

# Grundlagenuntersuchungen und erste Ergebnisse bei der Verbesserung technischer Eigenschaften von Hochspannungsleuchtröhren (HSLR)

Prof. Dr.-Ing. habil. D. Gall, Dipl.-Ing. Carsten Blankenhagen  
TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Unterer Berggraben 10, 98684 Ilmenau

Prof. Dr. rer. nat. habil. J. A. Schäfer, Dr. rer. nat G. Hartung  
TU Ilmenau, Fachgebiet Technische Physik, Weimarer Str. 32, 98693 Ilmenau

Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Sommer  
NEON-Böhm GmbH & Co. KG, Friedrich-Ebert-Str. 20, 98693 Ilmenau

## 1. Stand der Technik und erste sondierende Untersuchungen

Die bereits aus den 30er Jahren bekannte Technologie der Anwendung von Hochspannungsleuchtröhren für Lichtwerbeanlagen hat durch untergegangenes Grundlagenwissen aus dieser Zeit sowie vielfältige aber oft unverstandene Änderungen des physikalisch-chemischen Regimes im Entladungsrohr in den letzten Jahren deutlich an Attraktivität verloren. Demgegenüber steht die rasante Entwicklung der LED-Halbleitertechnologie in den letzten Jahren sowie das Hineindrängen dieser Technik auch in bisher der HSLR vorbehaltenen Anwendungsbereiche. Die Schwierigkeiten bei der Fertigung von HSLR stellen sich in einer die Wirtschaftlichkeit der Produktion stark beeinträchtigenden Reklamationsquote dar. Konkret bestehen die Probleme in einer starken Verschlechterung der elektrischen und lichttechnischen Parameter der HSLR sowie in einer zu geringen Lebensdauer dieser Röhren insgesamt.

Jüngstes Beispiel solcher vorzeitigen Röhrenausfälle sind z.B. in einer internen Studie untersuchte HSLR zur Kantenbeleuchtung von ARAL-Tankstellen. Diese Röhren stammten von verschiedenen Herstellern und zeigten charakteristische Zerstörungen durch vorzeitigen Zerfall der becherförmigen Kaltkathoden in ein Zylinderstück und ein an den elektrischen Zuleitungen verbleibendes halbkugelförmiges Bodenstück (Bild 1).



Bild 1 Typische Zerstörungsbilder ausgefallener Hochspannungsleuchtröhren

Diese Ausfallerscheinungen wurden an verschiedenen, speziell präparierten Becherelektroden u.a. mittels optischer Spektralanalyse untersucht und Rückschlüsse auf im Plasma freigesetzte Elemente gezogen. Dabei variierten die Röhrenparameter und die geometrischen Abmessungen der Elektroden, welche mit 1mm breiten Schlitzen bzw. Löchern versehen waren. Diese beeinflussen die Feldverteilung und den Potentialverlauf innerhalb der Elektrode und damit die Entladungsvorgänge nur unwesentlich.

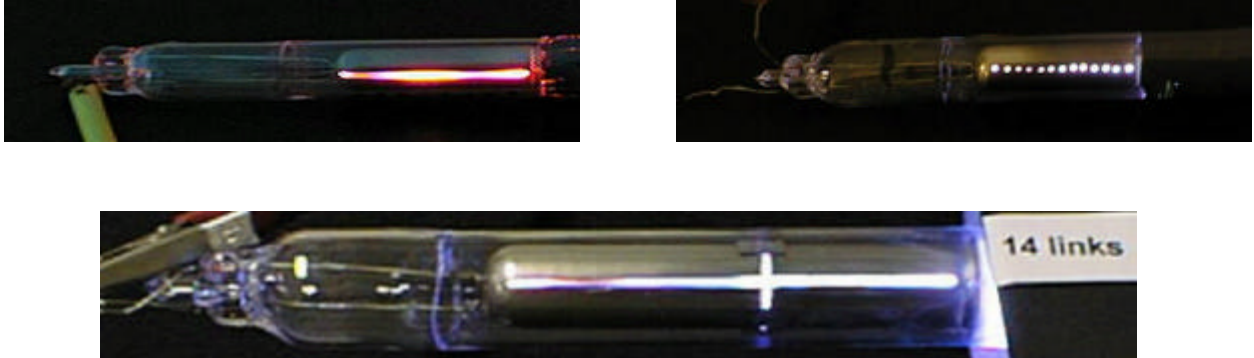


Bild 2 Modifizierte Becherelektroden zur Plasma-Spektraluntersuchung in ihrem Inneren

In den Fotos erkennbare Inhomogenitäten der Leuchtdichteerscheinungen deuten auf die Lage des Katodenfalls (Dunkelraum) hin. Dort werden die Ionen stark beschleunigt und bombardieren die Elektrodeninnenfläche in Richtung des halbkugelförmigen Bodenstücks. Als wesentliches Ergebnis dieser Voruntersuchung konnten falsch dimensionierte Elektroden selektiert werden und es wurde nachgewiesen, daß die Feldverteilung innerhalb des Elektrodenbechers von dessen Länge unabhängig ist (gleiche Lage des Dunkelraums). Vielmehr bestimmt die Elektrodenlänge in Kombination mit dem Becherdurchmesser die zum Ionenbombardement real genutzte Innenoberfläche.

Weitere Schwierigkeiten ergeben sich durch die veränderte Zusammensetzung der Leuchtstoffe im Sinne ungiftiger bzw. umweltverträglicherer Substanzen, welche die Langzeitstabilität dieser negativ beeinflussen und zu schnellerer, bei Tag deutlich sichtbarer Vergrauung und damit verbundenem Lichtstromabfall der Röhren führen. Sowohl die Qualität der Leuchtstoffe als auch die der Rohrbeschlämmung und die äußere Temperaturverteilung am Entladungsrohr sind für eine gleichmäßige Ausleuchtung verantwortlich, welche in der Praxis heute leider selten anzutreffen ist.

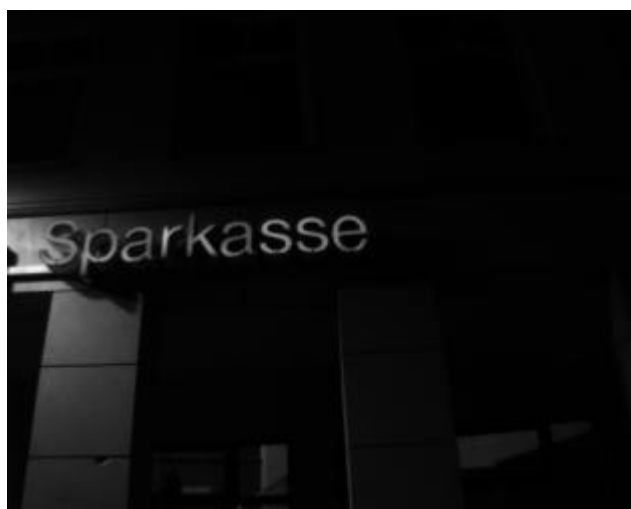


Bild 3 Leuchtdichtebild einer Lichtwerbeanlage bei 21°C Außentemperatur

Im Gegensatz zur Leuchtenindustrie, wo bereits seit längerer Zeit HF-Vorschaltgeräte zum effizienteren Lampenbetrieb eingesetzt werden, steht der Umstieg vom konventionellen Streufeldtrafo zur Hochfrequenz bei den HSLR noch bevor und ist auch von einigen Schwierigkeiten begleitet, welche später näher erläutert werden. Nachfolgende Abbildung zeigt in zwei Oszillogrammen qualitative Kurvenverläufe von Röhrenspannung und -strom sowie eine FFT der Röhrenspannung bei NF-Betrieb (50 Hz) mit einem konventionellem Streufeldtrafo.

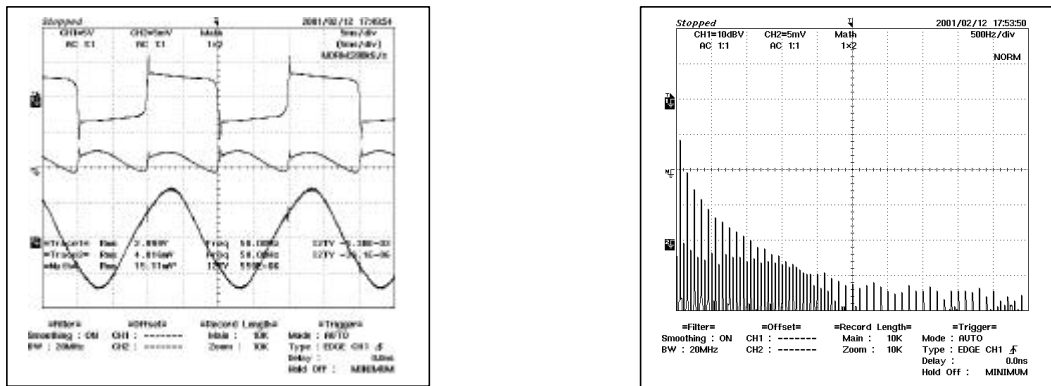


Bild 4 Röhrenspannung, Lampenleistung, Röhrenstrom und FFT der Röhrenspannung bei konventionellem 50Hz - Betrieb mittels Streufeldtrafo

## 2. Aufgaben für weitere Untersuchungen und Forschungen

Wie im ersten Abschnitt ausgeführt wurde, ist die Beherrschung der Technologie zur Herstellung qualitativ hochwertiger HSLR ein sehr komplexes und weitreichendes Gebiet, welches zu seiner zufriedenstellenden Bearbeitung umfangreiche und ineinandergreifende Aufgabenstellungen fordert. Diese lassen sich in physikalische, elektrisch/elektronische und lichttechnische Meßaufgaben einteilen, welche derzeit in einem Forschungsprojekt zur Verbesserung der technischen Eigenschaften der HSLR bearbeitet werden. Die zu erfassenden Einflußgrößen zur umfassenden Beschreibung der HSLR-Parameter werden im folgenden dem Rahmen der Forschung entsprechend angegeben:

physikalische Messungen:

- massenspektroskopische Untersuchungen und Restgasanalyse beim Evakuierungs- und Gasfüllprozess der HSLR direkt am Pumpstand
- Glasoberflächenanalysen (UV- und Plasmaangriff) (Röntgendiffraktometrie und Röntgen-Photoelektronenspektroskopie)
- Rohr- und Elektrodentemperatur im Betriebsfall
- Verhalten der Röhren bei geringen Umgebungstemp.

elektr./elektron. Messungen:

- Strom, Spannung, Leistung (Lampen- und Netzseite)
- Zündspannung, Frequenz, Oberwellenanalyse

lichttechnische Messungen:

- Lichtstrom, Leuchtdichte (auch L-Verteilung)
- Normfarbwertanteile (x,y), ähnl. Farbtemperatur (CCT)
- Spektralverteilung der Leuchtstoffe
- evtl. Farbwiedergabeindex (CRI)

- Langzeitverhalten vorgenannter Werte bei konstanter Umgebungstemperatur
- Spektralanalyse des Plasmas im Elektrodeninnern speziell bei HF-Betrieb gegenüber NF-Betrieb

danach zu variierende  
Fertigungsparameter:

- Auswahl des Leuchtstoff-Schichtmaterials
- Auswahl des Beschichtungsverfahrens
- Optimierg. von Evakuierung und Gasfüllung der HSLR
- evtl. Einsatz anderer Elektrodenkonfigurationen

Auch wenn die Vielzahl der zu bewältigenden Aufgaben in diesem Bericht nicht umfassend dargestellt werden kann, so sind sie doch notwendig, um dem Produkt HSLR in den nächsten Jahren reale Chancen und Beständigkeit auf dem Markt einzuräumen. Eine unwissenschaftliche und punktuelle Herangehensweise an die Lösung der Probleme birgt die Gefahr, kurzfristige Scheinerfolge zu erzielen und wertvolle Zeit für den Anschluß an eine moderne, wissenschaftlich fundierte Technologie zu verlieren. Im nächsten Abschnitt erfolgt eine kleine Auswahl einiger wichtiger Messungen bzw. Meßverfahren.

### 3. Einige Meßgeräte und Versuchsaufbauten

Eine sehr wesentliche Größe zur Beschreibung der Kennwerte einer HSLR ist der Lichtstrom, welcher von ihr erzeugt wird. Er ist abhängig vom fließenden Röhrenstrom und wird durch den Leuchtstofftyp, die Beschichtungsstärke (Belagsgewicht) und natürlich die Länge des beschichteten Glasrohrs bestimmt. Seine Messung erfolgt üblicherweise in raumgreifenden Goniophotometern oder kugelförmigen Integratoren. Für die HSLR-Untersuchungen wurde ein würfelförmiger Integrator (Volumen  $1\text{m}^3$ ) für HSLR mit definierter Geometrie & Abmessung gebaut und mit einem weißen, aselektiv reflektierenden Latexinnenanstrich versehen. Dieser Anstrich wurde auf Proben des Kistenmaterials aufgebracht und mittels harter UVC-Strahlung künstlich gealtert. Nachfolgende Spektralmessungen zeigten die gute Beständigkeit dieser Beschichtung. Weiterhin befindet sich eine Glühlampe im Innern des Integrators, welche bei definiertem Lampenstrom auch über Jahre hinweg genaue Aussagen zur Vergrauung der Integratorbeschichtung gestattet. Aufgrund der mechanischen Aufhängung der HSLR ist deren Lage im Inneren des Integrators nicht millimetergenau definiert, aber es wurde sichergestellt, daß kein direktes Licht auf den Meßkopf fallen kann. Weiterhin wurde der Einfluß des Elektrodenflimmerns in Abhängigkeit von der Position des Meßkopfes (längs oder quer zur HSLR-Achse) auf das Meßergebnis untersucht. Es ergab sich keine negative Beeinträchtigung der Meßergebnisse, weshalb der Sensor in der Längsachse der HSLR (Meßöffnung 2) positioniert wurde, da dort der notwendige Shutter und sein Fehlereinfluß (gegenüber der Querachsenposition → Meßöffnung 1) am kleinsten ist. Die ermittelten Meßwerte in diesem Integrator sind durch die Einflüsse der mechanischen Positionierung bei mehrmaligem Hineinhängen, Herausnehmen, Drehen und Schalten der HSLR mit einem Fehler von max. 6,8% reproduzierbar. Hinzu kommt ein Fehler durch die Vergrauung der Innenbeschichtung, welcher nach 1 Jahr in weitgehend staubfreier Umgebung mit 0,5% ermittelt wurde. Der Gesamtfehler dieser Meßeinrichtung ohne Kalibrierung beträgt somit ca. 7,5%.

Mit diesem Integrator ist nach einer möglichst genauen Kalibrierung auf verschiedene Leuchtstoffe (Bestimmung-Umrechnungsfaktor) mittels Goniophotometer eine sehr schnelle Lichtstrommessung für HSLR mit definierten Abmaßen möglich. Durch die

Proportionalität zwischen Lichtstrom und beschichteter Rohrlänge ist dann eine Umrechnung der Lichtströme auf andere Rohrlängen (Voraussetzung: gleiche Herstellungstechnologie!) problemlos möglich.



Bild 5 Integratorkiste mit Sensor, Überwachungslampe und Versuchsröhre bei Vermessung mittels Spektralmeßgerät und Leuchtdichtekamera

Eine weitere, die Lebensdauer einer HSLR entscheidend mitbestimmender Einflußfaktor ist die elektrische Ansteuerung der Röhren. Grundlegende Voraussetzung für eine schonende Betriebsweise ist die Einhaltung der maximalen Grenzströme bezüglich der Elektrodenbelastung. Im Sinne eines effizienten Röhrenbetriebes sind HF-Vorschaltgeräte sehr empfehlenswert, welche gegenüber dem 50 Hz - Betrieb durch die Trägheit der Leuchtstoffe bis zu 10% Lichtstromsteigerung und flimmerfreien Betrieb nebst Dimmung, reduzierten Vorschaltgeräteverlusten etc. ermöglichen. Diese EVG's haben aber teilweise noch erhebliche Probleme mit einer sinusförmigen Ansteuerung der Röhren. Neben der Oberwellenproblematik wird vermutet, daß starke Abweichungen von der Sinusform (Spitzen etc.) die Ionen im Plasma unterschiedlich stark beschleunigen, zu hohe Energien bei der Wechselwirkung mit der Emitterschicht der Elektroden entstehen und diese daher wesentlich schneller zerstört wird. Aus diesem Grund wurde eine Reihe Vorschaltgeräte bezüglich Strom, Spannung und Oberwellengehalt sowohl auf der Lampen- als auch auf der Netzseite untersucht und parallel dazu eine spektrale Vermessung des Plasmas im Elektrodeninnern (Becher mit 1mm breiten Schlitzen) vorgenommen.

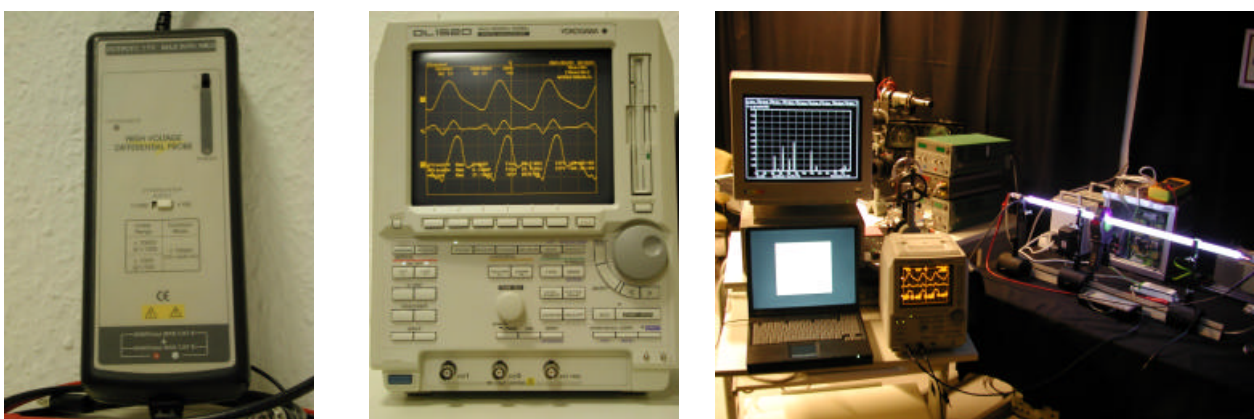


Bild 6 HF-Differentialteiler ( $\pm 7\text{KV}$ , galvan. Trennung), Digitalspeicher-OSZ, Laboraufbau zur Spektralmessung mit Kurvenformanalyse und FFT

Bei der Anwendung von Meßgeräten zur Erfassung elektrischer Parameter von HSLR ist strikt darauf zu achten, daß diese Geräte Echteffektivwerte anzeigen („True RMS“). Die

Verwendung anderer Geräte birgt nachweislich Meßfehler bis zu 65% in sich. Auch der sinusförmige Röhrenstrom eines Streufeldtrafos enthält geringe Verzerrungen, deren Ursachen in der Plasmaphysik liegen.

Weiterhin bekannt ist die Problematik der Kabelkapazitäten, welche bedingt durch den konstruktiven Aufbau einer Lichtwerbeanlage bis zu einigen Nanofarad betragen können. Durch die unvermeidbaren Schaltimpulse im Zusammenwirken mit räumlich verteilten Induktivitäten und Kapazitäten ist die Grenzstromüberschreitung (bemerkenswerte Stromspitzen) verbunden mit einer beachtlichen Sputterwirkung an den Elektroden nicht zu vernachlässigen. Diese Effekte sind in der Praxis nicht generell zu beseitigen, man kann ihnen derzeit nur mit einer höheren Sicherheitsauslegung der Elektroden sowie einer optimalen Leitungslängenverkürzung begegnen. Verschärft wird dieses Problem noch beim Einsatz von HF-EVG's, deren Ausgangsschwingkreis für sinusförmige Röhrenströme definierte Leitungslängen benötigt. Eine Längenmodifikation der Anschlußleitungen eines angepaßten HF-EVG's hat zwangsläufig eine Verstimmung des Ausgangsschwingkreises mit einer Verzerrung des Röhrenstromes zur Folge. Daraus kann eine drastisch reduzierte Lebensdauer der Elektroden resultieren. Obwohl nicht primärer Forschungsgegenstand, hoffen die Autoren zum Projektabschluß dazu eine befriedigende Lösung vorstellen zu können.

#### 4. Erste Ergebnisse und Hinweise zum effizienten Betrieb von HSLR

Wie bereits im letzten Abschnitt angeführt wurde, ist zum energieeffizienten Betrieb von HSLR in jedem Falle der HF-Betrieb gegenüber dem konventionellem Betrieb mit 50 Hz vorzuziehen. Die wesentlichen Vorteile liegen bei einem gemessenen Lichtstromgewinn von ca. 7...8,5% und das bereits bei einer Frequenz von 16 KHz. Eine weitere Steigerung bis zu 1,5% ist durch die Erhöhung der Frequenz auf ca. 40 KHz erzielbar.

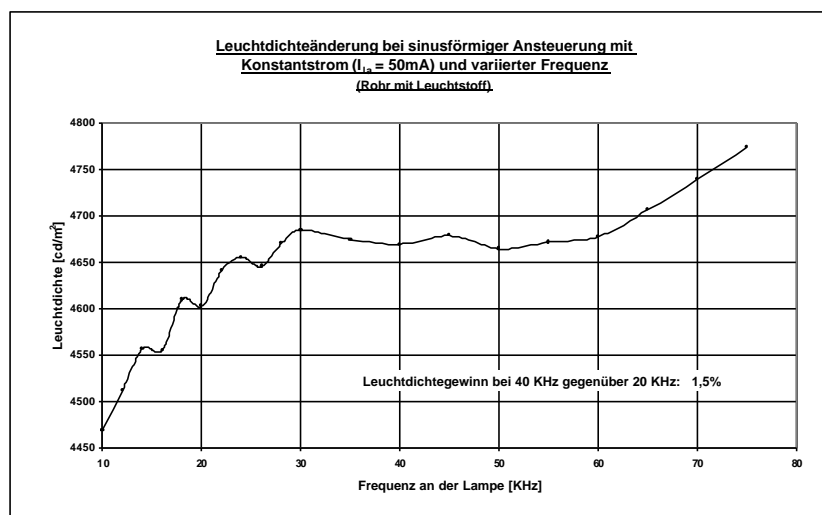


Bild 7 Leuchtdichteänderung einer HSLR bei variiertes Frequenz

Diese Frequenz ist als optimale Betriebsweise anzusehen, da im Lichtstromgewinn bereits eine sichere Sättigung zu verzeichnen ist und die EMV-Problematik in diesem Frequenzbereich noch keine großen Komplikationen verursacht. Außerdem sollte mit Rücksicht auf unsere Umwelt (z.B. Tiere) die Frequenz nicht geringer gewählt werden. Zwar liegt sie jenseits der Hörschwelle des Menschen, aber Hunde, Fledermäuse etc.

besitzen einen erweiterten Hörbereich und werden durch Frequenzen um die 30 KHz beeinträchtigt. Ein weiterer Vorteil des HF-Betriebes liegt neben den geringeren Vorschaltgeräteverlusten, der Dimm- und Steuerbarkeit in einer verbesserten Zündfreudigkeit der Röhren. Diese äußert sich bei Frequenzsteigerung in einer Zündspannungsabsenkung, welche bei den Messungen bei  $\Delta f = 20\text{KHz}$  mit ca. 2% ermittelt wurde. Die anfänglichen Schwingungsvorgänge sind auf Resonanzen des Versuchsaufbaus zurückzuführen und wurden nicht in die Approximation einbezogen.

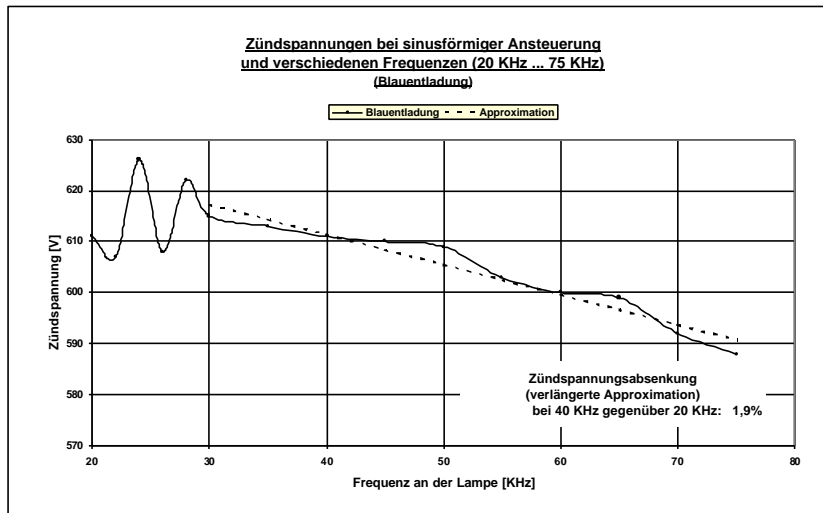


Bild 8 Zündspannungsabsenkung einer HSLR bei variiert Frequenz

Generell ist beim Betrieb von HSLR mit HF-EVG's aber sehr darauf zu achten, daß im Interesse einer langen Elektrodenlebensdauer Geräte eingesetzt werden, welche eine möglichst sinusförmige Ansteuerung der Röhren erlauben. Die noch unbekanntenen Auswirkungen der im letzten Abschnitt angesprochenen Spannungs- und Stromspitzen ungeeigneter Geräte werden derzeit untersucht. Die folgenden Bilder zeigen sowohl ein untaugliches als auch ein sehr geeignetes EVG, dessen Betriebsparameter beispielhaft sind.

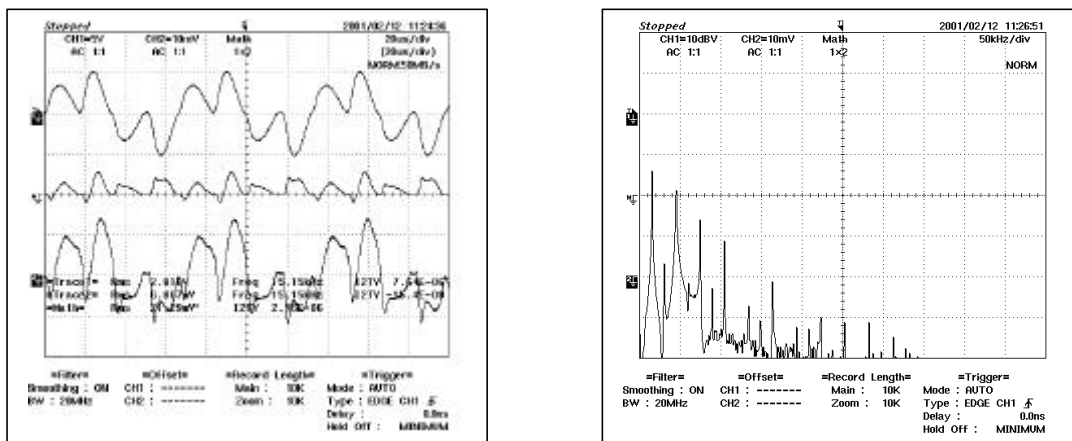


Bild 9 Röhrenspannung, Lampenleistung, Röhrenstrom und FFT der Röhrenspannung eines marktüblichen, aber sehr ungeeigneten HF-EVG's





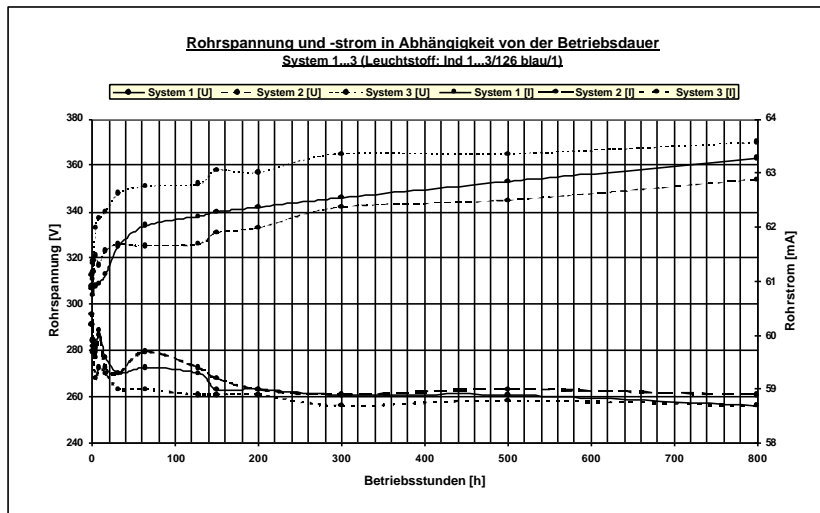


Bild 12 Brennspannungsanstieg bei konstantem Strom über der Röhrenbetriebsdauer

In der Praxis eingesetzte HSLR sind im Außenbereich nebst Vorschaltgerät oft in geschlossene Gehäuse eingebaut und unterliegen somit dem Temperaturprofil im Inneren dieser Gehäuse. Wie an dieser Stelle nicht weiter dokumentierte Messungen belegen, wirkt sich dieses Temperaturgefälle deutlich auf die Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte aus. Entgegen der in der Literatur weit verbreiteten Meinung, daß die kälteste Stelle der Lampe den gesamten Dampfdruck der Entladung bestimmt, wurde durch einfache Experimente (lokale Abkühlung) nachgewiesen, daß der Partialdruck an verschiedenen Stellen im Innern der Lampe eben nicht gleich ist, woraus sich die Leuchtdichteungleichmäßigkeiten erklären. Generell ist es sinnvoll, die Becherelektroden von HSLR in geschlossenen Gehäusen möglichst unten anzuordnen, da sich der thermische Auftrieb günstig auf das angesprochene Temperaturprofil auswirkt. Weiterhin können die Gehäuse an geeigneten Stellen mit Löchern versehen werden, wodurch die gesamte innere Thermik begünstigt und sichtbare Leuchtdichtedifferenzen reduziert werden.

Sicherlich stellt sich im Vergleich zum Betrieb herkömmlicher Leuchtstofflampen die Frage, warum nicht auch HSLR statt der Becherelektroden aus den 30-er Jahren mit Wendeelektroden ausgerüstet werden. Die Wendeelektroden haben in der Tat einige wesentliche Vorteile wie z.B. deutlich geringere Katodenfälle von ca. 40V gegenüber den Bechern mit ca. 150V. Damit würden sich die Hochspannungsprobleme (Installations- und Sicherheitsvorschriften bei Anlagen bis 1000V) bei jeder Röhre mit 2 Elektroden um ca. 220V reduzieren. Weiterhin besitzen die Wendeln bei richtiger Auslegung eine wesentlich höhere Lebensdauer als die Becherelektroden. Der grundlegende Unterschied zwischen den Elektrodentypen besteht darin, daß entsprechend der charakteristischen Strom-Spannungs-Kennlinie der Gasentladung die Becherelektroden mit vergleichsweise geringen Elektrodentemperaturen stets im Bereich der Glimmentladung arbeiten. Wendeelektroden haben wesentlich höhere Betriebstemperaturen, arbeiten im Gebiet der Bogenentladung und bilden einen Brennfleck aus.

Bild 13 zeigt das Zündverhalten einer speziellen Wendeelektroden-HSLR, wobei das große Schwingungspaket den Bereich der Glimmentladung kennzeichnet, der Bereich der Bogenentladung ist im rechten Teil des Oszillogramms sichtbar. Die Unsymmetrien der Spannungsüberhöhungen an den „Eckpunkten“ der Schwingungspakete bezüglich der X-Achse resultieren aus dem Aufbau der speziellen Versuchsröhren, welche auf einer Seite mit einer herkömmlichen Becherelektrode und auf der anderen Seite mit einer Wendel ausgestattet waren. Dadurch wurde eine eventuelle unübersichtliche Überlagerung des Verhaltens zweier Wendeln welches kaum absolut identisch ist, eliminiert.

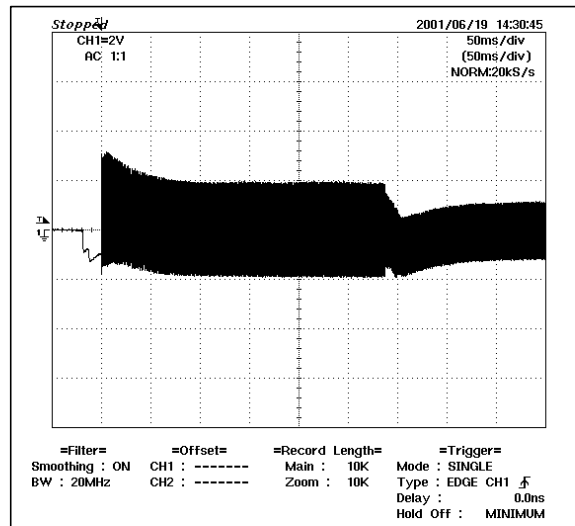


Bild 13 Zündverhalten einer HSLR mit Wendelelektrode

Wichtig ist neben einer geeigneten Auslegung der Wendeln für die entsprechenden Rohrströme die Schaffung eines optimalen Zündregimes um eine lange Lebensdauer der Elektroden zu gewährleisten. Diese umfassenden Untersuchungen mit verschiedenen Wendeltypen sind ebenfalls Gegenstand des laufenden Forschungsprojektes zur Verbesserung der technischen Eigenschaften von HSLR.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die anfangs beschriebenen technologischen Probleme bei der Herstellung qualitativ hochwertiger HSLR heute durchaus beherrschbar sind. Zwar wurden im Laufe vieler Jahre z.B. im Zuge eines stärkeren Umweltbewußtseins wesentliche Veränderungen bezüglich Leuchtstoff, Evakuierungsprozeß und Gasfüllung vorgenommen, deren fehlende, fachlich korrekte und vollständige Dokumentation im heutigen Technologiedefizit münden, jedoch hat sich im Laufe dieser Zeit auch die zur Verfügung stehende Meßtechnik erheblich verbessert. So ist es heute beispielsweise mittels Massenspektroskopie und moderner Rechentechnik möglich, eine genaue Gasanalyse bei der Herstellung der HSLR direkt bei der Fertigung am Pumpstand durchzuführen und schädliche Einflußfaktoren (Wassergehalt der Luft, Verunreinigungen etc.) zu lokalisieren und auszuschließen. Die Entwicklung der HF-EVG's verbunden mit der Möglichkeit der Datenerfassung mit dem Digitalspeicheroszilloskop ist ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zur modernen HSLR. Nicht zuletzt wird auch die Änderung der Elektrodenkonfigurationen ihren Beitrag dazu leisten, energieeffizientere Röhren zu bauen, welche eine erhöhte Lebensdauer besitzen. Durch komplexe Anwendung der zur Verfügung stehenden modernen Meßmittel und Werkzeuge wird es möglich sein, der „alten“ HSLR verbesserte Eigenschaften zu geben und ihr auch angesichts anderer Techniken einen festen Platz bei der energieeffizienten Ausleuchtung großer Werbeflächen zu sichern.