlichen Anteil an der Entladungslänge haben.

Ziel der Arbeiten ist es, die Betriebsbedingungen thermischer Lichtbögen in Entladungslampen unter besonderer Berücksichtigung des Übergangs zu den Elektroden zu erfassen. Durch spektroskopische und optische Untersuchungen mit hoher örtlicher und zeitlicher Auflösung wird die radiale und axiale Verteilung der Plasmaparameter bestimmt sowie die geometrische Form des Bogenansatzes auf den Elektroden registriert. Gleichzeitig werden die elektrischen Parameter der Entladung aufgezeichnet, um den Einfluß zeitlich variierender Energieeinspeisung festzustellen.

Die Untersuchungen erfolgen zunächst an industriell gefertigten Kurzbogenlampen in elliptischer Ausführung ohne spezielle Beobachtungsfenster. Die Entladung der Kurzbogenlampe brennt waagrecht zwischen reinen Wolframelektroden in einer Xenon-Atmosphäre (Fülldruck: 20 - 25 bar). Gefüllt sind die Lampen weiterhin mit Quecksilber und Zusätzen von Metallhalogeniden (ScI_3 , TlI , NaI). Der Elektrodenabstand beträgt 4,2 mm, und der Durchmesser der Elektroden ist 0,25 mm. Die Lampen werden mit einem elektronischen Vorschaltgerät betrieben.

Der spektroskopische Meßaufbau besteht aus einem Spektrographen mit ICCD-Empfänger sowie Referenzlampen zur Intensitäts- und Wellenlängenkalibrierung. Durch ein vergrößerndes Abbildungssystem wird der Bogen auf den Eintrittspalt abgebildet. Mit einer Videokamera wird das Verhalten der Entladung an den Elektroden und die Ausdehnung der Plasmasäule im sichtbaren Spektralbereich verfolgt (**Abb. 1**).

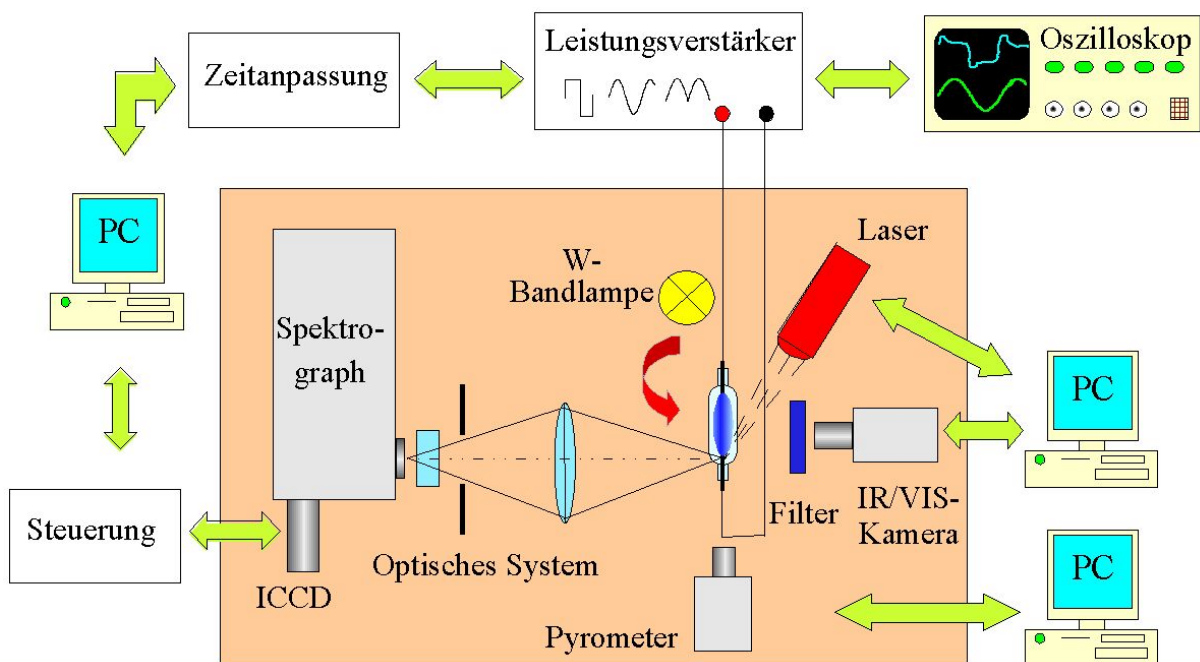


Abb. 1: Experimenteller Aufbau für optische und spektroskopische Untersuchungen an Hochdruck-Entladungslampen

Auf den Elektroden werden Spot-Ansätze beobachtet, zwischen denen sich aufgrund von Konvektion im Entladungsgefäß bei waagrechttem Betrieb ein nach oben gekrümmtes Bogenplasma ausbildet.

Abb. 2 zeigt Videobilder solcher Kurzbogenentladungen. Die Bilder geben außerdem Hinweise auf die optische Qualität der Lampengefäße, mögliche Störungen im Elektrodenbereich und den Bogenansatz auf den Elektroden. Um den Einfluß der Bogenkrümmung bei den spektroskopischen Messungen in 0. Näherung auszuschließen, wurde der Bogen in der Draufsicht von oben vermessen.

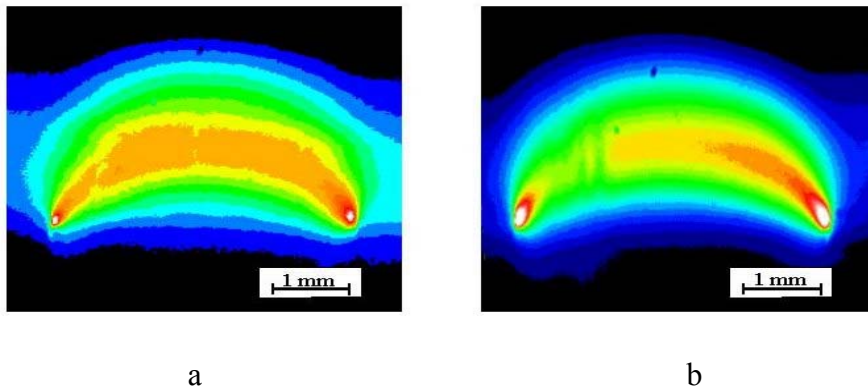


Abb. 2: Videobilder von Kurzbogenlampen (Belichtungszeit: a – 2 μ s, b – 5 μ s)

Ein entsprechendes Spektrum ist in **Abb. 3** dargestellt und zeigt im oberen Teil ein Übersichtsspektrum einer Kurzbogenentladung im sichtbaren Spektralbereich, das in der Mitte zwischen den Elektroden registriert wurde und in dem Linien von Metallen aus den Füllsubstanzen identifiziert werden können. Im unteren Teil ist der Spektralbereich von 500 nm bis 610 nm vergrößert dargestellt, wobei die Spektren an verschiedenen Positionen der Entladung gemessen wurden. Während im Plasma (Bogenmitte) die Linien aller Metalle die Abstrahlung in diesem Spektralbereich bestimmen, wird das Spektrum des Spot-Ansatzes durch die intensiven Hg-Linien bei 546 nm und 577/579 nm dominiert.

Die Plasmatemperatur wird aus der gemessenen Flächenstrahlendichte der Umkehrkuppen einer selbstabsorbierenden Spektrallinie bestimmt (Bartels-Methode). Für die Diagnostik wird aus dem Spektrum der Bogenentladung die optisch dicke Hg-Linie bei 546 nm verwendet. Aus den Meßdaten wurden axiale und radiale Temperaturverteilungen berechnet. Die Resultate sind in **Abb. 4** und **5** dargestellt. In der Kontraktionszone vor den Elektroden wurden Temperaturen von mehr als 7000 K bestimmt, während in der Mitte der Bogensäule die Temperatur auf 5500 K absinkt.

Zum Vergleich sind berechnete Temperaturprofile (P. Flesch, LTI, Uni Karlsruhe) dargestellt (linke Seite), die trotz der Einschränkungen in der Rechnung (senkrechter Lampenbetrieb, keine Konvektion) sowohl in der Form als auch in den absoluten Werten recht gut mit den Messungen übereinstimmen.

Die höhere Temperatur im Spotplasma ist der Grund dafür, daß die Intensität der Hg-Linien im Spektrum so deutlich zunimmt. Da die Niveaus von Hg höher liegen als die der Leuchtzusätze und diese bei höheren Temperaturen stärker besetzt sind, überwiegt die Hg-Strahlung. Daher erscheint das Licht aus der Bogenmitte mit einem weißen (Sc, Tl, Na, Hg) und im Elektrodengebiet mit einem blauen (Hg) Farbeindruck.

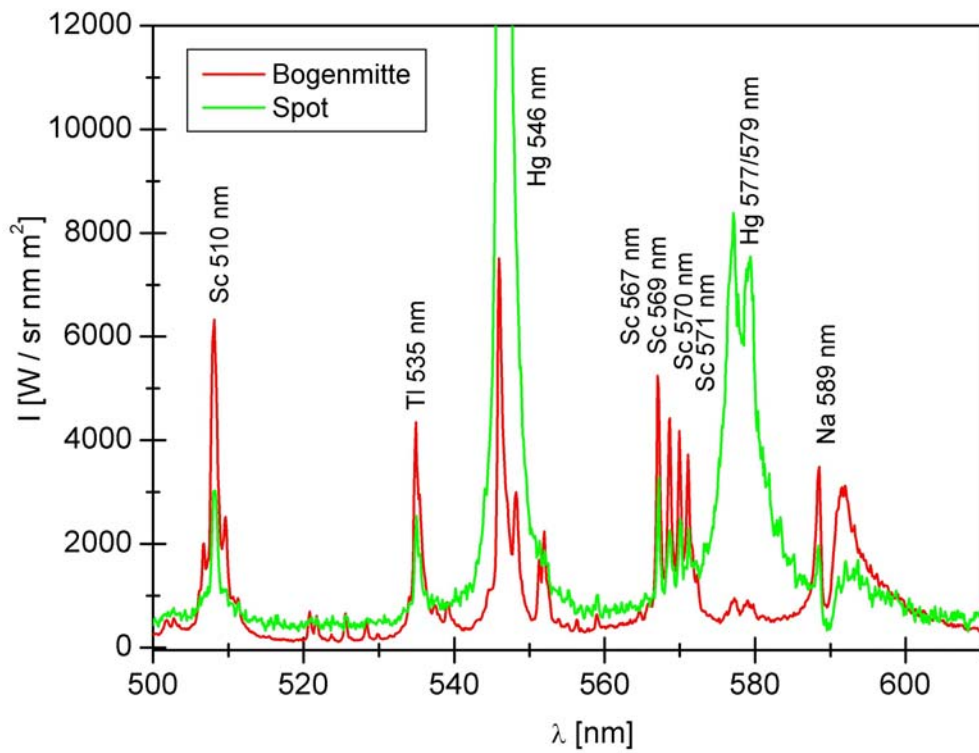
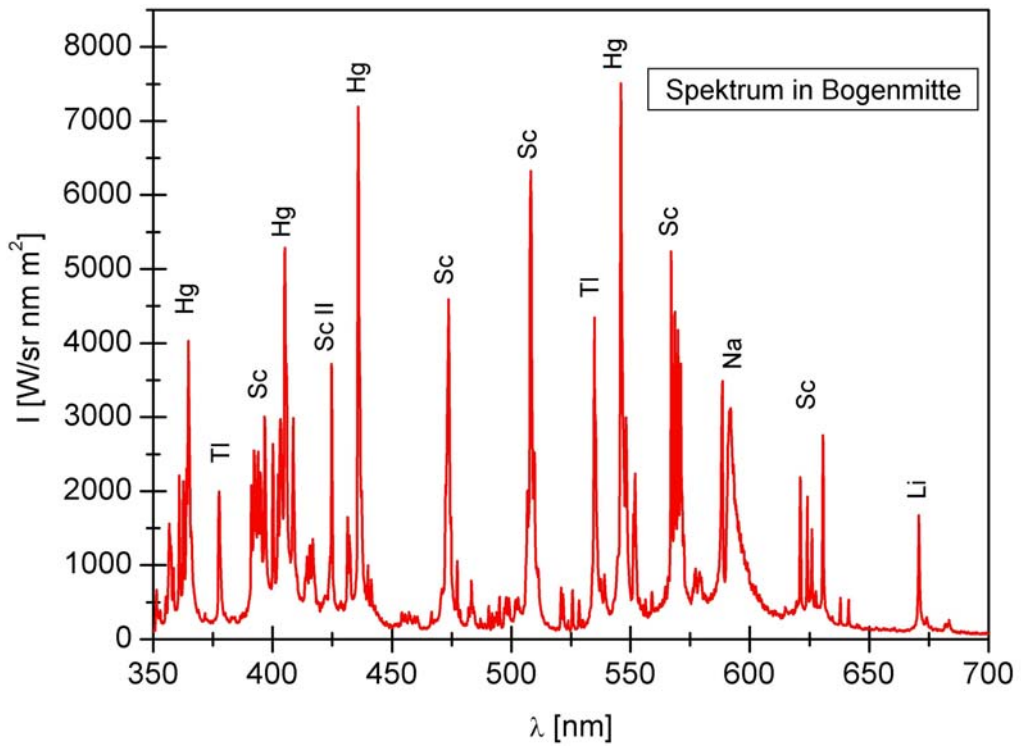


Abb. 3: Oben: Übersichtsspektrum einer Kurzbogenentladung im sichtbaren Spektralbereich. Unten: Ausschnitt aus dem Spektrum für zwei Meßpositionen (Bogenmitte bzw. im Spot).

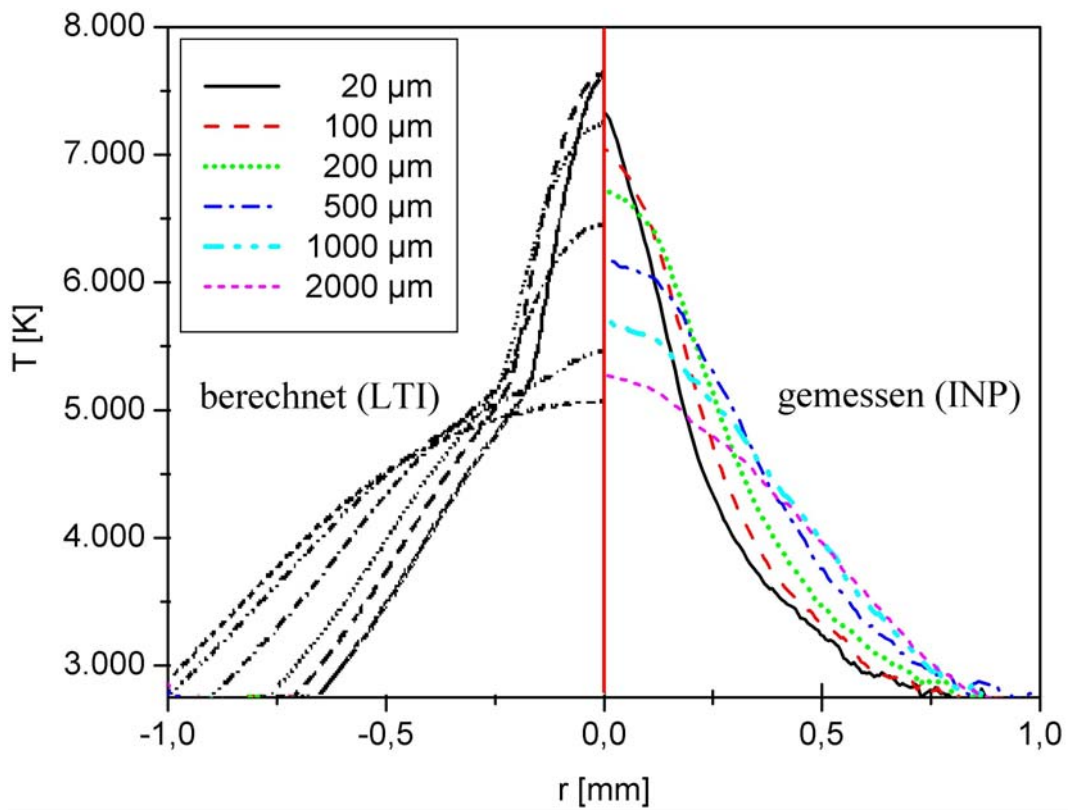


Abb. 4: Radiales Temperaturprofil in verschiedenen Abständen von der Kathode

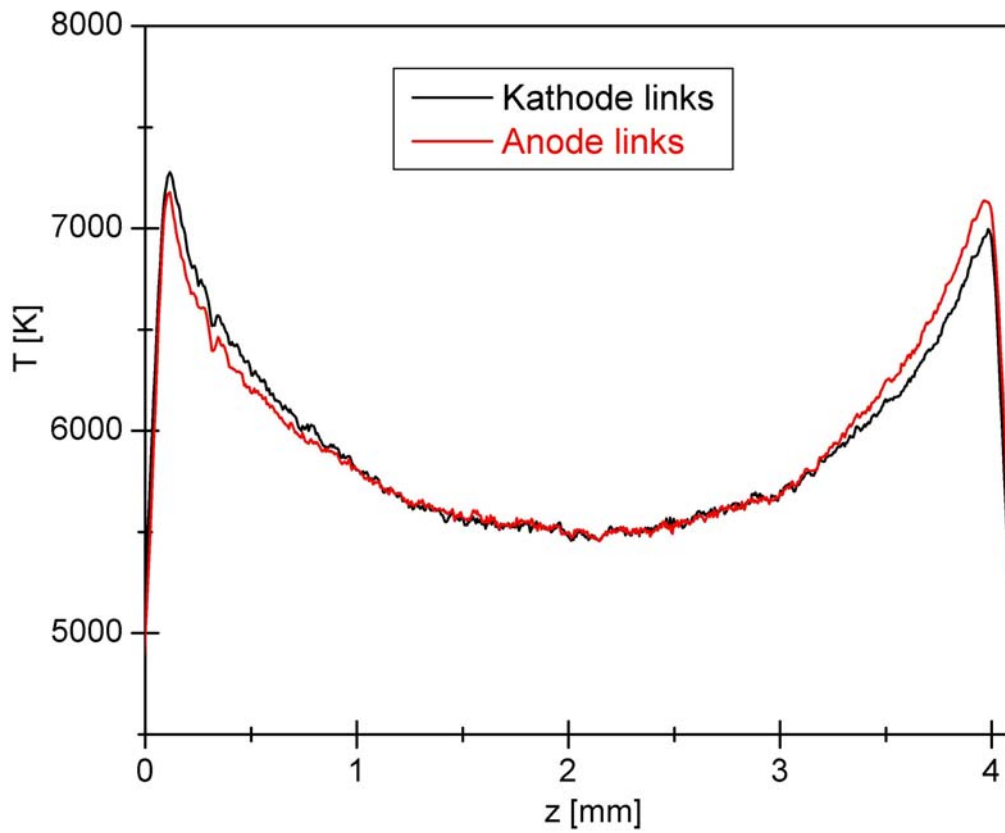


Abb. 5: Axiales Temperaturprofil; leichte Asymmetrie bzgl. Temperatur vor Elektrode

Die in diesem Kapitel mitgeteilten radialen und axialen Temperaturverteilungen wurden zu Beginn der Themenlaufzeit an Kurzbogenlampen gemessen. Die Messungen geben einen sehr guten Eindruck von der Temperaturzunahme vor den Elektroden (um 1800 K) sowie von der damit verbundenen Einschnürung (**Abb. 4** und **5**). **Abb. 3** veranschaulicht deutlich den Farbwechsel, der mit dieser Temperaturerhöhung bei Annäherung an die Elektrode verbunden ist.

II.1.2. Dichtebestimmung an Kurzbogenlampen mit der Hakenmethode (in Kooperation mit Dr. E. Kindel, INP Greifswald; AP2)

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 Brechungsindex 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 schiefgestellten Interferenzstreifen (durch Veränderung des optischen Weges zwischen den Interferometerarmen) bilden sich Haken um die Linie im Interferenzbild. Aus dem Hakenabstand Δ (der spektrale Abstand der Maxima und Minima diesseits und jenseits der Spektrallinie) läßt sich die Teilchendichte im unteren Zustand der Linie N_i nach folgender Beziehung bestimmen:

$$\int N_i dl = \frac{\pi \cdot k \cdot \Delta^2}{r_0 \cdot f_{ik} \cdot \lambda_{ik}^3}$$

Hierbei sind r_0 der klassische Elektronenradius, l die Absorptionslänge des Plasmas, λ_{ik} die Wellenlänge des Übergangs, f_{ik} die Absorptions-Oszillatorenstärke und k die gerätespezifische Hakenkonstante.

Zur Messung des Brechungsindex' ist ein Hintergrundstrahler notwendig, der auf die Wellenlänge des optischen Übergangs der jeweils zu untersuchenden Substanz eingestellt werden kann, der entsprechend intensiv ist und der die Kohärenzbedingung erfüllt. Für die Linienform werden keine besonderen Voraussetzungen gemacht.

Der Versuchsaufbau wird in **Abb. 6** gezeigt. Die Hauptbestandteile des Hakenexperiments sind ein Mach-Zehnder-Interferometer, ein Spektrograph mit CCD-Kamera zur Signaldetektion sowie als Lichtquelle ein von einem Nd:YAG-Laser gepumpter Farbstofflaser.

Während in einem Arm des Interferometers die Entladungslampe installiert wird, befindet sich im zweiten Arm ein optisch identischer „Dummy“. Beide sind beweglich gegenüber dem Laserstrahl angebracht. Eine zusätzliche Kompensationsplatte CP verschiebt die Streifen zu höherer Ordnung, so daß geneigte Interferenzstreifen entstehen, die über eine Strahlaufweitungsoptik und ein holographisches Gitter auf die CCD-Kamera abgebildet werden. Aus den elektronisch gespeicherten Bildern können typische Hakenabstände in der Größenordnung von einigen Zehntel Nanometern bestimmt werden.

Bei den Messungen wurde der Laserstrahl in der Mitte zwischen beiden Elektroden durch die Entladungslampe geführt; er hatte einen Durchmesser von 800 μm . Aufgrund der Lampenfüllung (ScI_3 , TII, NaI) wurden für erste Messungen folgende Übergänge ausgewählt:

Grundzustand Thallium	$6^2P^0_{1/2}$	\rightarrow	$7^2S_{1/2}$	bei 377,572 nm,
angeregter Zustand Thallium	$6^2P^0_{3/2}$	\rightarrow	$7^2S_{1/2}$	bei 535,046 nm,
Grundzustand Scandium	$4^2D_{5/2}$	\rightarrow	$4^2D^0_{5/2}$	bei 630,566 nm,
Grundzustand Quecksilber	6^1S_0	\rightarrow	$6^3P^0_1$	bei 253,652 nm,
Grundzustand Natrium	$3^2P^0_{3/2}$	\rightarrow	$3^2S_{1/2}$	bei 588,996 nm.

In **Abb. 7** ist ein erstes typisches Hakenbild einer Kurzbogenlampe für den Sc-Grundzustand zu sehen. Für Scandium konnte zwar ein Streifenversatz registriert werden, aber die Ausprägung ist so gering, daß er nicht auswertbar war. Deutlichere Hakenbilder konnten für Na-Atome bestimmt

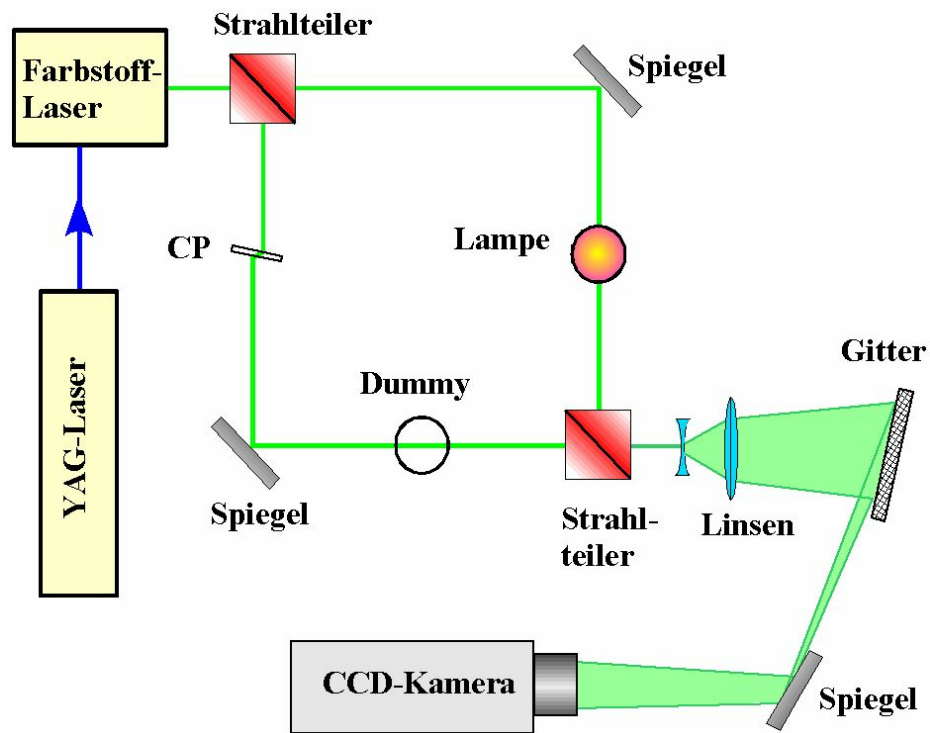


Abb. 6: Versuchsaufbau der Haken-Mehode

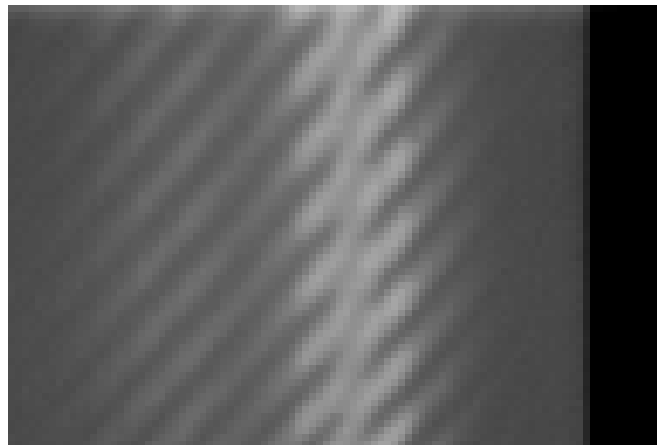


Abb. 7: Mittels CCD-Kamera aufgenommenes Hakenbild einer Kurzbogenlampe für den Scandium-Grundzustand

werden. Für gemessene Hakenabstände Δ von 1,9 nm wurde eine mittlere Teilchendichte der Na-Atome von $3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ errechnet. Extrem gering sind auch die Intensitäten der beiden Thallium-Linien, bei denen kein Hakenbild zu identifizieren war.

II.1.3. Verifizierung der Modellrechnungen zum Wechselstrom-Hochdruckbogen in Quecksilber durch Unterauftragnehmer Universität Hannover (AP4)

Die Modellierung der Energieflüsse des Wechselstrom-Hochdruckbogens auf der Basis von Schichtmodellen lieferte zahlreiche Hinweise auf dynamische Vorgänge, die experimentell erfaßt werden können. Dazu zählen in erster Linie die Modenwechsel des Stromansatzes zwischen diffussem Ansatz und Spot und die Kathodenfallspannung. Durch die enge Kopplung der Rechnungen an die Geometrie realer Hg-Lampen sowie die im numerischen Modell verwendeten Stromformen wurden gute Vergleichsmöglichkeiten für Theorie und Experiment geschaffen. Darüber hinaus wurde das Auftreten des Modenwechsel bei verschiedenen Stromformen überprüft.

II.1.3.1 Modenwechsel an Elektroden einer Hg-Lampe

Die Hg-Lampen sind im Betrieb senkrecht angeordnet. Untersucht wurden Lampen mit folgenden Parametern:

1. Lampe mit thorierten Wolfram-Wendel-Elektroden (G7),
Elektrodenabstand: 27,3 mm, Arbeitsdruck: 6,2 bar.
2. Lampen mit Stiftelektroden (thorierte oder reine Wolframelektroden),
Elektrodenabstand: 10 mm, Elektrodendurchmesser: 0,5 mm bzw. 0,7 mm,
Arbeitsdruck 7 bar.

Mit einer Stromversorgung auf der Basis eines Leistungsverstärkers können verschiedene Stromformen erzeugt werden, die durch einen Signalgenerator vorgegeben werden, und zwar sowohl die internen Standardsignale (Sinus, Rechteck, Dreieck, Rampe usw.) als auch solche, die durch freie Programmierung mit der dazugehörigen Software erstellt werden. Damit war es möglich, neben dem sinusförmigen Stromverlauf auch die für die theoretische Beschreibung benutzte zyklische Stromform eines gleichgerichteten 50 Hz-Stroms

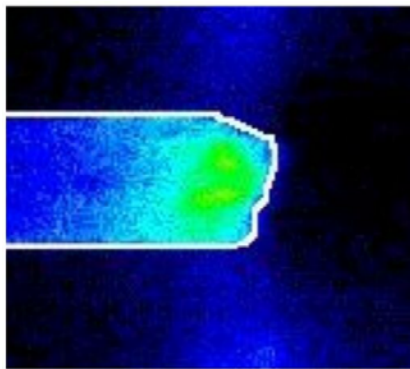
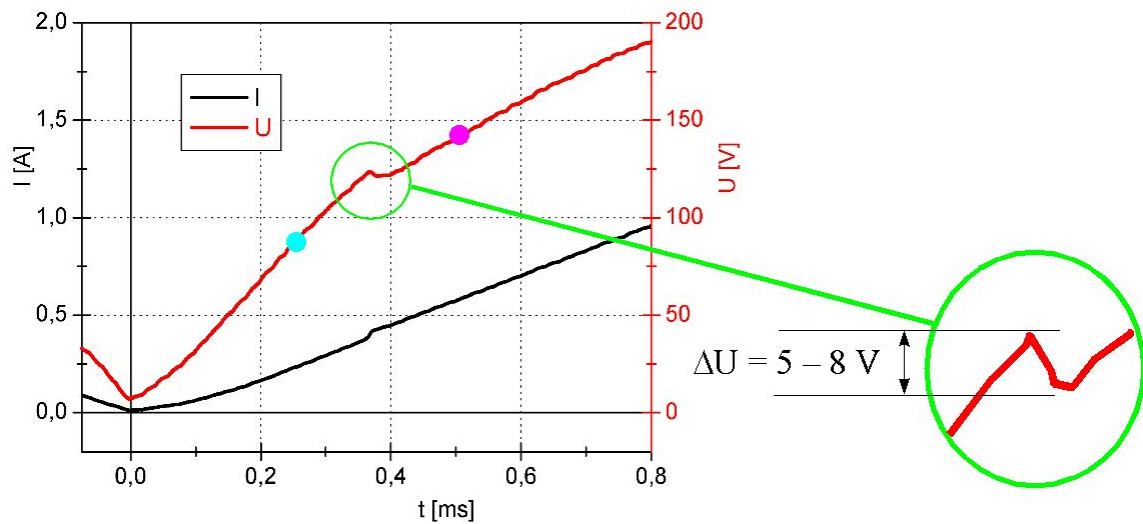
$$I(t) = I_0 |\sin(2\pi ft)| \quad \text{mit } I_0 = 4,2 \text{ A}$$

zu erzeugen.

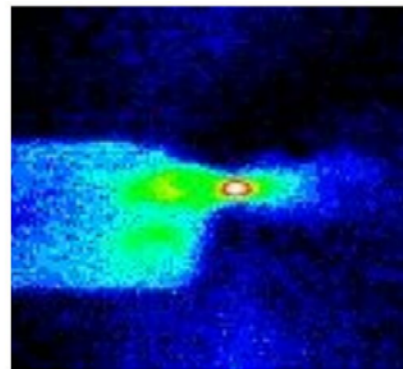
Für die optischen und elektrischen Untersuchungen zum Modenwechsel zwischen Spot und diffussem Ansatz wurden die in **Abb. 1** dargestellten Apparaturen benutzt. Mit einer Kamera (FlashCam, PCO) konnten Einzelbilder des Entladungsansatzes mit Expositionszeiten von 2 – 15 μs registriert werden. Die Überstrahlung durch die Bogensäule wurde mit einem schnellen Shutter verhindert.

Abb. 8 zeigt einen Ausschnitt aus dem Strom- und Spannungs-Verlauf einer Lampe mit Wendelektrode bei gleichgerichtetem Wechselstrom und Beobachtung des Bogenansatzes während verschiedener Phasen des Stromanstiegs. Im Spannungsverlauf ist ein Abfall festzustellen. Dieser Abfall tritt sowohl in der Stromanstiegs- als auch in der Stromabfallphase auf. Unterhalb dieser Schwelle (im Niederstrombereich) ist der Ansatz auf der Elektrode diffus. Oberhalb davon wird die Bildung eines Spots beobachtet. Der Spannungsabfall an dieser Stelle beträgt 5 – 8 V.

Zum Vergleich der numerischen und experimentellen Resultate bezüglich des Modenübergangs sind in **Abb. 9** schematisch die Existenzbereiche eines diffusen Bogenansatzes für den 50 Hz-Sinus-Betrieb und mit gleichgerichtetem Sinusstrom eingezeichnet. Obwohl die Modenwechsel im Experiment bei beiden Stromformen für niedrigere Ströme auftreten, bestätigen die Registrierungen der Modenwechsel grundsätzlich die Ergebnisse der Modellrechnungen. Abweichungen könnten durch erhöhte Erosion verursacht sein.



● diffus



● Spot

Abb. 8: Strom- und Spannungs-Verlauf beim Modenwechsel in einer Hg-Lampe bei modifiziertem Wechselstrom; Bilder der Kathode bei verschiedenen Ansätzen

II.1.3.2. Bestimmung der elektrischen Feldstärke und des Spannungsabfalls in den elektrodennahen Gebieten (ESV)

Voraussetzung für die Anwendung der klassischen Methode sind Lampen mit verschiedener Länge l , aber mit gleicher Geometrie und identischen Füllbedingungen, so daß gleiche Eigenschaften und Entladungsbedingungen garantiert sind. Lampen nach diesen Kriterien sind von Osram München bereitgestellt worden.

Die an den verschiedenen Lampen gemessene Spannung $U(t)$ kann mit folgender Beziehung beschrieben werden:

$$U(t) = U_{A+C}(t) + E(t) \cdot l.$$

Die elektrische Feldstärke E ergibt sich aus dem Anstieg in der Darstellung von Spannung über dem Elektrodenabstand durch lineare Regression. Aus dem gleichen Diagramm kann die Spannung der elektrodennahen Gebiete $U_{A+C}(t)$ extrapoliert werden. Diese Spannung ist die Summe aus Kathoden- und Anodenfall und wird allgemein als ESV bezeichnet.

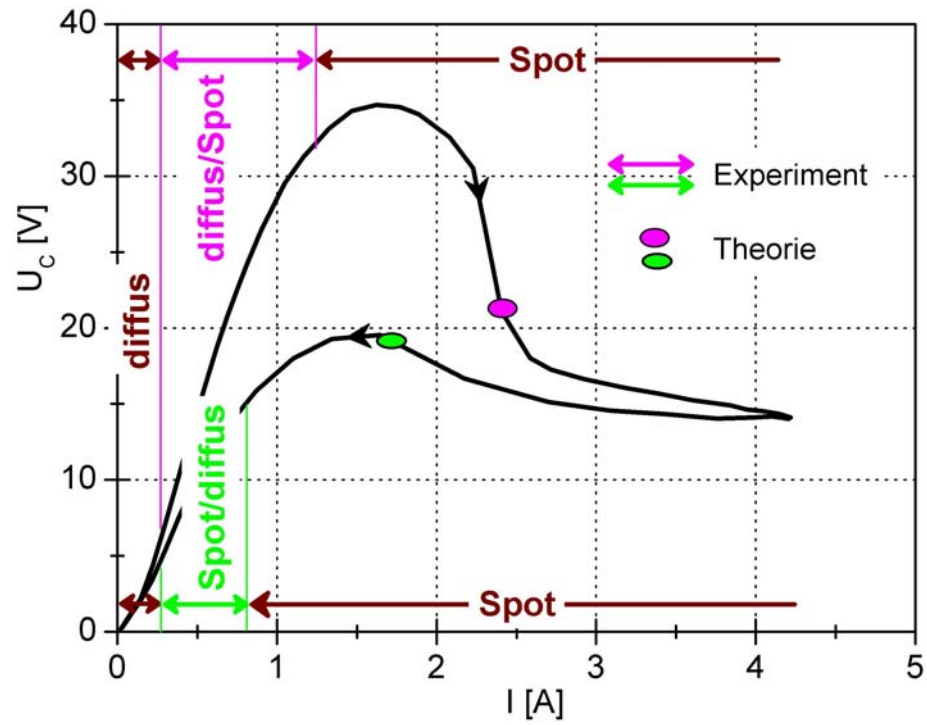


Abb. 9: Existenzbereiche des diffusen Ansatzes bei Sinus-Strom im Vergleich zu berechneten Modenwechseln in II.1.[1], die hier als farbige Ovale wiedergegeben sind

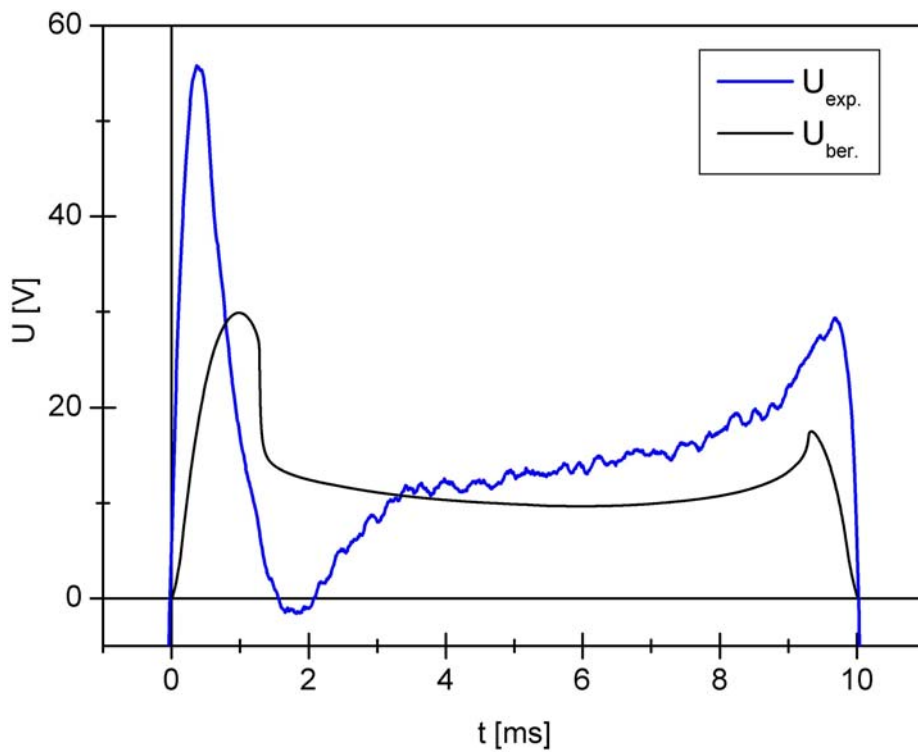


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf der gemessenen ESV und der berechneten Kathodenfallspannung

In **Abb. 10** wird der zeitliche Verlauf der gemessenen ESV und der berechneten Kathodenfallspannung verglichen. Qualitativ zeigen beide Kurven die Wiederspitzung nach dem Stromnulldurchgang und die Spannungsspitze vor der Stromumkehr. Im Gegensatz zu den numerischen Resultaten weisen die experimentellen Daten in der Stromanstiegsphase ein deutliches Minimum auf, was auf einen negativen Anodenfall hindeutet.

In der Darstellung einer quasistationären Strom-Spannungs-Charakteristik $U(I(t))$ sind die Phasen, in denen Modellierung und Experiment übereinstimmen, noch besser zu erkennen. Besonders nach dem Strommaximum hin zum Nulldurchgang sind die Differenzen minimal (**Abb. 11**), während vor dem Strommaximum die experimentellen Werte der ESV den erwähnten zeitabhängigen, negativen Anodenfall anzeigen (II.1.;[2]).

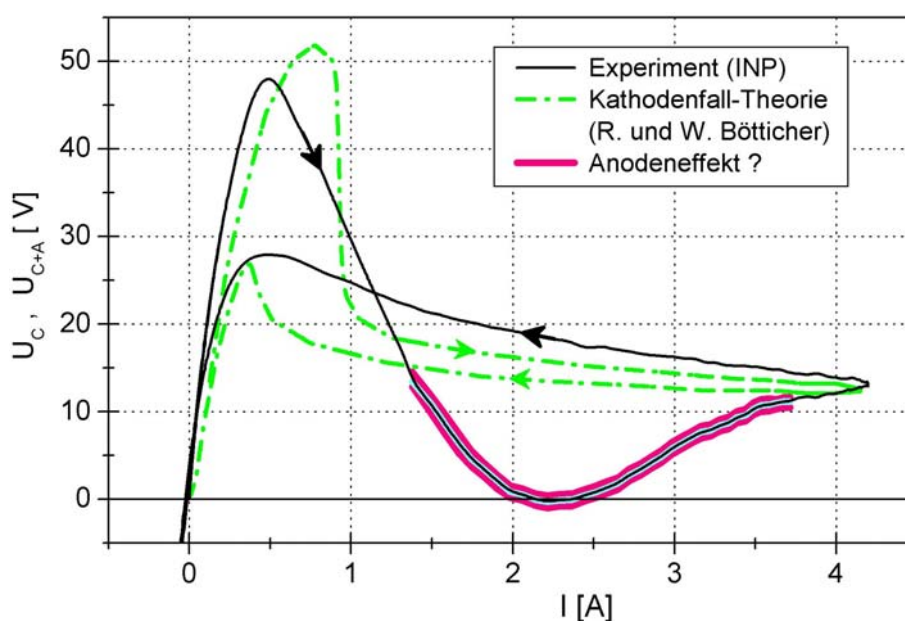


Abb. 11: Vergleich von gemessener ESV und berechnetem Kathodenfall im Strom-Spannungs-Diagramm

II.1.3.3. Erfüllungsstand des AP4

Dieses Arbeitspaket wurde modifiziert, da Kapazität für die ursprünglich vorgesehene theoretische Beschreibung der Bogensäule nicht zur Verfügung stand. In diesem Rahmen wurden nun Experimente zum Modenwechsel des Kathodenansatzes (Spot-diffus) - die ursprünglich nicht vorgesehen waren - sowie zur Spannung der elektrodennahen Bereiche (ESV) durchgeführt, die mit entsprechenden Rechnungen unseres Kooperationspartners von der Universität Hannover verglichen werden konnten. Insgesamt ergab sich eine gute qualitative Übereinstimmung, sowohl bei den Modenwechseln als auch bei der ESV. Da die Theorie nur Aussagen zum Kathodenfall macht, die ESV aber aus der Summe von Kathoden- und Anodenfall besteht, ließen sich aus der Differenz Schlüsse über einen negativen Anodenfall ziehen.

II.1.4. Laseraufheizung der Elektroden (AP3)

II.1.4.1. Messung der Elektrodentemperatur und Bestimmung der absorbierten Laserenergie

Für die Untersuchungen wurde eine senkrecht betriebene Hochdruckentladung verwendet, deren Elektroden mit einem Diodenlaser ($\lambda = 808 \text{ nm}$; $P_{L,\max} = 37,3 \text{ W}$) bestrahlt wurden. Der Laser war seitlich auf den oberen Teil der Elektrode direkt unterhalb der Elektrodenspitze gerichtet. Sein Strahldurchmesser auf der Elektrode betrug $0,5 \text{ mm}$; der Durchmesser der Elektroden (reines Wolfram) betrug ebenfalls $0,5 \text{ mm}$. Das Entladungsgefäß aus Quarz entsprach dem einer handelsüblichen 150-W -Lampe, wobei längere Elektroden und entsprechend ein geringerer Elektrodenabstand verwendet wurde (s. II.1.3.1.). Dadurch war der vordere Teil der Elektroden im zylindrischen Teil des Entladungsgefäßes angeordnet und so einer ungestörten optischen Beobachtung zugänglich. Die Lampen waren mit 23 mg Quecksilber gefüllt (Zündgas Argon) und arbeiteten im ungesättigten Regime, was zu einem Arbeitsdruck von 7 bar führte. Betrieben wurden die Entladungen vorzugsweise mit rechteckförmigem Wechselstrom geringer Frequenz ($1,8 \text{ A}$; $0,05 \text{ Hz}$), um quasistationäre Verhältnisse zu schaffen. Der Laser wurde in der Mitte jeder Halbwelle einmal für 3 s eingeschaltet; er bestrahlte stets die untere Elektrode, die abwechselnd Kathode und Anode war. Der Ansatz des Plasmas an den Elektroden war stets diffus.

Messung der Elektrodentemperatur:

Die Elektrodentemperatur wurde mit einem Pyrometer (IS10, Impac) gemessen, das in einem Spektralbereich von $0,7$ bis $1,1 \mu\text{m}$ arbeitet und einen Meßbereich von 1170 bis 3770 K hat. Die Beobachtungsrichtung des Pyrometers war gegenüber dem Laserstrahl um 110° auf dem Umfang der Elektrode versetzt. Um Verfälschungen der Temperaturmessung durch verbleibende Laserstreustrahlung zu verhindern, wurde ein Notch-Filter verwendet, das Strahlung bei der Laserwellenlänge um den Faktor 10^4 schwächt.

Bestimmung der absorbierten Laserenergie:

Der Anteil η der Laserleistung P_L , der von der Elektrodenoberfläche absorbiert wird, ist eine wichtige Eingangsgröße für die theoretische Behandlung. Wenn man die Elektrode nur mit dem Laser aufheizt (keine Entladung), dann kann man η aus einer Messung der Temperaturverteilung $T(z)$ längs der Elektrodenachse von der Spitze ($z = z_1$) bis hin zu einer axialen Position $z_0 < z_1$, die deutlich von der Aufheizzone separiert ist, bestimmen:

$$\frac{4}{\pi d^2} \eta P_L = \left(\lambda \frac{dT}{dz} \right)_{z_0} + \sigma (\epsilon_t T_0^4)_{z_1} + \frac{4\sigma}{d} \int_{z_0}^{z_1} \epsilon_t T^4 dz .$$

Hierin ist d der Elektrodendurchmesser, λ das Wärmeleitvermögen, σ die Stefan-Boltzmann-Konstante und ϵ_t das totale Emissionsvermögen.

Abb. 12 a zeigt solche Temperaturmessungen, **Abb. 12 b** gibt die absorbierte Laserleistung als Funktion der eingestrahlten Leistung wieder. Aus **Abb. 12 a** entnimmt man, daß ein relativ linearer Temperaturabfall längs der Elektrode auftritt. Die Kerbe bei $z = -4 \text{ mm}$ entspricht einer Inhomogenität des Quarzgefäßes. Für den Wirkungsgrad erhält man $\eta \approx 19 \%$.

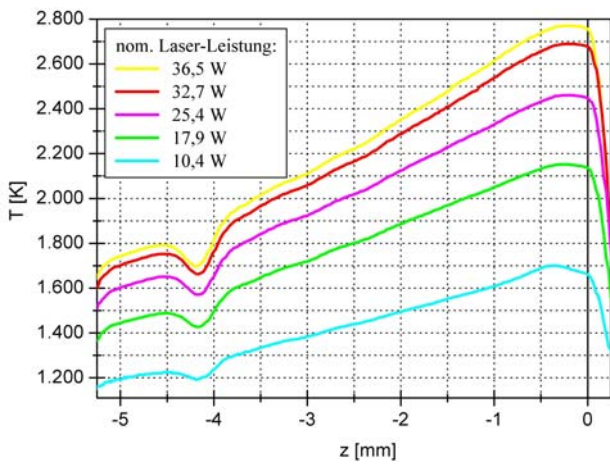


Abb. 12 a: Temperaturverlauf längs der Elektrode bei alleiniger Laser-Heizung.

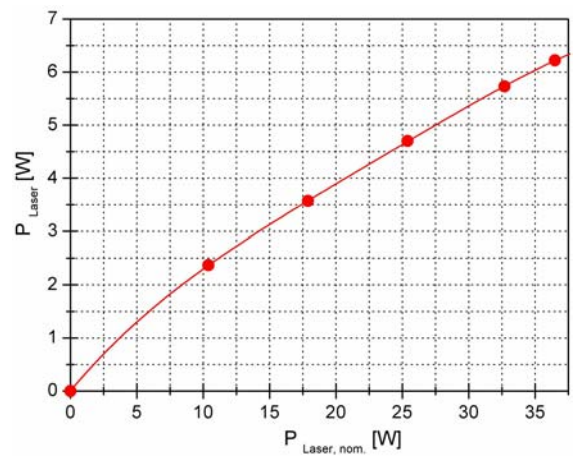


Abb. 12 b: Absorbierte Laser-Leistung

II.1.4.2. Auswirkung der Laserheizung auf die Entladungsspannung und die Elektroden-temperatur

Abb. 13 a entnimmt man den Einfluß der Laserheizung auf die Entladungsspannung: Bei Bestrahlung der Kathode kommt es zu einer merklichen Verringerung der Entladungsspannung, die mit zunehmender Laserleistung anwächst; bei Bestrahlung der Anode bleibt die Spannung praktisch unverändert (bei größerer Auflösung erkennt man eine schwache Zunahme der Spannung, die mit der Laserleistung anwächst; die Absolutwerte sind um ca. eine Größenordnung kleiner als bei der Bestrahlung der Kathode).

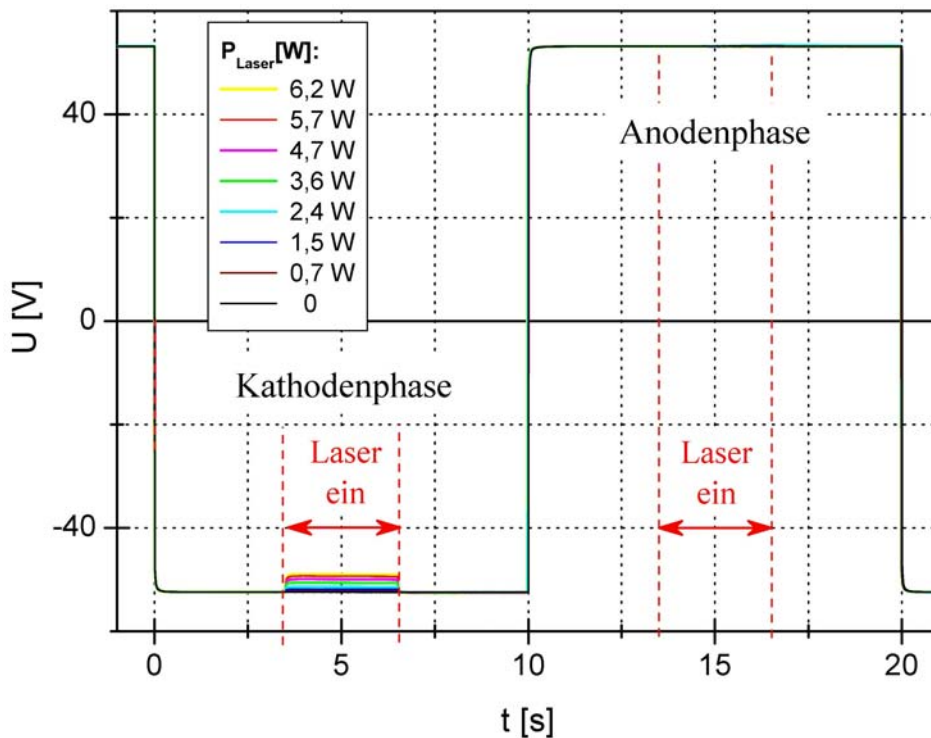


Abb. 13 a: Spannungsverlauf an der Entladung bei zeitweiliger Laser-Bestrahlung einer Elektrode

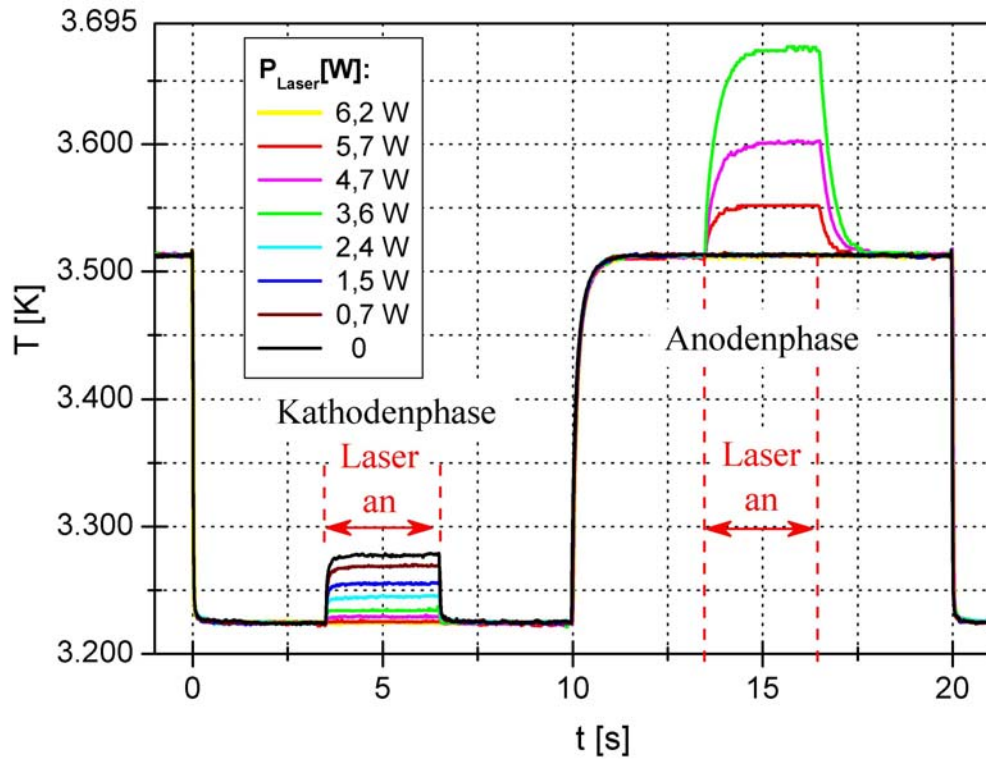


Abb. 13 b: Temperaturverlauf der Elektrodenspitze bei zeitweiliger Laser-Bestrahlung in der Kathoden- und Anodenphase

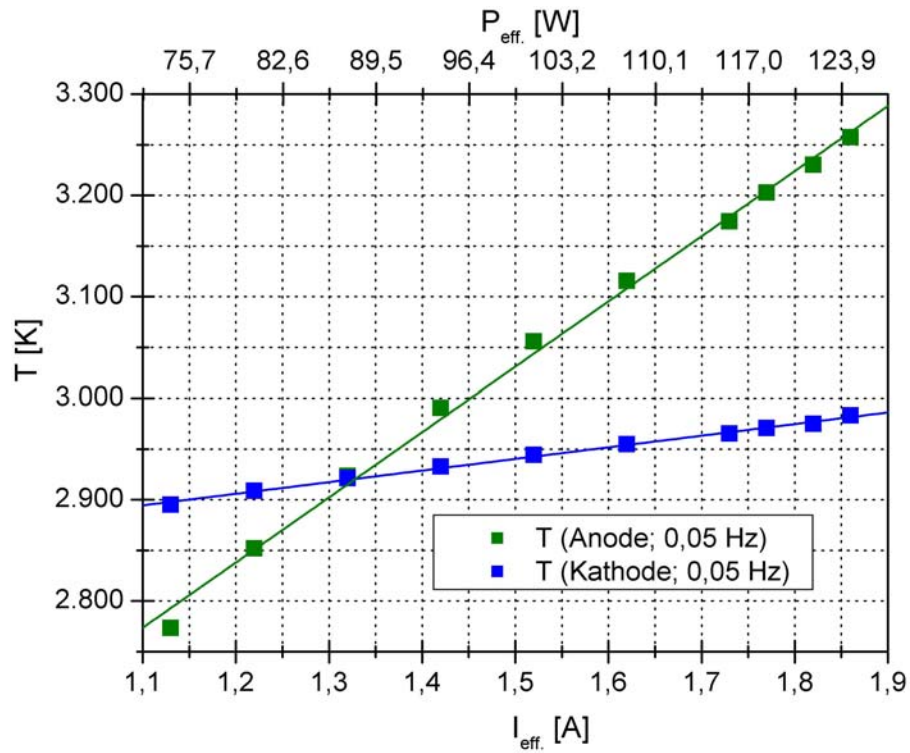


Abb. 14: Elektrodenspitzentemperaturen in Abhängigkeit vom Betriebsstrom (andere Lampe als in Abb. 13!)

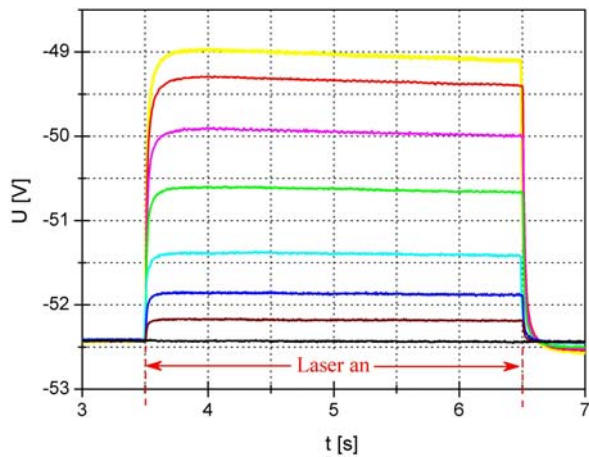


Abb. 15 a: Abnahme der Entladungsspannung bei Laser-Bestrahlung der Kathode

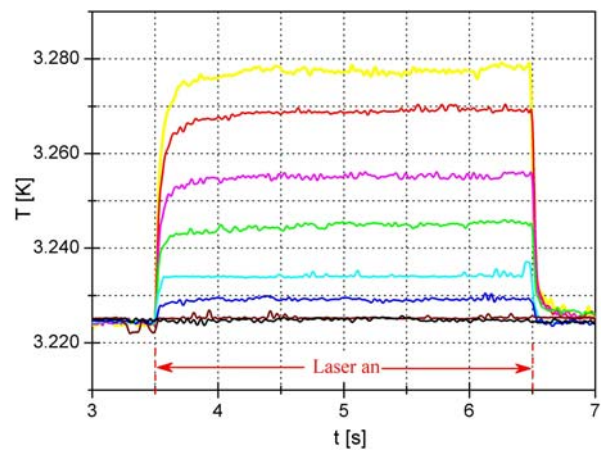


Abb. 15 b: Entsprechende Temperaturzunahme der Kathodenspitze

Abb. 13 b zeigt die Reaktion der Temperatur an der Elektrodenspitze: Bei der Bestrahlung der Kathode nimmt die Temperatur nur mäßig zu, während bei der Bestrahlung der Anode die Temperaturzunahme hier mehr als zehnmal höher ist. Die Bestrahlung der Anode mußte bereits nach der dritten Leistungsstufe des Lasers abgebrochen werden, da bei der nächsten Leistung bereits die Schmelztemperatur von Wolfram ($T_s^W \approx 3680$ K) erreicht wurde.

(Aus **Abb. 13 b** ersieht man, daß die Temperatur der ungestörten Anode um ca. 300 K höher ist als die der Kathode; dieser Unterschied ist abhängig von der Stromstärke; unterhalb von 1,3 A wird die Anodentemperatur - bei dem hier verwendeten Elektrodendurchmesser von 0,5 mm - kleiner als die der Kathode (s. **Abb. 14**.)

Abb. 15 zeigt noch einmal die Abnahme der Brennspannung (a) und die simultane Zunahme der Kathodenspitzentemperatur (b) in einem vergrößerten Maßstab. In **Abb. 16** sind diese beiden Größen über der absorbierten Laserleistung aufgetragen und schließlich in **Abb. 17** die Spannungsab-

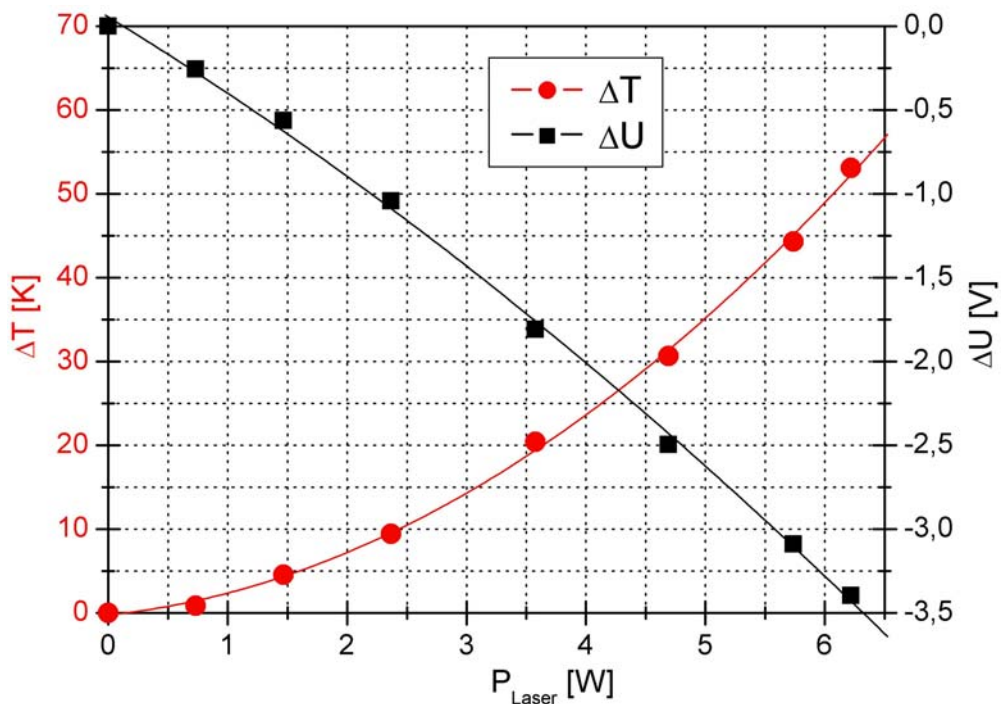


Abb. 16: Temperaturzunahme und Spannungsabnahme an der Kathode in Abhängigkeit von der absorbierten Laser-Leistung

nahme über der Temperaturzunahme (bei Bestrahlung der Kathode!). Die beiden letzten Abbildungen (insbesondere **Abb. 16**) enthalten die Quintessenz der vorliegenden Messungen, wenn man einmal vom Zeitverhalten absieht, das einer weiteren Untersuchung bedürfte. Aus **Abb. 16** erkennt man, daß Temperaturzunahme und Spannungsabnahme monoton, aber nicht linear von der Laserleistung abhängen; **Abb. 17** zeigt, daß die in Rede stehenden Größen auch untereinander keinen linearen Zusammenhang aufweisen: mit zunehmender Spannungsabnahme benötigt man eine höhere Temperaturdifferenz, um eine gleiche Abnahme zu erzielen.

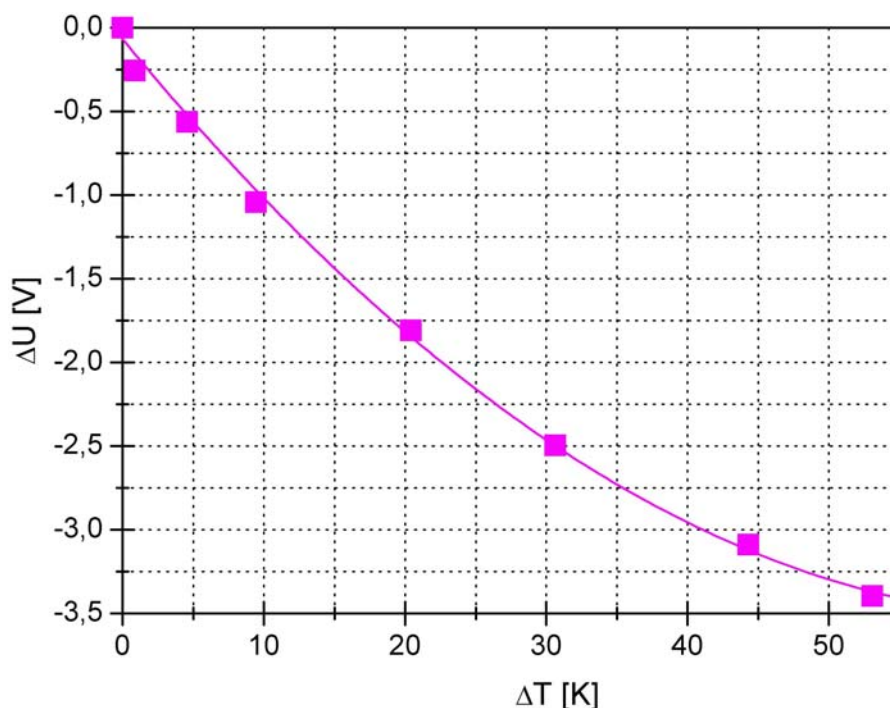


Abb. 17: Zusammenhang zwischen der Brennspannungsabnahme und der Zunahme der Kathodenspitzentemperatur

II.1.4.3. Interpretation der Ergebnisse der Laseraufheizung

Sorgt man bei einer brennenden Hochdruck-Entladung, die mit einem konstanten Entladungsstrom betrieben wird, für eine zusätzliche Aufheizung der Kathode, etwa durch Bestrahlung mit einem Laser, so kann man sich den Einfluß dieser Einwirkung grob wie folgt vorstellen:

- Die zusätzliche Heizung der Kathode mit der Laserstrahlung ersetzt einen Teil der ursprünglichen Kathodenaufheizung durch die im Kathodenfall beschleunigten Ionen.
- Da die Kathode eines Hochdruckbogens und das sich anschließende Plasma ein komplexes, sich selbst regelndes System darstellen, kann nun der Kathodenfall verringert werden.
- Das zieht eine Verringerung des Ionenstroms nach sich, was einen erhöhten Elektronenstrom erfordert ($I_{\text{ges.}} = \text{const.}$).
- Daher muß die Kathode über die ursprüngliche Temperatur hinaus aufgeheizt werden.

An der Anode spielen sich solche komplizierten Prozesse nicht ab; die Laserleistung kann praktisch komplett zur Aufheizung verwendet werden. Daher ist die Temperaturzunahme durch Laseraufheizung der Elektroden an der Anode stets größer als die an der Kathode. Darüber hinaus erzeugt die Laserbestrahlung der Anode im Experiment jedoch eine geringe Zunahme der Entladungs-

spannung (eine Größenordnung kleiner als die Abnahme bei Bestrahlung der Kathode), deren Bedeutung noch nicht verstanden wird.

II.1.4.4. Erfüllungsstand des AP3

Dieses Arbeitspaket wurde infolge der interessanten Ergebnisse und des steten Zuspruchs des Beirats wesentlich über die ursprüngliche Aufgabenstellung hinaus erweitert. Die entsprechenden Untersuchungen nahmen einen größeren Teil der zweiten Hälfte der Themenlaufzeit ein. Nachdem wir in der ersten Hälfte eine sehr gute Zusammenarbeit mit R. Bötticher (Uni Hannover) hatten, verlagerte sich in der zweiten Hälfte der Schwerpunkt der Modellierung unserer Ergebnisse nach Karlsruhe, wo P. Flesch eine z. T. sehr befriedigende Übereinstimmung mit den Ergebnissen des INP bis ins Detail erzielte (II.1.[3]). Die Ursachen für einige quantitative Abweichungen (z. B. für die Temperaturerhöhungen an der Kathode) sind noch nicht klar. Vorläufige Rechnungen von H. Schneidenbach (INP) auf der Grundlage eines Modells, das von dem von Flesch verwendeten stark abweicht (Neumann-Modell II.1.[4]), zeigen eine quantitative Übereinstimmung des Zusammenhangs zwischen der Erwärmung der Kathode (hier wurden die experimentellen Werte verwendet) und der Spannungsabsenkung in Abhängigkeit von der absorbierten Laserleistung (**Abb. 18**). Das Arbeitspaket 3 wurde aus unserer Sicht mit sehr gutem Erfolg bearbeitet.

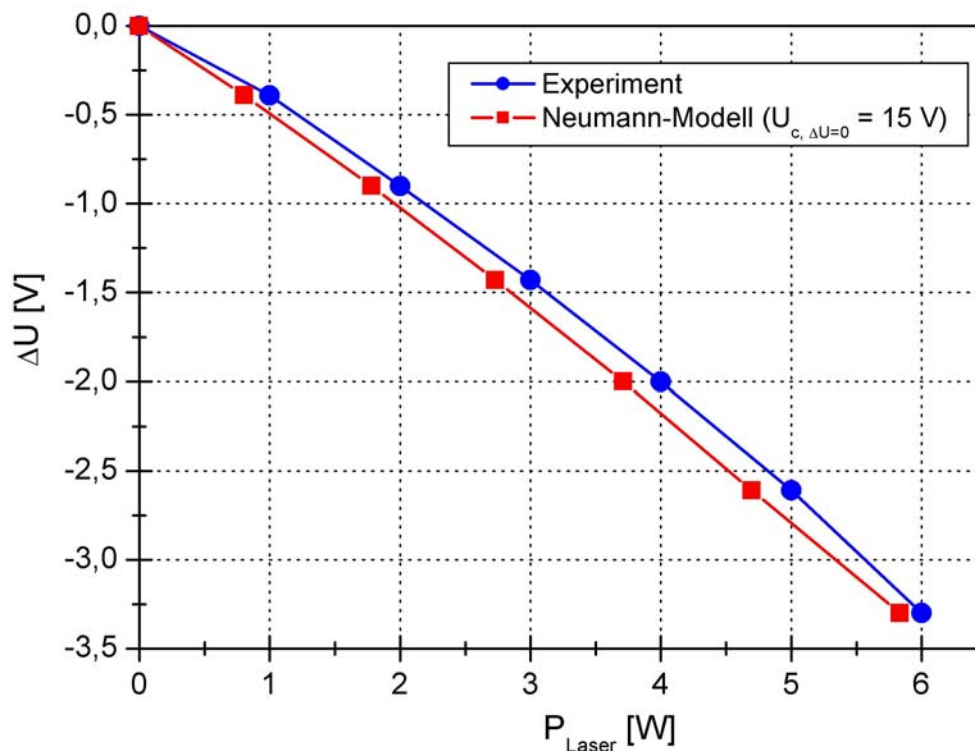


Abb. 18: Abhängigkeit der Spannungsniedrigung von der absorbierten Laserleistung; Vergleich zwischen Experiment und Theorie (nach H. Schneidenbach)

II.1.5. Feldstärke und Elektrodenschichtspannung (ESV) bei verschiedenen Füllgasen und Betriebsweisen (AP5)

Die elektrische Feldstärke wurde ebenso wie die Spannung der elektrodennahen Gebiete (ESV) nach der klassischen Methode durch Messungen an Lampen unterschiedlicher Länge ermittelt. Die Messungen an Edelgasen wurden gemeinsam mit den Kollegen von der Universität Bochum durchgeführt. Die Bedingungen wurden möglichst einheitlich gestaltet:

Senkrechter Betrieb mit sinusförmigem Strom bei 50 Hz ($I_{\text{eff}} = 3 \text{ A}$),
 Arbeitsdruck in den Entladungen: 6 bar,
 Wolfram-Elektroden aus dotiertem Material (G18),
 Durchmesser: 0,7 mm.

Abb. 19 zeigt die gemessenen Feldstärken für Ar, Xe und Hg. Man erkennt, daß die Feldstärke im Hg mindestens das Dreifache der Werte in Ar und Xe beträgt. Der qualitative Verlauf ist ähnlich: nach einer „Wiederzündspitze“ folgt das mehr oder weniger konstante Spannungsplateau des entwickelten Bogenstadiums, danach geht die Feldstärke mit dem Strom nach Null.

Der Verlauf der ESV zeigt ein differenzierteres Bild (**Abb. 20**): Hier fällt insbesondere das Minimum bei Hg auf, das nach der Wiederzündspitze auftritt (s. **Abb. 10**), sowie eine weitere Spannungsspitze kurz vor dem Nulldurchgang des Stromes. Im mittleren Bereich einer Halbwelle um das Strommaximum herum ist die ESV nicht nur relativ konstant, sondern - im Gegensatz zur Feldstärke - auch für alle drei Füllmaterialien vergleichsweise identisch (12 - 15 V). Das bedeutet, daß der Spannungsbedarf im elektrodennahen Bereich während der Bogenphase für alle drei Füllungen vergleichbar ist, was überrascht.

Schließlich ist in **Abb. 21** noch die ESV einer impulsgetriebenen Argonentladung zu sehen. Der Impuls besteht darin, daß im aufgeprägten Sinusstrom (50 Hz) jede 5. Halbwelle einen wesentlich höheren Strom (12,5 A) aufweist, als in den anderen vier Halbwellen (2 A). Man erkennt, wie die ESV in der ersten Halbwelle nach dem Impuls vorn noch „verrundet“ ist (hohe Resttemperatur der Elektrode durch den Impuls), während die Wiederzündspitze dann wieder stark anwächst. Zusätzlich ist hier noch der Einfluß einer kontinuierlichen Laserbestrahlung (6,2 W) einer Elektrode dargestellt. Solange diese Elektrode Anode ist, passiert nichts. Erfolgt die Bestrahlung in der Kathodenphase, dann wird die Zündspitze im Impuls stark reduziert und ihr Wiedererstehen hinausgezögert.

Der erste Teil des **AP5** wurde erfolgreich bearbeitet. Durch die Kooperation mit der Universität Bochum war es möglich, neben Hg auch noch Ar und Xe zu untersuchen. Die Feldstärken der drei Füllmaterialien sind ähnlich; die Edelgase haben wesentlich kleinere Werte. Die ESV von Hg ist völlig anders strukturiert als die der Edelgase. Ferner wurde Impulsbetrieb mit und ohne Laserbestrahlung einer Elektrode einbezogen. Der Vergleich mit Rechnungen der Universität Hannover wurde bereits in Abschnitt II.1.3. angestellt. Abgesehen von den Schlußfolgerungen aus AP1 (axiale und radiale Temperaturverteilungen) wurden Betrachtungen zum Charakter der sich zu den Elektroden hin verjüngenden Plasmabereichen angestellt.

Danach setzt sich die Gesamtspannung aus vier Teilspannungen zusammen:

$$U_{\text{ges}} = U_A + U_C + E_S \cdot (l - \Delta l_1 - \Delta l_2) + „2 \cdot \int \delta E_{\text{conic}} dl”.$$

Dabei sind

U_A - die Kathodenfallspannung,

U_C - die Anodenfallspannung,

E_S - die Feldstärke der homogenen Säule,

l - der Elektrodenabstand,

E_{conic} - die Feldstärke der konischen Übergangsgebiete

($\delta E_{\text{conic}} dl$ ist einmal von 0 bis Δl_1 und dann von $l - \Delta l_2$ bis l zu integrieren),

$\Delta l_{1,2}$ - die Länge der konischen Übergangsgebiete.

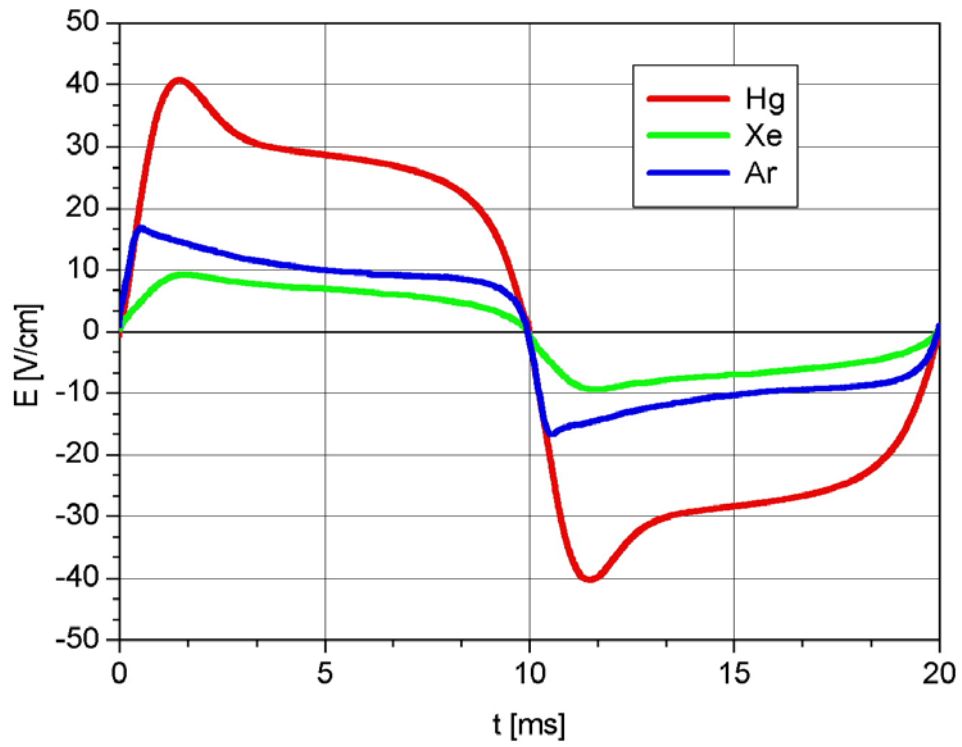


Abb. 19: Gemessene Feldstärken für Hg, Xe und Ar

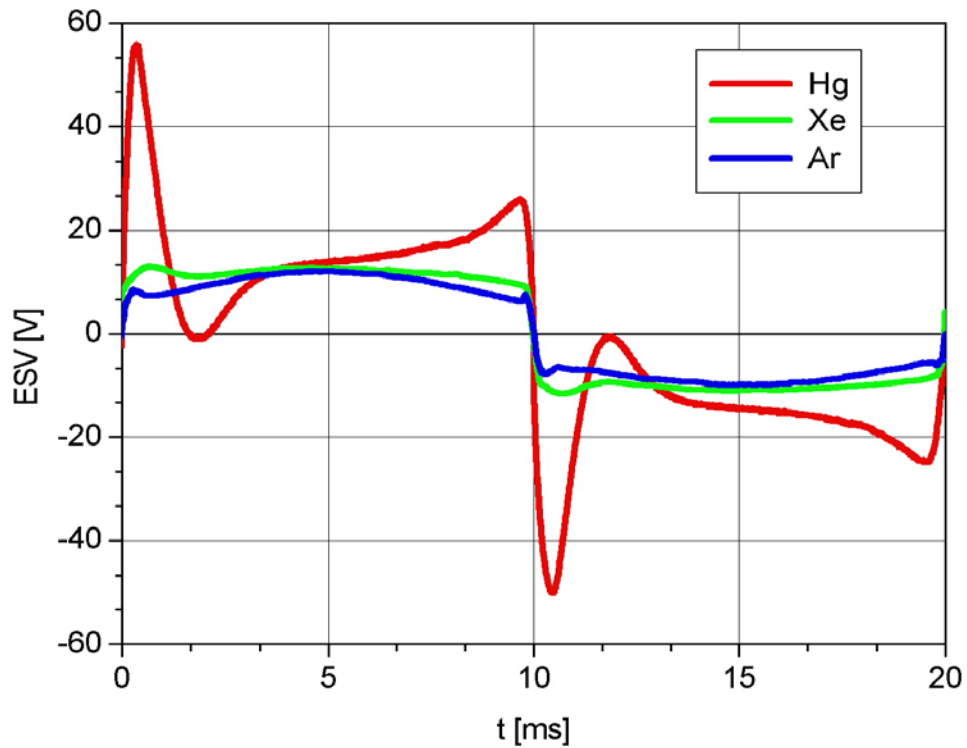


Abb. 20: Gemessene Werte der ESV für Hg, Xe und Ar

Bei bekanntem $\Delta l_{1,2}$ ergibt sich:

$$U_{ges} = U_A + U_C + „2 \int \delta(E_{conic} - E_S) dl” + E_S \cdot l = U_{A+C} + E_S \cdot l,$$

d. h., bei einer experimentellen Prozedur der Spannungsmessung an unterschiedlich langen Lampen mit gleichen Säuleneigenschaften pro Längeneinheit ergibt sich die Feldstärke in der ungestörten Säule aus dem Anstieg der $U(l)$ -Kurve, während die Extrapolation für $l \rightarrow 0$ einen Spannungswert (ESV)

$$U_{A+C} = U_A + U_C + „2 \int \delta(E_{conic} - E_S) dl”$$

ergibt.

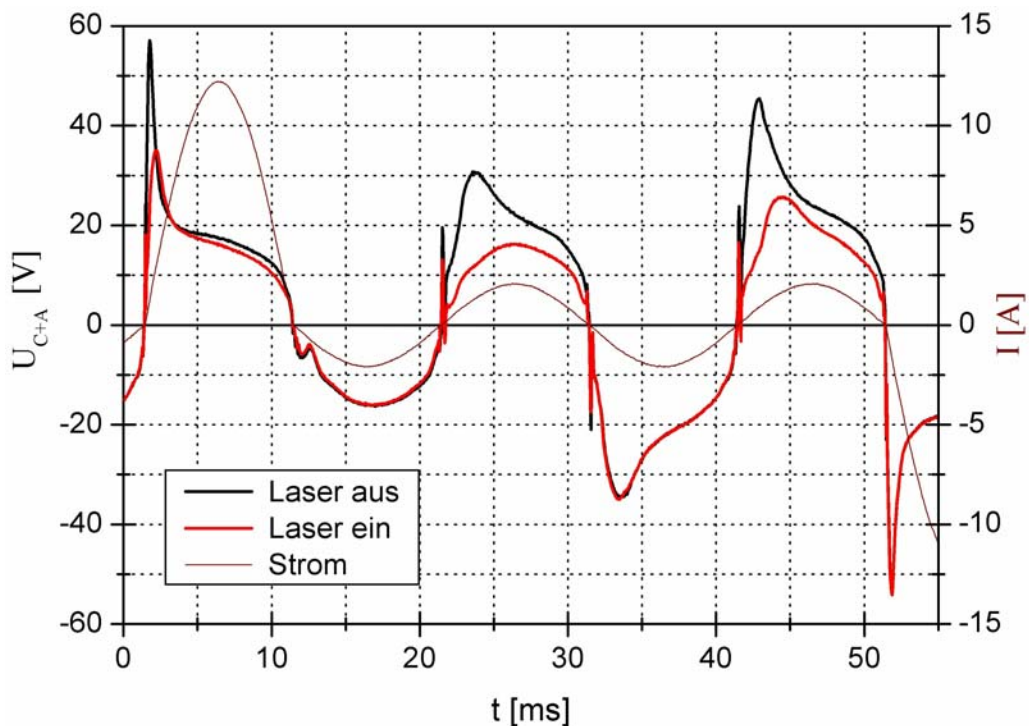


Abb. 21: ESV einer impulsgetriebenen Argon-Entladung mit und ohne Laser

Was wir als Spannung der elektrodennahen Bereiche bezeichnen, setzt sich zusammen aus dem Kathoden- und dem Anodenfall sowie aus einem Integral über die Differenz von lokaler Feldstärke in den konischen Bereichen E_{conic} und (konstanter) Säulenfeldstärke E_S , integriert über die konischen Bereiche (Länge $\Delta l_{1,2}$).

Schäfer und Stormberg II.1.[5] gehen davon aus, daß in diesen Gebieten eine Zunahme der Achsentemperatur kompensiert wird durch eine Abnahme des Querschnitts des leitenden Kanals. Auf diese Weise bleibt der Leitwert pro Längeneinheit konstant und somit auch die Feldstärke. In diesem Falle wäre die ESV (U_{A+C}) exakt gleich der Summe aus Anoden- und Kathodenfall.

II.1.6. Vergleich der pyrometrischen Verfahren der Verbundpartner (AP7)

Der Beirat des Verbundprojekts legte von Anfang an großen Wert auf die Vergleichbarkeit der z. T. unterschiedlichen pyrometrischen Verfahren, die in den Teilvorhaben angewendet wurden. Daher wurden in einer gut koordinierten Aktion (Bauer, Universität Karlsruhe) verschie-

dene Untersuchungen von allen Teilvorhaben an ein und derselben Lampe durchgeführt. Bei dieser Lampe handelte es sich um eine gleichstrombetriebene Quecksilberlampe, die eine vergleichsweise massive Anode mit einer Kegelstumpfspitze (Zylinder-Durchmesser 3,5 mm) und eine Stift-Kathode mit 0,7 mm Durchmesser hatte, wobei der Elektrodenabstand 3 mm betrug. Diese Lampe wurde nacheinander in den Labors der 5 Teilvorhaben untersucht. Die pyrometrischen Messungen bestanden aus axialen Temperatur-Scans an Anode und Kathode bei drei verschiedenen Strömen. Daraus konnten Temperaturen in bestimmten Abständen von der Anoden- bzw. Kathodenspitze in Abhängigkeit vom Entladungsstrom entnommen werden. Die Streubreite der Messungen war in Abhängigkeit vom Ort der Messung sehr unterschiedlich; insbesondere die hohen Temperaturen an der Spitze der Elektroden wiesen eine hohe Streuung auf, während die Messungen bei geringeren Temperaturen am Schaft recht gut übereinstimmten. Die Messungen des INP belegten stets einen guten Mittelplatz innerhalb des Streubereichs und waren i. a. in enger Nachbarschaft zu den Messungen der Bochumer und der Karlsruher Gruppe. Ausführlichere Daten und Bewertungen finden sich im Schlußbericht der Universität Karlsruhe.

Wir schließen daraus, daß die pyrometrischen Messungen bei uns mit großer Sorgfalt durchgeführt wurden und vertrauenswürdig sind.

Der gesamte Komplex „Pyrometrie“, der weit mehr umfaßte als die Messungen an der Vergleichslampe, war in unserem Antrag nicht vorgesehen. Er wurde von uns im Rahmen des **AP7** bearbeitet, das dazu allerdings vorgezogen werden mußte. Ohne diese Vorarbeiten hätten die Untersuchungen zur Laserbestrahlung von Elektroden - die vom Beirat forciert wurden - nicht in dem nun vorliegenden Umfang durchgeführt werden können. Das **AP6**, das erste Versuche zur separaten Bestimmung des Spannungsabfalls im kathoden- bzw. anodennahen Gebiet vorsah, konnte aus Zeitgründen nicht mehr begonnen werden.

II.1.7. Literatur für Abschnitt II.1.

- II.1.[1] R. Böttcher and W. Böttcher
Numerical modeling of a dynamic mode change of arc attachment to cathodes of high-intensity lamps
J. Phys. D: Appl. Phys. **34** (2001) 1110
- II.1.[2] A. Kloss, H. Schneidenbach, and H. Hess
Electrode Sheath Voltages in Pulsed High-Pressure Mercury Arcs
J. Appl. Phys. **88** (2000) 1271
- II.1.[3] P. Flesch and M. Neiger
Time-dependent simulation of plasma and electrodes in HID lamps with different electrode shapes
Proc. 26th ICPIG, Greifswald, Germany, 2003, p. 61
- II.1.[4] W. Neumann
The Mechanism of the Thermoemitting Arc Cathode
Akademie-Verlag, Berlin 1987
- II.1.[5] R. Schäfer and P. Stromberg
Time-dependent behavior of the contraction regions of high-pressure mercury arcs
J. Appl. Phys. **57** (1985) 2512

II.1.8. 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 erfüllt

Aufgabe nicht erfüllt

zusätzliche Aufgabe erfüllt

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	M	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
<u>AP1</u>							EI							Verlängerung		
<u>AP2</u>							L									
<u>AP3</u>							E									
M E I L E N								S T E I N								
<u>AP4</u>							S									
<u>AP5</u>							T									
<u>AP6</u>							EI									
<u>AP7</u>							N									

Der Bearbeitungsstand der einzelnen Arbeitspakete soll im folgenden kurz charakterisiert werden:

- AP1: Temperaturverteilung in Kurzbogenlampen mittels Bartels-Methode sowohl axial als auch radial gemessen. Dabei bis auf 20 μm an die Elektroden herangegangen. Gesamtdruck in Lampen für Allgemeinbeleuchtung aus Feldstärkemessungen und Vergleich mit Strahlungstransportmodell ermittelt. Vergleiche mit Rechnungen an der Uni Karlsruhe ergaben gute Übereinstimmung.
- AP2: Meßanordnung modifiziert und erprobt; für Grundzustand von Na Dichten von $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ bestimmt. Methode liefert mittlere Dichte auf Sehstrahl; mit mittlerer Temperatur folgt Partialdruck der Größenordnung 10 mbar. Zur Erfassung weiterer Elemente muß die Empfindlichkeit der Apparatur erhöht werden.
- AP3: Aufgabenstellung erarbeitet, Laser beschafft, erste Experimente durchgeführt. Ergebnisse so interessant, daß diese Arbeiten auf Vorschlag des Beirates auch nach dem Meilenstein und während der Verlängerung fortgeführt wurden. Die Pyrometrie war ein dazu unerläßliches Hilfsmittel; sie gewann innerhalb des Verbundes auch als Methode an eigenständiger Bedeutung (s. II.1.6.). Die entsprechenden Vorbereitungen und weitergehende Untersuchungen wurden in das ursprünglich freigehaltene AP7 verlegt, das dazu vorgezogen werden mußte. Extrem interessante Zusammenhänge zwischen Kathodenaufheizung und Brennspannungserniedrigung (Kathodenfall!) experimentell ermittelt und im Modell nachempfunden. Praktische Anwendung absehbar. Weiterer Forschungsbedarf.
- AP4: Hier wurde an einigen Beispielen für die gut beherrschte Hg-Entladung gezeigt, daß die Differenz zwischen der gemessenen Entladungsspannung und der berechneten Säulen-

spannung in guter Näherung mit der rein experimentell bestimmten Elektrodenschichtspannung (ESV) übereinstimmt.

Für Lampen mit komplexerer Füllung (Hg mit Zündgas Ar und als Zusätze TII und TmI₃) konnte diese Übereinstimmung noch nicht hergestellt werden, was auf Mängel der im Modell verwendeten Daten hindeutet. Darauf weist auch der Umstand hin, daß bezüglich der radialen Temperaturverteilung bisher eine gute Übereinstimmung für die Fälle mit höherer Konzentration der Zusätze nicht zu erzielen war. Methode stellt gute Möglichkeit zur Konsistenzprüfung dar.

- AP5: Es wurden charakteristische Unterschiede im Verhalten von Feldstärke und ESV zwischen Hg auf der einen Seite und Ar und Xe auf der anderen Seite festgestellt. Obwohl sich in der ESV qualitativ (vom Zeitverlauf her) ein ganz unterschiedliches Bild ergab, waren die absoluten Beträge sehr viel eher vergleichbar, als die der Feldstärke, die ansonsten einen durchaus ähnlichen Verlauf hatten.
- AP6: Leider ist es aus Zeit- und Kapazitätsgründen nicht dazu gekommen, eine separate Bestimmung der Fallspannung im kathoden- bzw. anodennahen Gebiet an einem lampenähnlichen, geschlossenen Entladungsgefäß vorzunehmen. Auf diesem Gebiet besteht weiterhin Forschungsbedarf, insbesondere um dem Phänomen des negativen Anodenfalls auf die Spur zu kommen.
- AP7: Dieses Arbeitspaket, das fürsorglich für aufkommende Zusatzarbeiten freigehalten wurde, konnte für die Bearbeitung der mit der Pyrometrie verbundenen Aufgaben, die ursprünglich in unserem Antrag nicht vorgesehen waren, genutzt werden, wobei die Arbeiten aus logistischen Gründen (quantitative Auswertung der Laserheizung der Elektroden) vorgezogen werden mußten.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die einzelnen Arbeitspakete in unterschiedlichem Maße - jedoch überwiegend gut - erfüllt wurden. Dem nicht bearbeiteten AP6 stehen bedeutende Mehrarbeiten im AP3 gegenüber. AP7 wurde mit Inhalt erfüllt und mußte vorgezogen werden. Den Vorschlägen des Beirats zu gemeinsamen Experimenten mit den Bochumer Kollegen in Edelgasen (Protokoll 5. Treffen/Kaiserslautern) wurde bei mehreren gemeinsamen Meßkampagnen in Bochum nachgegangen. Der Vorschlag, mit Laserheizung einen Modenwechsel im Kathodenansatz zu erzwingen (ebenda), erschien uns sehr verlockend, konnte aber aus Zeitgründen nicht mehr realisiert werden.

Die Zusammenarbeit mit den theoretisch arbeitenden Kollegen war sehr eng; das gilt bis zum Meilenstein für R. (und W.) Böttcher (Uni Hannover) und im zweiten Teil des Vorhabens insbesondere für P. Flesch (Uni Karlsruhe). Es wurde zu unseren Experimenten gerechnet bzw. wurden von uns Experimente zu bestimmten Modellannahmen durchgeführt. Die Übereinstimmungen waren stets mindestens qualitativ bzw. gingen oft darüber hinaus. Auch H. Schneidenbach aus unserem Hause trug einiges zur Aufhellung bestimmter Sachverhalte bei.

II.2. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit

Der Nutzen der im Rahmen des Teilvorhabens gewonnenen Erkenntnisse besteht - allgemein gesprochen - in einer erweiterten Kenntnis des Stromüberganges von der Elektrode ins Plasma (und umgekehrt). Dieser Übergang, der sich bei zeitabhängiger Energieeinspeisung z.B. im Quecksilber ganz anders darstellt als in bestimmten Edelgasen, ist eine der Ursachen für den vergleichsweise geringen Wirkungsgrad ($\approx 30\%$) von HID-Lampen. Für ein verbessertes Elektrodendesign benötigt man eine verifizierte theoretische Beschreibung. Mit Hilfe der Laserbestrahlung der Elektroden während des Betriebes und der Untersuchung der Reaktion des Bogens darauf läßt sich u.U. ein Mittel gewinnen, das verschiedene Kathodentheorien besser differenzieren kann als bisherige Experimente.

Die merkliche Reaktion der Bogenspannung auf die Laserbestrahlung ist ferner abhängig vom Zustand der Elektrode wie etwa von einer bestimmten Dotierung bzw. deren Tiefenverteilung oder von einer Oberflächenstruktur oder einem Belag. Damit hätte man ein Mittel in der Hand, den Zustand einer Elektrode in situ, also z.B. in abgeschlossenen Lampen zu bestimmen.

II.3. Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Derzeit gibt es an keiner anderen Stelle der Welt ein derart umfangreiches und ambitioniertes Programm zur Untersuchung von Elektroden für Hochdrucklampen bei zeitlich veränderlicher Energieeinspeisung. Der Stand der Forschung wird von Mitgliedern unseres Verbundprojekts bestimmt, wofür Einladungen zu Vorträgen auf den großen internationalen Tagungen unseres Fachgebiets zeugen (9th Int. Symp. on the Science and Technology of Light Sources, Ithaca, USA, 2001: J. Mentel; ICPIG XXVI, Greifswald, 2003: J. Mentel; K. Günther; 38th IEEE Conf.: Industry – Application – Society, Salt Lake City, USA, 2003: M. Kettlitz), ebenso wie das große Interesse, das Posterpräsentationen durch Mitarbeiter auf diesen und anderen Konferenzen entgegengebracht werden.

II.4. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

- R. Böttcher and W. Böttcher
Numerical modeling of a dynamic mode change of arc attachment to cathodes of high-intensity lamps
J. Phys. D: Appl. Phys. **34** (2001) 1110-1115
- M. Kettlitz und H. Pursch
Spectroscopic and optical investigations for the determination of plasma parameters near the electrodes of short arc lamps
DPG-Frühjahrstagung, Berlin 4/2001, Poster
- M. Kettlitz and R. Großjohann
Säulenkontraktion im elektrodennahen Raum von Alkali- und Quecksilber-Hochdruckentladungen
10. Bundesdeutsche Fachtagung für Plasmatechnologie, Greifswald 2001, Poster
- H. Pursch, H. Schöpp, M. Kettlitz, and H. Hess
Dynamic mode changes of arc attachment on the cathode of ac high-pressure mercury discharges
Proc. 9th Int. Symp. on the Science and Technology of Light Sources, Ithaca, New York, USA, 2001, p. 195
- M. Kettlitz and H. Pursch
Determination of plasma parameters near the electrodes of short arc lamps
Proc. 9th Int. Symp. on the Science and Technology of Light Sources, Ithaca, New York, USA, 2001, p. 193
- M. Sieg, B. Nehmzow, M. Kettlitz und H. Heß
Einfluß von Laser-Elektrodenheizung auf den Kathodenfall in Hg- Hochdruck-Entladungen
Verhandl. DPG (VI) 37, 5/43 (2002)
DPG-Frühjahrstagung Bochum, 3/2002, Poster

- M. Kettlitz and R. Großjohann
On the plasma constriction close to the electrodes of high-pressure mercury and sodium lamps
J.Phys. D: Appl. Phys. **35** (2002) 1702 - 1706
- H. Pursch, H. Schöpp, M. Kettlitz, and H. Hess
Arc attachment and fall voltage on the cathode of an ac high-pressure mercury discharge
J. Phys. D: Appl. Phys. **35** (2002) 1757-1760
- M. Sieg, B. Nehmzow, M.Kettlitz, and H. Hess
Influence of electrode heating by laser radiation on the cathode-fall voltage of mercury high-pressure discharges
Proc. Gas. Electr. Conf., Minneapolis, Minnesota, USA, 2002, p. 27
- M. Sieg, B. Nehmzow, M.Kettlitz, H. Schneidenbach, and H. Hess
Laser exposure of high-pressure arc electrodes
Proc. 26th ICPIG, Greifswald, Germany, 2003, p. 103
- M. Sieg, B. Nehmzow, M.Kettlitz, H. Hess, L. Dabringhausen, S. Lichtenberg, M. Redwitz, O. Langenscheidt and J. Mentel
On the electrode sheath voltage in high-pressure argon, xenon and mercury discharges
Proc. 26th ICPIG, Greifswald, Germany, 2003, p. 105
- M. Sieg, H. Schneidenbach, M. Kettlitz, and H. Hess
Laser exposure of high-pressure arc electrodes
J. Appl. Phys., geplant