

eta plus electronic gmbh

Lauterstraße 29, 72622 Nürtingen



**„Entwicklung einer energieeffizienten UV-Technologie für
die Entkeimung von Trink- und Ballastwasser“**

Art des Berichtes:

Abschlussbericht zum Vorhaben mit dem Aktenzeichen 30730-21/2,
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt



Verfasser: Dr. Stefan Spießberger, Dr. Simon Große-Kreul

Nürtingen im November 2016

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	30730-21/2	Referat	21	Fördersumme	349.000,00 €
Antragstitel		Entwicklung einer energieeffizienten UV-Technologie für die Entkeimung von Trink- und Ballastwasser			
Stichworte					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
42 Monate	26.11.2012	30.09.2016	2		
Zwischenberichte	Alle 6 Monate Kurzbericht				
Bewilligungsempfänger	eta plus electronic gmbh			Tel +49 7022 6002-847	
	Lauterstraße 29			Fax +49 7022 65854	
	72622 Nürtingen			Projektleitung	
				Dr. Peter Schwarz-Kiene	
				Bearbeiter	
				Dr. Stefan Spießberger	
				Dr. Simon Große-Kreul	
Kooperationspartner					
 Zielsetzung und Anlass des Vorhabens 					
Für die Entkeimung von Wasser werden gegenwärtig vor allem physikalische und chemische Verfahren eingesetzt. Die wichtigsten Entkeimungsverfahren sind die membranbasierte Ultrafiltration, die UV-Entkeimung sowie die chemische Entkeimung. Das vorliegende Projekt zielt auf eine erhebliche Verbesserung der UV-Entkeimung.					
Für die auf UV-Strahlung basierende Entkeimung von Trinkwasser sowie von Ballastwasser werden derzeit UV-Niederdruckstrahler und UV-Mitteldruckstrahler nach aktuellem Stand der Technik eingesetzt. Diese weisen entweder eine, für die UV-Entkeimung wichtige, hohe UVC-Ausbeute von ca. 35 % in Kombination mit einer geringen Leistungsdichte von nur 2 W/cm oder aber eine nur geringe UVC-Ausbeute von ca. 15 % in Kombination mit einer hohen Leistungsdichte von ca. 25 W/cm auf. Ideal für die UV-basierte Wasserentkeimung ist jedoch die derzeit nicht zugängliche Kombination aus einer hohen UVC-Ausbeute und einer hohen Leistungsdichte.					
Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel des von der eta plus electronic gmbh (nachfolgend „eta plus“) durchzuführenden FuE-Projektes in der Entwicklung einer neuen, erstmals koaxial geformten und induktiv betriebenen Niederdruck UV-Lampe sowie eines darauf abgestimmten elektronischen Vorschaltgerätes (EVG). Diese neuartige Lampenkonfiguration soll im Vergleich zu aktuell existierenden Mitteldruck UV-Lampen eine um Faktor 2 größere UVC-Ausbeute von 25-30 % sowie eine im Vergleich zu aktuell existierenden Niederdruck UV-Lampen um Faktor 10 größere optische Leistungsdichte von 20 W/cm bei gleichzeitig auf > 60.000 h gesteigerter Lebensdauer für die Entkeimung von Trink- und Ballastwasser zur Verfügung stellen.					

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

1. Entwicklung einer neuen, erstmals koaxial geformten Niederdruck-UV-Lampe:

Durch die angestrebte neue koaxiale Lampengeometrie wird bei gleichem Bauraum ein im Vergleich zu konventionellen Stab- bzw. U-förmigen Lampen deutlich größeres Plasmavolumen für die Erzeugung der UVC-Strahlung realisiert. Des Weiteren wird die UVC-Effizienz im Vergleich zu Mitteldrucklampen verdoppelt. Weiter wird die Effizienz der UV-Entkeimung dadurch, dass das von dem keimbelasteten Wasser durchströmte UV-transparente Rohr an der Rohraußenfläche vollständig von der koaxialen UV-Lampe umgeben ist, deutlich gesteigert.

2. Induktive Einkopplung der Energie für die Plasma-Generierung:

Mit der im FuE-Projekt geplanten Entwicklung einer induktiven Einkopplung zur Substitution der aktuell etablierten elektrodenbasierten Energieeinkopplung können die Kathodenverluste eliminiert und dadurch die UVC-Effizienz bereits bei geringen Lampenlängen deutlich gesteigert werden. Des Weiteren werden auf diese Weise keine Elektroden benötigt welche die Lebensdauer von herkömmlichen Nieder- und Mitteldrucklampen begrenzen.

3. Neues elektronisches Hochfrequenz-Vorschaltgerät:

Für die angestrebte induktive Plasma-Generierung soll im FuE-Projekt in Zusammenarbeit mit dem Institut-Auftragnehmer LTI ein auf Si-Carbid Leistungs-Halbleiterbausteinen basierendes elektronisches Vorschaltgerät entwickelt werden, mit dem die Betriebsfrequenz um Faktor 25 von aktuell maximal 100 kHz auf zukünftig 2,5 MHz gesteigert werden soll, um eine effiziente induktive Einkopplung zu ermöglichen.

4. Präzise Temperierung des Lampenkörpers zur Sicherung einer konstant hohen UVC-Ausbeute durch Kompensation von Wassertemperaturschwankungen:

Der durch die geplante koaxiale Bauform der UV-Lampe zwischen dem Lampenkörper und dem von keimbelastetem Wasser durchströmten Rohr erzeugte Luftspalt soll zur gezielten Temperierung des Lampenkörpers genutzt werden. Dadurch können künftig durch das keimbelastete Wasser induzierte Temperaturschwankungen eliminiert und im Gegensatz zum aktuellen Stand der Technik eine konstant hohe sowie reproduzierbare UVC-Ausbeute aus der UV-Lampe sichergestellt werden.

5. Reflektor: Um einen möglichst großen Anteil des generierten UV-Lichtes für die Entkeimung nutzen zu können wird ein Reflektor entwickelt, welcher das den Lampenkörper nach außen verlassende UV-Licht in das Lampeninnere reflektiert.

Ergebnisse und Diskussion

Das vorliegende FuE-Projekt wurde am 30.09.2016 erfolgreich abgeschlossen. Das prinzipielle Projektziel, eine UV-Lampe neuer Bauart im Koaxialaufbau mit induktiver Zündung und Leistungseinkopplung sowie einem zugehörigen elektrischen Vorschaltgerät (EVG) zu realisieren, wurde erreicht. Die zu Projektbeginn angestrebten Ergebnisse konnten auch quantitativ weitgehend erreicht werden. Über die Projektlaufzeit konnten die UVC-Leistung und teilweise auch die Effizienz der UV-Lampen bis zur Erreichung der finalen Geometrie immer weiter gesteigert werden. Bei UVC-Leistungen von 14 W/cm wurden 25 % Effizienz und bei 12 W/cm eine Effizienz von 29 % mit den großen Lampenkörpern erreicht. Erhebliche technische Problemstellungen ergaben sich bei der Entwicklung des der neuartigen UV-Lampe zugehörigen EVG's. Die aufgetretenen Problemstellungen konnten vollständig überwunden werden, sodass ein Dauerbetrieb des aufgebauten Demonstrators nun möglich ist. Die ursprünglich vorgesehenen Feldversuche konnten im Projektverlauf aufgrund notwendig gewordener personeller Mehraufwände und zeitliche Verzögerungen nicht mehr durchgeführt werden. Sie sollen nun nach Projektende möglichst zeitnah nachgeholt werden. Auf Basis der erzielten Ergebnisse erscheint die ursprünglich anvisierte, aus Durchschnittswerten errechnete CO₂-Einsparung weiterhin erreichbar.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Mit der Öffentlichkeitsarbeit wurde bereits begonnen. So wurden die notwendigen Voraussetzungen zur Integration des Demonstrators in Wassersysteme bereits mit einem renommierten Forschungszentrum, dem Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe, besprochen. Sobald diese geschaffen wurden und die Feldversuche abgeschlossen sind, sollen die neu erworbenen technologischen Fähigkeiten von eta plus möglichst breitenwirksam über Kanäle wie gezielte Fachpublikationen, die Teilnahme an Messen und Kongressen aus dem Bereich Trinkwasser und Seefahrt, sowie die Direktansprache bereits vorhandener und neu identifizierter Kontakte erfolgen.

Fazit

Die im vorliegenden FuE-Projekt verfolgte Zielstellung der Entwicklung einer UV-Lampe neuartigen Aufbaus mit einer derzeit am Markt nicht verfügbaren Eigenschaftskombination aus UVC-Effizienz und Leistungsdichte konnte prinzipiell voll erreicht werden. Ein voll funktionsfähiger Demonstrator einer UV-Lampe mit Koaxialaufbau sowie der Möglichkeit eines induktiven Betriebs (betrifft Zündung und Leistungseinkopplung) wurde im Projekt realisiert. Die quantitativen Zielstellungen konnten ebenfalls weitgehend erfüllt werden, sodass die umweltrelevanten Zielstellungen durch eine erfolgreiche Vermarktung weiterhin voll erreicht werden können. Der Stand der Technik im Bereich der Wasserentkeimung mittels UV-Systemen wird in Zukunft voraussichtlich in starker Weise von den in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnissen mitbestimmt werden.

Inhaltsverzeichnis

PROJEKTKENNBLOTT.....	2
VERZEICHNIS VON BILDERN, ZEICHNUNGEN, GRAFIKEN UND TABELLEN	6
1. ZUSAMMENFASSUNG	7
2. EINLEITUNG.....	8
3. ENTWICKLUNGSARBEITEN UND ERREICHTE ERGEBNISSE	10
FAZIT	27

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1:	Axialsymmetrische Darstellung von Simulationsergebnissen einer UV Koaxiallampe (Außendurchmesser 15 cm). Falschfarbendarstellung: Rekombinationsrate der 254 nm Emission, Pfeile: magnetisches Feld	10
Abb. 2:	(a) Lampe mit inhomogenem Plasma (nicht optimaler Puffergas-Druck); (b) Lampe mit homogen ausgebildetem Plasma (optimaler Puffergas-Druck)	12
Abb. 3:	Äußere Effizienz in Abhängigkeit des Außendurchmessers der UV-Lampen	12
Abb. 4:	Messplatz	13
Abb. 5:	Detektorkopf-Eigenbau zur Messung der Leistung im Lampeninneren	14
Abb. 6:	Aufgedampfter Reflektor	15
Abb. 7:	Fotografie der Inverter Steuerungs- und Leistungsplatine	17
Abb. 8:	Variation der Lampeneffizienz in Abhängigkeit von der Appendix-Kühlung (Maximale Effizienz bei eingeschalteter Kühlung, minimale Effizienz bei ausgeschalteter Kühlung)	18
Abb. 9:	Entwurf der entwickelten EMV-Abschirmung mit Sleeve (inneres Rohr zur Führung des zu entkeimenden Wassers), Lampe und Wicklungsanordnung.	18
Abb. 10:	Fotografie des abgeschirmten UV-Systems (links), Fotografie der Lampe im Betrieb (rechts)	19
Abb. 11:	Innere Effizienz in Abhängigkeit der elektrischen Leistung für Lampenkörper mit unterschiedlichen Füllungen. Die Symbole stellen die Messpunkte dar, die Linie die durch einen linearen Fit ermittelten Werte.	20
Abb. 12:	Leistungseffizienzdiagramm der bisher bei eta plus durchgeführten Versuche	20
Abb. 13:	Verlustaufteilung im Schwingkreis bei 2,11 MHz und 6 A Resonanzstrom. Die Gesamtverlustleistung beträgt 100 W inkl. Treiberleistung.	21
Abb. 14:	Resonanzkreis und Ersatzschaltbild der Koaxiallampe (HB = H-Brücke)	23
Abb. 15:	Fotografie des aufgebauten EVG	23
Abb. 16:	Messung der MOSFET-Temperatur im Lampenbetrieb bei einer Leistung von etwa 2,5 kW und einer Frequenz von 2 MHz. Der Brückenstrom beträgt bei diesen Betriebsbedingungen typischerweise 7-8 A	24
Abb. 17:	Drain-Source-Spannung (C3, blau), Brückenstrom (C4, grün) und Lampenspannung (C2, violett) während des Zündvorgangs bei 2 kW und 2,1 MHz. Die angegebenen Werte zeigen typische Verhältnisse im kapazitiven Modus der Entladung	24
Abb. 18:	Drain-Source-Spannung (C3, blau), Brückenstrom (C4, grün) und Lampenspannung (C2, violett) im stabilen Lampenbetrieb bei 2,5 kW und 2,1 MHz. Der Brückenstrom beträgt 7,4 A bei einer Lampenspannung von 820 V. Die Leistungserhöhung um 500 W gegenüber dem Zündmoment resultiert aus einem erhöhten Quecksilber-Dampfdruck.	25
Abb. 19:	Schematische Skizze des Demonstrators	26
Abb. 20:	Fotografie des Demonstrators	26

1. Zusammenfassung

In Zuge des vorliegenden FuE-Projektes wurde eine UV-Lampe neuartiger Bauart mit zugehörigem elektronischem Vorschaltgerät erfolgreich realisiert.

Die durchgeführten Arbeiten betrafen Entwicklungen in den folgenden Bereichen:

- Koaxial geformte Niederdruck-UV-Lampe
- Induktive Energie-Einkopplung zur Plasma-Generierung
- Neues, zugehöriges elektronisches Hochfrequenz-Vorschaltgerät
- Temperierung des Lampenkörpers
- Reflektor
- Aufbau eines optischen Messstands
- Demonstratoraufbau

Die Entwicklungsarbeiten wurden weitgehend gemäß der ursprünglichen Planung durchgeführt. Zeitliche Verzögerungen und personelle Mehraufwände ergaben sich insbesondere im Bereich der Entwicklung des neuartigen elektronischen Hochfrequenz-Vorschaltgerätes. Die aufgetretenen Problemstellungen konnten vollständig überwunden werden, sodass ein Dauerbetrieb des aufgebauten Demonstrators nun möglich ist.

Das prinzipielle Projektziel, eine UV-Lampe neuer Bauart im Koaxialaufbau mit induktiver Zündung und Leistungseinkopplung sowie einem zugehörigen elektrischen Vorschaltgerät zu realisieren, wurde voll erreicht.

Die zu Projektbeginn angestrebten Ergebnisse konnten auch quantitativ weitgehend erreicht werden. Über die Projektlaufzeit konnten die UVC-Leistung und teilweise auch die Effizienz der UV-Lampen bis zur Erreichung der finalen Geometrie immer weiter gesteigert werden. Bei UVC-Leistungen von 14 W/cm wurden 25 % Effizienz und bei 12 W/cm eine Effizienz von 29 % mit großen Lampenkörpern in finaler Geometrie erreicht.

Die ursprünglich vorgesehenen Feldversuche konnten im Projektverlauf aufgrund notwendiger personeller Mehraufwände und zeitlicher Verzögerungen nicht mehr durchgeführt werden. Sie sollen nun nach Projektende möglichst zeitnah nachgeholt werden.

Auf Basis der erzielten Ergebnisse erscheint die ursprünglich anvisierte, aus Durchschnittswerten errechnete CO₂-Einsparung weiterhin erreichbar.

2. Einleitung

Für die Entkeimung von Wasser werden gegenwärtig vor allem physikalische und chemische Verfahren eingesetzt. Die wichtigsten Entkeimungsverfahren sind die membranbasierte Ultrafiltration, die UV-Entkeimung sowie die chemische Entkeimung. Das vorliegende Projekt zielt auf eine erhebliche Verbesserung der UV-Entkeimung.

Für die auf UV-Strahlung basierende Entkeimung von Trinkwasser sowie von Ballastwasser werden derzeit UV-Niederdruckstrahler und UV-Mitteldruckstrahler nach aktuellem Stand der Technik eingesetzt. Diese weisen entweder eine, für die UV-Entkeimung wichtige, hohe UVC-Ausbeute von ca. 35 % in Kombination mit einer geringen Leistungsdichte von nur 2 W/cm oder aber eine nur geringe UVC-Ausbeute von ca. 12 % in Kombination mit einer hohen Leistungsdichte von ca. 25 W/cm auf. Ideal für die UV-basierte Wasserentkeimung ist jedoch die derzeit nicht zugängliche Kombination aus einer hohen UVC-Ausbeute und einer hohen Leistungsdichte.

Gemäß einer von eta plus zu Projektbeginn in Auftrag gegebenen Studie verursachten UV-Entkeimungsanlagen in den Bereichen Trink- und Ballastwasserentkeimung nach dem Stand der Technik Energieverbräuche von über 5 TWh/a; Tendenz steigend.

Im Bereich Trinkwasserentkeimung kann bei Substitution von 1 % der zu Projektbeginn existierenden UVC-Mitteldruck-Entkeimungsanlagen durch das neu im FuE-Projekt entwickelte koaxiale UVC-Lampensystem der Energieverbrauch für UV-Entkeimungsanlagen um 16,5 GWh bzw. der CO₂-Ausstoß zur Energieerzeugung um 8.910 t/a reduziert werden (CO₂-Emission von 0,54 kg/kWh gem. UBA). Weiter kann der Energiebedarf für die UV-Entkeimung von Ballastwasser durch den Einsatz des neu im FuE-Projekt entwickelten induktiven, koaxialen UVC-Lampensystems zukünftig halbiert, d. h. um 0,6 TWh/a reduziert werden. Auf Schiffen werden Dieselgeneratoren mit einem CO₂-Ausstoß von etwa 1 kg/kWh für die Erzeugung von elektrischer Energie eingesetzt. Unter der Annahme, dass nur 1 % der Schiffe mit der neu im FuE-Projekt entwickelten koaxialen UVC-Entkeimungsanlage ausgerüstet werden, können zukünftig 6 GWh/a elektrische Energie eingespart und der CO₂-Ausstoß aus Dieselgeneratoren um 6.000 t CO₂/Jahr reduziert werden.

Vor diesem Hintergrund bestand das Ziel des von der eta plus gmbh durchzuführenden FuE-Projektes in der Entwicklung einer neuen, erstmals koaxial geformten und induktiv betriebenen Niederdruck UV-Lampe sowie eines darauf abgestimmten elektronischen Vorschaltgerätes (EVG). Diese neuartige Lampenkonfiguration sollte im Vergleich zu aktuell existierenden Mitteldruck UV-Lampen eine um Faktor 2 größere UVC-Ausbeute von 30 % sowie eine im Vergleich zu aktuell existierenden Niederdruck UV-Lampen um Faktor 10 größere optische Leistungsdichte von 20 W/cm bei gleichzeitig auf > 60.000 h gesteigerter Lebensdauer für die Entkeimung von Trink- und Ballastwasser zur Verfügung stellen.

Zur Realisierung der neuen, erstmals koaxial geformten und induktiv betriebenen Niederdruck UV-Lampe sowie des darauf abgestimmten elektronischen Vorschaltgerätes waren die folgenden Lösungsansätze geplant:

1. **Entwicklung einer neuen, erstmals koaxial geformten Niederdruck-UV-Lampe:**
Durch die angestrebte neue koaxiale Lampengeometrie wird bei gleichem Bauraum

ein im Vergleich zu konventionellen Stab- bzw. U-förmigen Lampen deutlich größeres Plasmavolumen für die Erzeugung der UVC-Strahlung realisiert. Des Weiteren wird die UVC-Effizienz im Vergleich zu Mitteldrucklampen verdoppelt. Weiter wird die Effizienz der UV-Entkeimung dadurch, dass das von dem keimbelasteten Wasser durchströmte UV-transparente Rohr an der Rohraußenfläche vollständig von der coaxialen UV-Lampe umgeben ist, deutlich gesteigert.

2. **Induktive Einkopplung der Energie für die Plasma-Generierung:** Mit der im FuE-Projekt geplanten Entwicklung einer induktiven Einkopplung zur Substitution der aktuell etablierten Elektroden-basierten Energieeinkopplung können die Kathodenverluste eliminiert und dadurch die UVC-Effizienz bereits bei geringen Lampenlängen deutlich gesteigert werden. Des Weiteren werden auf diese Weise keine Elektroden benötigt, welche die Lebensdauer von herkömmlichen Nieder- und Mitteldrucklampen begrenzen.
3. **Neues elektronisches Hochfrequenz-Vorschaltgerät:** Für die angestrebte induktive Plasma-Generierung soll im FuE-Projekt in Zusammenarbeit mit dem Institut-Auftragnehmer LTI ein auf Si-Carbid Leistungs-Halbleiterbausteinen basierendes elektronisches Vorschaltgerät entwickelt werden, mit dem die Betriebsfrequenz um Faktor 25 von aktuell maximal 100 kHz auf zukünftig 2,5 MHz gesteigert werden soll, um eine effiziente induktive Einkopplung zu ermöglichen.
4. **Präzise Temperierung des Lampenkörpers zur Sicherung einer konstant hohen UVC-Ausbeute durch Kompensation von Wassertemperaturschwankungen:** Der durch die geplante coaxiale Bauform der UV-Lampe zwischen dem Lampenkörper und dem von keimbelastetem Wasser durchströmten Rohr erzeugte Luftspalt soll als Voraussetzung für eine gezielte Temperierung des Lampenkörpers genutzt werden. Dadurch können künftig durch das keimbelastete Wasser induzierte Temperaturschwankungen eliminiert und im Gegensatz zum aktuellen Stand der Technik eine konstant hohe sowie reproduzierbare UVC-Ausbeute aus der UV-Lampe sichergestellt werden.
5. **Reflektor:** Um einen möglichst großen Anteil des generierten UV-Lichtes für die Entkeimung nutzen zu können, wird ein Reflektor entwickelt, welcher das den Lampenkörper nach außen verlassende UV-Licht in das Lampeninnere reflektiert.

3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

3.1. Definitionsphase

Zu Projektbeginn wurden die grundsätzlichen Anforderungen an die UV-Koaxiallampe definiert und mit den geplanten Anwendungspartnern sowie dem Auftragnehmer Lichttechnisches Institut (LTI) am KIT abgestimmt. Diese bestehen in:

1. Anforderungen an die neuartige UV-Lampe:
 - a. UVC-Ausbeute: ca. 25-30 %
 - b. Optische Leistungsdichte: ca. 20 W/cm
 - c. Lebensdauer: Faktor 5 größer als Mitteldrucklampe
2. Anforderungen Vorschaltgerät (in mehreren Projekttreffen mit LTI abgestimmt):
 - a. Ausgangsleistung: 2 – 4 kW
 - b. Ausgangsfrequenz: 2 MHz, +/- 20 %, einstellbar
 - c. Maximale Verlustleistung: 250 W

3.2. Lampentechnologie

3.2.1. Simulation Feldverteilung

Auf Grundlage der in Abschnitt 3.1 definierten Anforderungen wurde mithilfe der Simulationssoftware COMSOL Multiphysics die prinzipielle Realisierbarkeit einer induktiv gekoppelten coaxialen Entladungslampe nachgewiesen und mögliche Lampengeometrien in Hinblick auf ihre UVC-Ausbeute analysiert. In Abb. 1 ist ein exemplarisches Simulationsergebnis der modellierten Entladungslampe neuer Bauform abgebildet. Die Falschfarbendarstellung stellt die Rekombinationsrate der 254 nm Emission und die Pfeile das magnetische Feld dar.

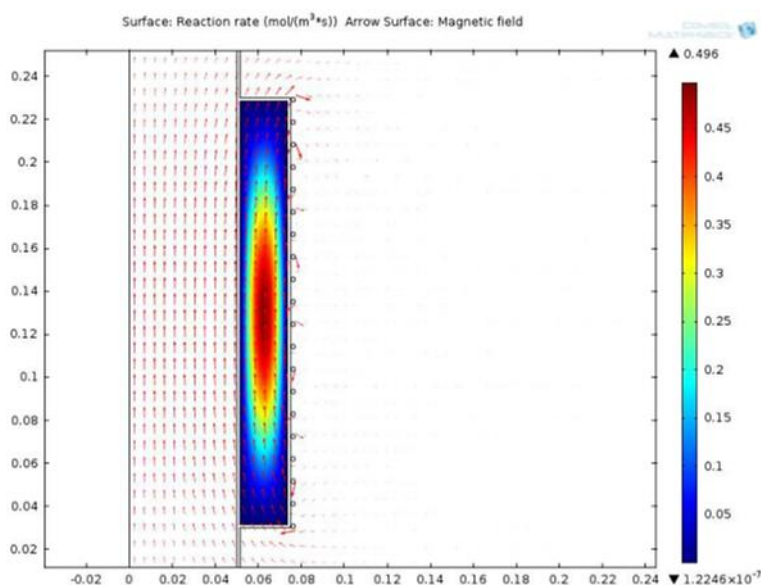


Abb. 1: Axialsymmetrische Darstellung von Simulationsergebnissen einer UV Koaxiallampe (Außendurchmesser 15 cm). Falschfarbendarstellung: Rekombinationsrate der 254 nm Emission, Pfeile: magnetisches Feld

Als wesentliches Ergebnis konnte unter Vernachlässigung betriebsbedingter Verluste (elektrisch: Anpass- und Leitungsverluste, optisch: Streuung und Absorption) eine Gesamteffizienz von über 60 % (generierte Photonen) in der Simulation erreicht werden. Die Simulationsergebnisse zeigten keinen Einfluss der Wicklungsanzahl auf die Effizienz der coaxialen Entladungslampe. Diese Abhängigkeit wird wie in Abschnitt 3.8 näher erläutert durch den Resonanzkreis zwischen Lampe und Vollbrücke definiert. Weiterhin zeigte sich, dass ebenfalls die Impedanzen der Entladungslampen simulierbar sind. Daher konnte anhand dieser Simulationen die Impedanz, eine wichtige Kenngröße zur Dimensionierung des Resonanzkreises, der coaxialen Entladungslampe abgeschätzt werden. Weitere Simulationen mit verschiedenen Lampengeometrien ergaben, dass sich die aus den Simulationen gewonnenen Erkenntnisse von kleineren auf größere Lampengeometrien übertragen lassen.

Somit stellen die Simulationsergebnisse die Basis für die nachfolgend durchgeführten Dimensionierungsarbeiten des Resonanzkreises und der Entladungslampen sowie die Entscheidung, erste Lampenmuster mit 20 Anregungswindungen aufzubauen, dar.

3.2.2. Entwicklung des Quarz-Koaxialrohraufbaus und des Wicklungsaufbaus

Zunächst wurden Lampenkörper aus Quarz mit kleinen Abmessungen entworfen. Drei Lampenkörper mit einem Innendurchmesser von 10 cm und unterschiedlichen Außendurchmessern von 13, 14 und 15 cm wurden bestellt. Jedoch konnte zunächst lediglich der Lampenkörper mit 14 cm Außendurchmesser durch den Lieferanten hergestellt werden. Die anderen Körper wurden bei der Herstellung zerstört. Daraufhin wurden in Abstimmung mit dem Lieferanten geringe Modifikationen des Lampenkörpers beschlossen und umgesetzt, welche zu einer deutlich höheren Ausbeute bei der Herstellung der Lampenkörper führten und in der Folge den beschädigungsfreien Aufbau sowie die Charakterisierung von Entladungslampen mit Außendurchmessern von 13 und 15 cm ermöglichte. Der Erfahrungszuwachs beim Zulieferer ermöglicht mittlerweile die sichere Herstellung von qualitativ hochwertigen Doppelwandgefäßen mit individuell definierbaren Abmessungen.

Der erste gelungene Lampenkörper wurde in der Lampenproduktion von eta plus mit einem Puffergas und Quecksilber befüllt und mit einer Anregungsspule mit 20 Windungen versehen. Erste Tests zeigten, dass sich die Lampe zünden lässt und ein Plasma ausbildet. Der Lampenkörper mit gezündetem Plasma ist in Abb. 2 (a) zu sehen. Das Plasma bildete sich in diesen Vorversuchen allerdings lediglich in der Lampenmitte aus.

Somit zielten die nachfolgenden Arbeiten darauf, durch die Entwicklung modifizierter Aufbauten ein homogenes Plasma zu erhalten. Diese Problematik der inhomogenen Plasmaverteilung in der Entladungslampe konnte erfolgreich durch eine Variation des Puffergasdrucks gelöst werden. Dies ist in Abb. 2 (b) dargestellt. Eine Charakterisierung zeigte, dass die Lampeneffizienz durch diese Maßnahmen von 6 auf ca. 30 % Außenabstrahlung erhöht werden konnte.

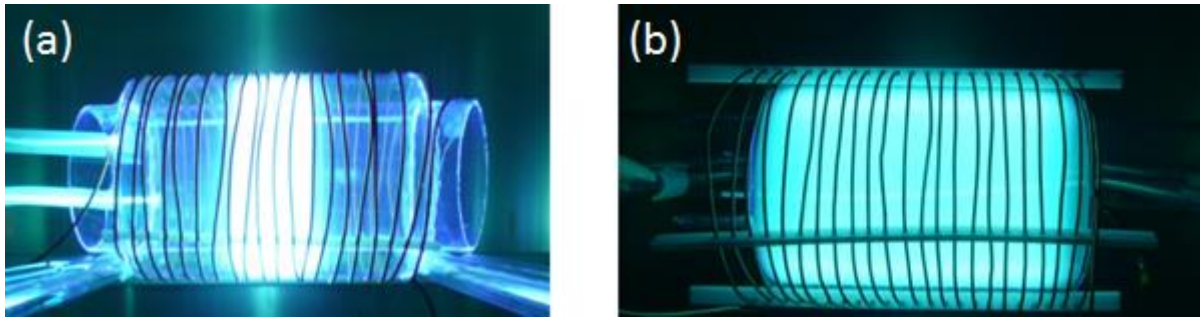


Abb. 2: (a) Lampe mit inhomogenem Plasma (nicht optimaler Puffergas-Druck); (b) Lampe mit homogen ausgebildetem Plasma (optimaler Puffergas-Druck)

Bei der Dimensionierung der Lampengeometrie muss ein Optimum zwischen Reabsorptionseffekten und Wandverlusten gefunden werden. Hierzu wurde der Lampenaußendurchmesser in weiteren Versuchen schrittweise erhöht. Dazu wurden Lampenkörper mit einem Außendurchmesser von 16 und 17 cm beschafft, daraus Gasentladungslampen hergestellt und charakterisiert. Diese zeigten eine maximale äußere Effizienz. Das gefundene geometrische Optimum ist in der folgenden Abb. 3 zu sehen.

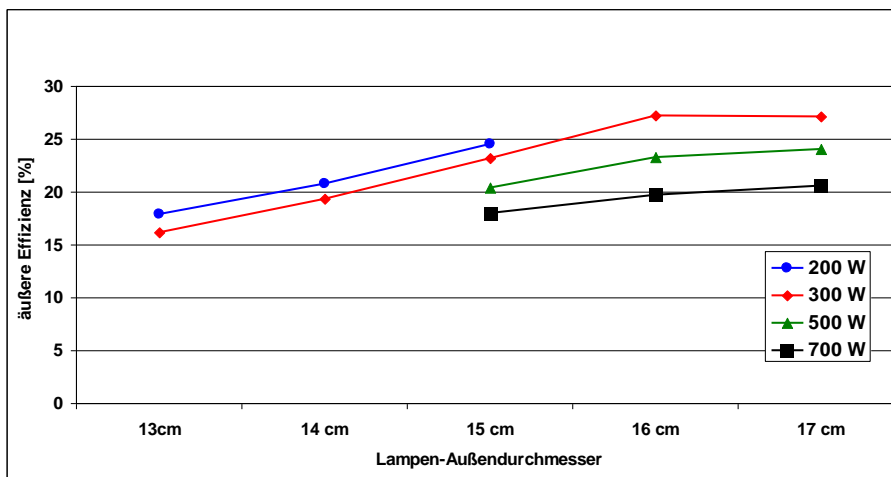


Abb. 3: Äußere Effizienz in Abhängigkeit des Außendurchmessers der UV-Lampen

Die finale Geometrie wurde auf Grundlage dieser Ergebnisse festgelegt und im Hinblick auf eine zukünftige Entkeimungsanlage unter Berücksichtigung von zu erwartenden Durchflussmengen skaliert. Entsprechend wurden nachfolgend Lampenkörper mit einem erhöhten Außendurchmesser von 26 cm und einem Innendurchmesser von 20 cm hergestellt und ausführlich charakterisiert. Die entsprechend skalierten Lampenkörper weisen im Wesentlichen die Eigenschaften auf, die aufgrund der vorangegangenen Messungen an den kleineren UV-Lampenkörpern erwartet wurden.

Abschließend wurde eine Quarzrohr-Passivierung zur Vermeidung der Hg-Diffusion und Vorbereitung auf einen Langzeit-Betrieb (> 10000 h) entwickelt. Diese wurde im Sol-Gel-Verfahren realisiert, das die Herstellung strukturkeramischer Dünnschichten ermöglicht und bereits erfolgreich zur Passivierung von konventionellen Hg-Niederdruckstrahlern eingesetzt wird. Die so erzeugten Schichten wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie analysiert. Die Wirksamkeit der so erzeugten Schichten wird aufgrund von Homogenität und geringer Schichtdicke (100 nm) erwartet, kann aber erst in Langzeittests und darin nachweislich ver-

ringerner Abnahme der UVC-Effizienz abschließend bestätigt werden. Diese Untersuchungen werden nun außerhalb des vorliegenden, mit diesem Bericht abgeschlossenen Forschungs- und Entwicklungsprojektes durchgeführt.

3.3. Optische Messtechnik

3.3.1. Entwicklung der optischen Messtechnik mit zugehörigen Auswerteverfahren

Es wurde ein speziell auf die gegebenen Anforderungen der vorgesehenen Lampenentwicklung zugeschnittener Messplatz konzipiert und aufgebaut (siehe Abb. 4). Die zu charakterisierende Lampe befindet sich mittig in einer Messbox und kann durch eine Variation der Abluftmenge temperiert werden. Des Weiteren können die Ansatzrohre der Lampe (Appendix), welche die kälteste Stelle der Lampe darstellen und dadurch den Quecksilberdruck definieren, durch ein Schlauchsystem mit gezielt erhitzt oder gekühlt werden.



Abb. 4: Messplatz

Um die Lampe unabhängig von der parallel laufenden Entwicklung des elektronischen Vorschaltgerätes entwickeln und optimieren zu können, wurde ein geeigneter HF-Generator beschafft. Dieser hat eine Ausgangsimpedanz von 50 Ohm und kann eine Spannung mit einer Frequenz zwischen 1,8 MHz und 2,17 MHz bei einer Leistung von bis zu 5 kW zur Verfügung stellen. Um effizient Leistung in die Entladungslampe einzukoppeln, muss die Last entsprechend angepasst werden. Anhand der durch COMSOL Multiphysics simulierten Impedanzen wurden diverse Anpass-Netzwerke evaluiert. Laut Simulation ermöglicht eine Serienschaltung aus Kondensator und Lampe eine ausreichend große Leistungseinkopplung. Für erste Versuche wurde daher ein Kondensator mit einer einstellbaren Kapazität (siehe Abb. 4) in

Serie zu der Entladungslampe geschaltet. Auf diese Weise konnte eine Leistung von bis zu 500 W in die Anordnung eingekoppelt werden.

Der optische Messplatz wurde im Laufe des Projektes kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert. So wurde zur Messung der Leistung im Lampeninneren zunächst ein Detektorkopf-Eigenbau basierend auf einer Ulbricht-Kugel entwickelt und realisiert, der die kurzzeitige interne Leistungsmessung im Lampeninneren ermöglicht. Die Leistung im Lampeninneren ist für die Entkeimung des später durchfließenden Wassers von entscheidender Bedeutung. Der Detektorkopf-Eigenbau ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Der entwickelte Detektorkopf beinhaltet keine metallischen Komponenten und wird ca. 1 mm über den Quarzkörper gefahren, um das Emissionsprofil der Lampe messtechnisch bestimmen zu können. Dieser Aufbau erlaubte bereits verlässliche, relative Messungen mit hoher Reproduzierbarkeit.

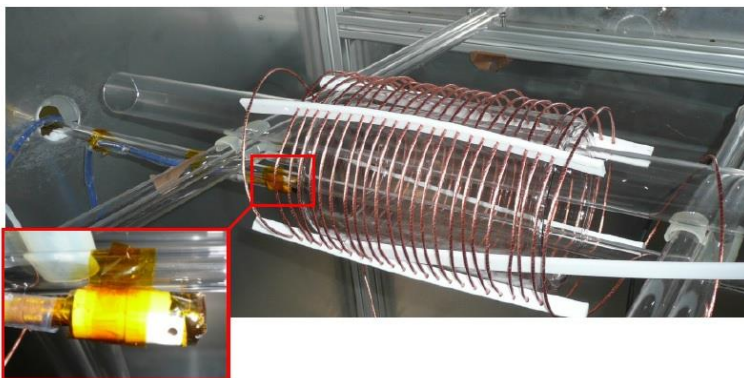


Abb. 5: Detektorkopf-Eigenbau zur Messung der Leistung im Lampeninneren

Der Innensensor wurde im späteren Projektverlauf dahin gehend optimiert, dass durch die Verwendung einer metallfreien optischen Faser das System kalibriert werden kann und damit auch Absolutmessungen in einem Abstand kleiner 0,5 mm an der Lampeninnenseite durchgeführt werden können. Diese zeigten nach Verarbeitung durch die ebenfalls erarbeiteten Algorithmen und Auswerteroutinen gute Übereinstimmung mit den zuvor erlangten Ergebnissen.

3.4. Reflektordesign

3.4.1. Reflektordesign

In diesem Arbeitspaket wurde ermittelt, dass die Verwendung von Reflektorblechen mit hoher Wahrscheinlichkeit am vielversprechendsten ist. Daher wurden diese in Form von vier Viertelschalen entwickelt und realisiert. Im späteren Projektstadium wurde eine Geometrie-anpassung an die großen Lampengeometrien durchgeführt.

3.4.2. Aufbau Reflektor

In diesem Arbeitspaket wurden die Reflektoren gemäß des zuvor entwickelten Viertelschalen-Designs aufgebaut und getestet. Die Reflektorbleche weisen UVC-Reflexionsfaktoren von ca. 90 % auf, und dienen dazu, die optische Leistungseinkopplung ins Lampeninnere zu verbessern. Ebenfalls wurden aufgedampfte Reflektoren identischer Geometrie hergestellt

und untersucht. Ein derartiger aufgedampfter Reflektor ist in der folgenden Abb. 6 dargestellt.

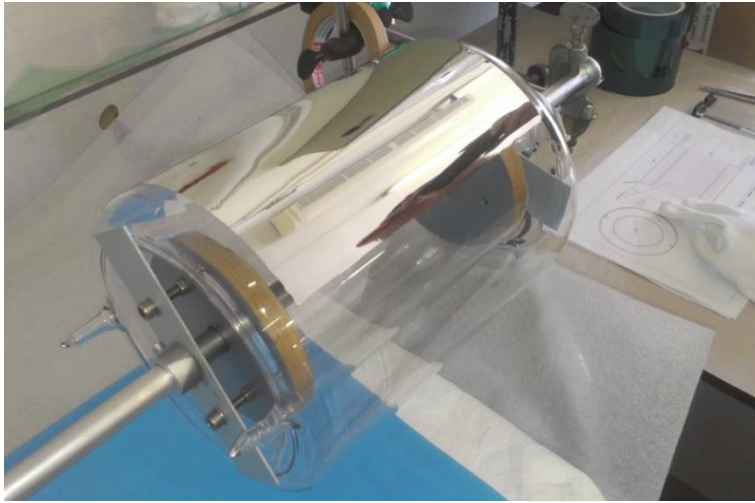


Abb. 6: Aufgedampfter Reflektor

Beide Reflektorkonstruktionen (vier Viertelschalen-Bleche und aufgedampfte Reflektoren) funktionieren mit einer Leistungserhöhung zwischen 20 und 25 % vergleichbar gut und können als Alternativen betrachtet werden. Für die finalen Lampenkörper wurden dann Reflektoren als vier Viertelschalen aus optisch beschichtetem Aluminium aufgebaut und in den Gesamtaufbau integriert. Die durchgeführte Kosten-Nutzen-Betrachtung ergab, dass die vier Viertelschalen-Bleche als Reflektoren gegenüber den aufgedampften Reflektoren zu bevorzugen sind.

3.5. Leistungseinkopplung

Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung des Anpassnetzwerks konnten im späteren Projektverlauf Leistungen von bis zu 700 W langfristig in die Versuchsanordnung mit den Lampen kleiner Geometrie eingekoppelt werden können.

Die Impedanzen der UV-Lampen finaler Geometrie wurden zunächst mit der Simulationssoftware COMSOL simuliert. Auf den Simulationen aufbauend ergaben sich zwei Lösungsansätze, um die gewünschten 50 Ohm Impedanz zu erreichen.

1. Möglichkeit: Geringe Anzahl von 10 Windungen; gute Funktionalität bei großen Leistungen, jedoch mit dem Risiko einer inhomogenen Plasmaverteilung bei geringen Leistungen.
2. Möglichkeit: 4 x 10 Windungen parallel betrieben zur Minimierung des Risikos einer inhomogenen Plasmaverteilung.

In den durchgeführten Versuchen zeigte sich, dass grundsätzlich beide Möglichkeiten funktionieren. Der Lösungsansatz mit nur 10 Windungen ist allerdings einfacher umzusetzen und wird daher bevorzugt. Simulationen haben gezeigt, dass mit der EMV-Haube (siehe Abschn. 3.7.2) 13 Windungen notwendig sein werden.

Als weitere Schwierigkeit stellte sich heraus, dass die Lampe bei bestimmten Betriebsbedingungen beginnt zu flackern, also eine zeitlich instabile Strahlungsleistung emittiert. Dieses kann durch eine hochfrequente Oszillation im kHz-Bereich zwischen induktiver und kapazitiver Kopplung erklärt werden und ist ein für induktiv gekoppelte Plasmen bekanntes Phänomen [Cha01]. Im späteren Projektverlauf wurde dies bei grundsätzlich höherer Leistung (> 2kW) insb. beim Betrieb am selbst entwickelten Vorschaltgerät nicht mehr beobachtet.

3.6. Konzeption elektronisches Vorschaltgerät (EVG)

Die Grundlagen für das elektronische Vorschaltgerät wurden durch den Auftragnehmer LTI in enger Abstimmung mit eta plus entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden zunächst verschiedene Schaltungen anhand der Transistor-, Dioden- und Treiberanzahl sowie der möglichen Amplitude der Ausgangsspannungen verglichen. Eine Untersuchung der Schaltverluste verschiedener Hochleistungstransistoren hat gezeigt, dass die Schaltverluste der untersuchten Bauteile auf einem ähnlichen Niveau liegen, wobei ein SiC-MOSFET des Herstellers Cree gegenüber der ersten Generation eine Reduzierung der Schaltverluste um 35 % bei einem Laststrom von 15 A erreicht. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Ausschaltverluste mittels zusätzlicher Ausgangskapazität reduziert werden können. Die Einschaltverlustleistung lässt sich durch die Verwendung einer Serieninduktivität jedoch nicht auf ein vergleichbares Niveau bringen. Aus diesem Grund ist der Einsatz einer ZCS (zero current switching)-Vollbrücke im Rahmen der vorgegebenen Anforderungen nicht realisierbar. Dennoch wurden die ZVS (zero voltage switching)- und ZCS-Vollbrücke simulatorisch untersucht und verglichen. Laut Simulation lassen sich durch eine ZVS-Vollbrücke mit einem SiC-MOSFET sehr gute Ergebnisse erzielen.

Zur Ansteuerung der Leistungshalbleiter (SiC-MOSFET) wurden neuartige potentialgetrennte Gatetreiberstufen entwickelt und getestet. Diese bestimmen die Schaltverlustleistung und auch das spätere Verhalten bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit des Vorschaltgerätes. Um die Schalterströme zu messen, wurde eine Shunt-Messung implementiert. Als strombegrenzendes Bauteil wurde eine Hochfrequenzdrossel für 10 A Drosselstrom entwickelt, die einen besonders verlustarmen Wicklungsaufbau aufweist. Hieraus wurde ein Schaltungsentwurf für den Inverter abgeleitet, ein Layout erstellt und ein erstes Muster erstellt (siehe Abb. 7).



Abb. 7: Fotografie der Inverter Steuerungs- und Leistungsplatine

Zur Erzeugung der Ansteuersignale im 2MHz Bereich wurde eine frei programmierbare Ansteuerplatine mit FPGA verwendet und die für den Betrieb notwendige Software entwickelt. Diese erlaubt die schnelle Erfassung von Schalterströmen, Lampenstrom und Lampenspannung sowie die Erzeugung der Ansteuersignale mit einer ausreichenden Frequenzauflösung bei 2 MHz.

3.7. Regelung und Packaging der koaxialen UV-Lampe

3.7.1. Entwicklung Regelung

Die Effizienz einer Hg-Niederdrucklampe hängt im Wesentlichen vom Quecksilberdampfdruck und damit von der Temperatur an der kältesten Stelle der Lampe (sog. „Cold-Spot-Temperatur“) ab [Hee04]. Die Verwendung eines Amalgams (Quecksilber-haltige Legierung) ermöglicht es eine Lampe bei optimalem Hg-Dampfdruck in einem rel. weiten Temperaturbereich effizient betreiben zu können. Eine reine Hg-Niederdrucklampe hingegen erfordert eine sehr präzise Temperierung des kältesten Punktes der Lampe auf $(40 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Identifikation eines geeigneten Amalgams mit möglichst flacher Quecksilberdampfdruckkurve könnte die Realisierung der notwendigen Temperierung für die neuartige UV-Lampe deutlich vereinfachen. Daher stand zu Beginn der Arbeiten die Suche eines geeigneten Amalgams im Vordergrund dieses Arbeitsschrittes. Jedoch konnte trotz aufwendiger Tests kein Amalgam mit den gewünschten Eigenschaften identifiziert werden. Vermutliche Ursache für die vorliegende Problematik ist eine zu starke Erhitzung metallischer Amalgam-Plättchen im RF-Feld.

In der Folge wurde der Ansatz verworfen und stattdessen eine reine Hg-Lampenkonfiguration mit Liebig-Kühler an Appendix zur kontrollierten Cold-Spot-Temperatur-Regelung entwickelt und aufgebaut. Diese Appendix-Kühlung mit Druckluft ermöglicht eine Steigerung der UVC-Gesamteffizienz der Lampe von 25 % auf 35 % (in Abb. 8 dargestellt).

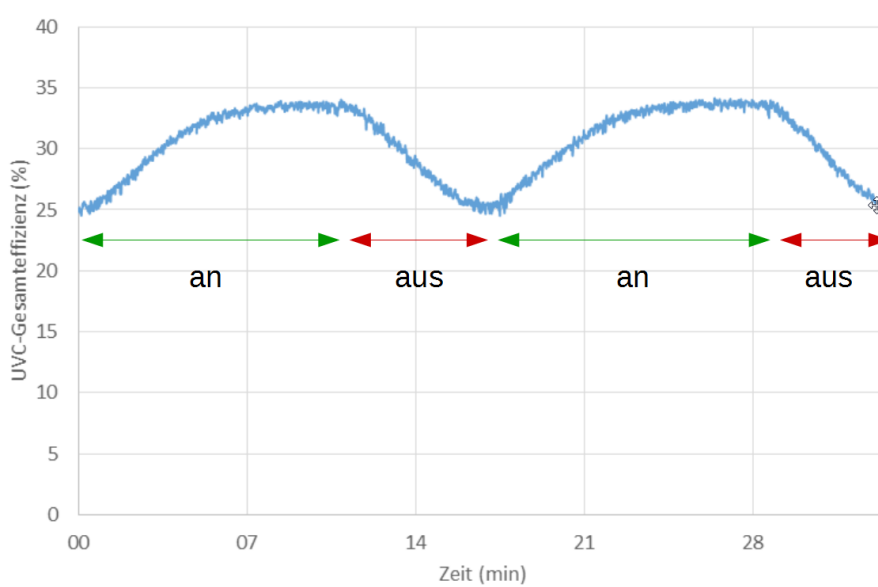


Abb. 8: Variation der Lampeneffizienz in Abhängigkeit von der Appendix-Kühlung (Maximale Effizienz bei eingeschalteter Kühlung, minimale Effizienz bei ausgeschalteter Kühlung)

Zusätzlich variiert die eingekoppelte Leistung in Abhängigkeit von der Kühlung um 10 - 20 %, d. h. bei eingeschalteter Kühlung wird aufgrund von optimiertem Hg-Dampfdruck bei gleicher Frequenz mehr Leistung in das System eingekoppelt.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein prototypisches Konzept für eine elektronische Peltier-Kühlung abgeleitet und realisiert, das eine hochwertige Regelung über eine Maximierung der Effizienz durch einen Abgleich mit dem UVC-Sensor-Signal ermöglicht. Eine Leistungsvariation der Lampe kann darüber hinaus über eine Frequenzvariation und eine daraus resultierende Verschiebung der Resonanz des Gesamtsystems erfolgen. Dieses Verfahren wurde in ersten Versuchen erfolgreich getestet.

3.7.2. Packaging, Shielding, EMV

Zunächst wurden Simulationen zu einer EMV-Abschirmungslösung durchgeführt und abgeschlossen. Die Abschirmung sollte geometrisch möglichst klein gehalten werden, um eine gute Handhabbarkeit zu gewährleisten. Andererseits muss die Abschirmung eine Mindestgröße aufweisen, um eine Beeinflussung der Lampe durch elektromagnetische Kopplung zu verhindern. Ein Entwurf der entwickelten Abschirmung mit Lampe ist in Abb. 9 dargestellt. Die Abschirmung besitzt einen Durchmesser von 46 cm und eine Höhe von 60 cm (bei einer Lampe mit 26 cm Durchmesser und einer Höhe von 40 cm).

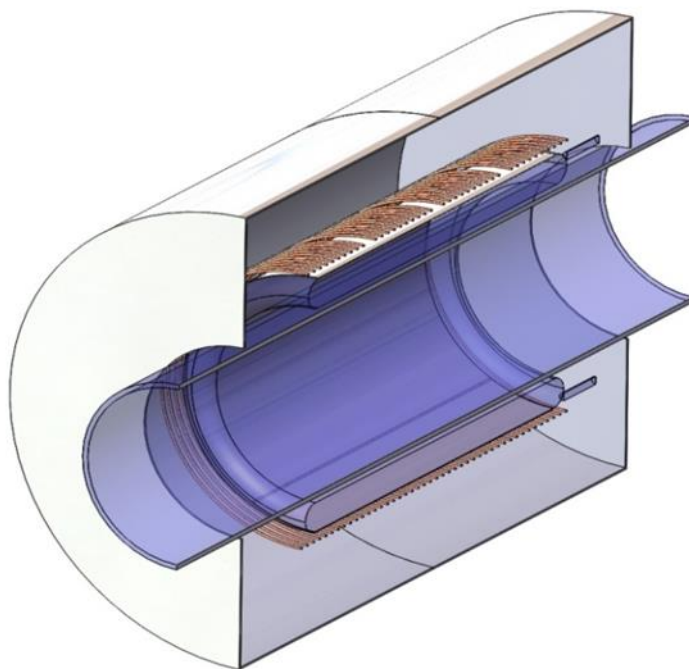


Abb. 9: Entwurf der entwickelten EMV-Abschirmung mit Sleeve (inneres Rohr zur Führung des zu entkeimenden Wassers), Lampe und Wicklungsanordnung.

Anschließend wurde die entwickelte Abschirmung aufgebaut und erfolgreich getestet. Ohne Wasserdurchfluss konnte die Lampe zunächst für einige Minuten betrieben werden und musste dann abgeschaltet werden, um eine Überhitzung zu verhindern. Im weiteren Projekt-

verlauf konnte die Lampe erfolgreich für einen längeren Zeitraum mit Wasser betrieben werden, wie in Abschnitt 3.9. näher dargestellt. In Abb. 10 zeigt das gesamte Package (links) sowie die Lampe im Betrieb (rechts).

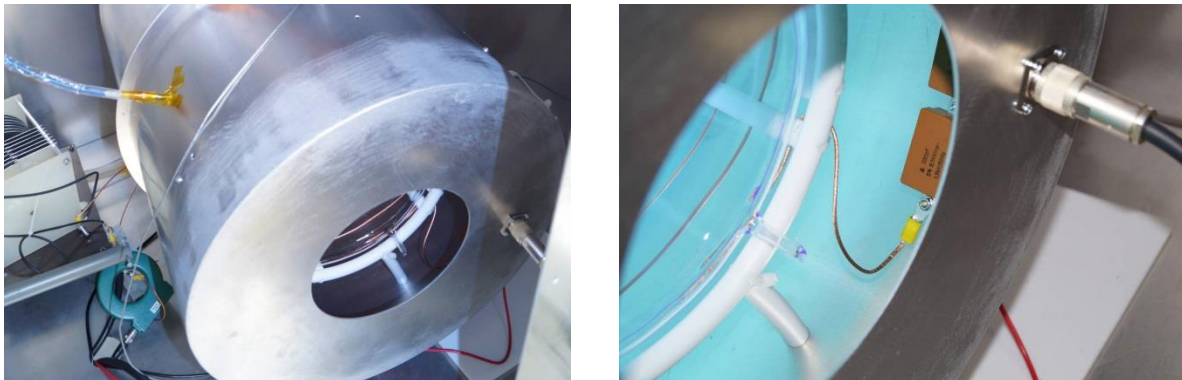


Abb. 10: Fotografie des abgeschirmten UV-Systems (links), Fotografie der Lampe im Betrieb (rechts)

3.7.3. Zündungsmechanismus/Zündhilfe

Die Zündung mit den in den vorangehenden Arbeitspaketen entwickelten Lampenparametern funktioniert bereits recht gut. Als Ergebnis der getätigten Versuche hat sich gezeigt, dass die HF-Litzen der Anregungswicklung möglichst nahe an der Lampe liegen sollten, um eine einfache Zündung zu ermöglichen. Wird bis zur Zündung zusätzlich die Anregungsfrequenz zu kleineren Frequenzen (z. B.: 1,9 MHz statt 2 MHz), also in Richtung Resonanzfrequenz verändert, so konnte eine sichere Zündung ohne weitere Hilfsmittel realisiert werden.

Die Zündung mit dem kommerziellen HF-Generator erforderte eine Variation des Anpasskondensators (kleinere Kapazität von etwa 200 pF zur Zündung, um die nötige Spannungsüberhöhung zu erreichen, größere Kapazität von etwa 600 pF im Betrieb). Zündtests mit dem in Arbeitspaket 8 entwickelten Elektronischen Vorschaltgerät (EVG) zeigen, dass die Lampe grundsätzlich auch durch eine leichte Frequenzvariation und ohne Variation der Anpasskapazität zündfähig ist. Dies ist bei geeigneter Resonanzkreis-Auslegung auf die grundsätzlich höhere Lampenspannung zurückzuführen.

3.7.4. Lampen mit finaler Geometrie

Wie bereits erwähnt, hängt die Lampeneffizienz von der eingekoppelten elektrischen Leistung ab. Eine höhere Leistungsdichte reduziert dabei die Plasmaeffizienz. Dieser Einfluss ist in Abb. 11 für unterschiedliche Lampenfüllungen mit finaler Geometrie abgebildet. Dabei sind die hier abgebildeten Messpunkte jeweils bei einer optimalen „cold spot“ Temperatur ermittelt worden. Bei Leistungen größer 2000 W war dies erst im späteren Projektverlauf durch die Nachrüstung der aktiven Appendix-Kühlung möglich.

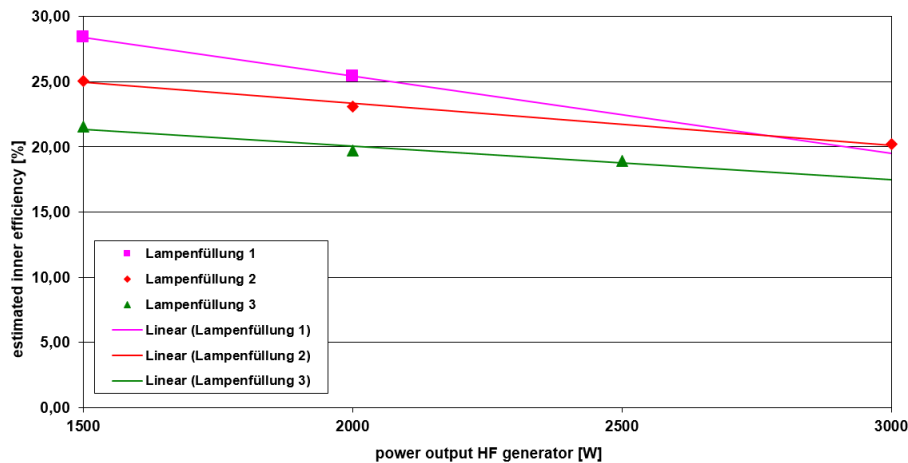


Abb. 11: Innere Effizienz in Abhängigkeit der elektrischen Leistung für Lampenkörper mit unterschiedlichen Füllungen. Die Symbole stellen die Messpunkte dar, die Linie die durch einen linearen Fit ermittelten Werte.

Über die Projektlaufzeit konnten die UVC-Leistung und teilweise auch die Effizienz der UV-Lampen bis zur Erreichung der finalen Geometrie immer weiter gesteigert werden. Dies ist in der folgenden Abb. 12 dargestellt. Bei UVC-Leistungen von 14 W/cm wurden 25 % Effizienz und bei 12 W/cm eine Effizienz von 29 % mit den großen Lampenkörpern erreicht.

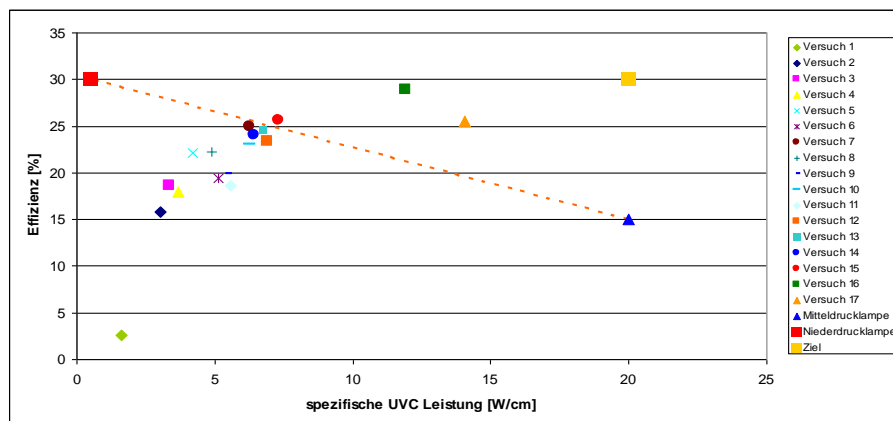


Abb. 12: Leistungseffizienzdiagramm der bisher bei eta plus durchgeführten Versuche

3.8. Entwicklung Elektronisches Vorschaltgerät (EVG)

3.8.1. Vorentwicklung EVG

Bei der Analyse des ersten Testmusters des Hochfrequenzinverters wurden einige Schwachstellen im Design gefunden, sodass im Rahmen des zweiten Teils von AS6, in dem Optimierungen geplant waren, auch eine Überarbeitung des Layouts notwendig wurde. Die erreichten Verbesserungen betreffen zum einen die thermische Auslegung der Treiberschaltung und zum anderen die Eigenstörbarkeit der gesamten Ansteuerschaltung. Die Maßnahmen waren erfolgreich, sodass das zweite Testmuster bei einer Überlast von 50 % im Kurzschlussbetrieb thermisch stabil und mit guter Signalintegrität betrieben werden kann.

Der Inverter wurde in Verbindung mit einem Serienschwingkreis und einer Last von 50 Ohm bei bis zu 1,5 kW Ausgangsleistung betrieben. Der gemessene Wirkungsgrad lag dabei etwa bei 92 %. Ein großer Teil der Verlustleistung entstand in der Schwingkreisdrossel in Form von Kernverlusten. Ein Dauerbetrieb der Schaltung war deshalb zunächst noch nicht möglich. Der Schwingkreis wurde auch um einen HF-Transformator erweitert, der, falls notwendig, eine Anpassung zwischen Inverter- und Lastimpedanz ermöglicht. Auch bei diesem Bauteil war eine Optimierung hinsichtlich Baugröße und Verlustleistung notwendig. Zur lastseitigen Stromerfassung wurde ein induktiver Messumformer erfolgreich getestet, dessen Spannungssignal hochfrequent (60 MHz) abgetastet und später zur Leistungserfassung und Regelung verwendet wird.

Weitere Arbeiten haben gezeigt, dass die Resonanzbauteile neben den Transistoren die kritischsten Bauteile des Systems hinsichtlich Lebensdauer und Effizienz des elektronischen Vorschaltgeräts darstellen. Eine Übersicht der Verluste für die jeweiligen Komponenten ist in Abb. 13 dargestellt. Mit den optimierten Komponenten konnte eine Wechselrichtereffizienz von 94,39 % bei einer Ausgangsleistung von 2 kW erreicht werden. Weiterhin konnte die Möglichkeit des Dauerbetriebs der Schaltung im Zuge der Optimierungen sichergestellt werden.

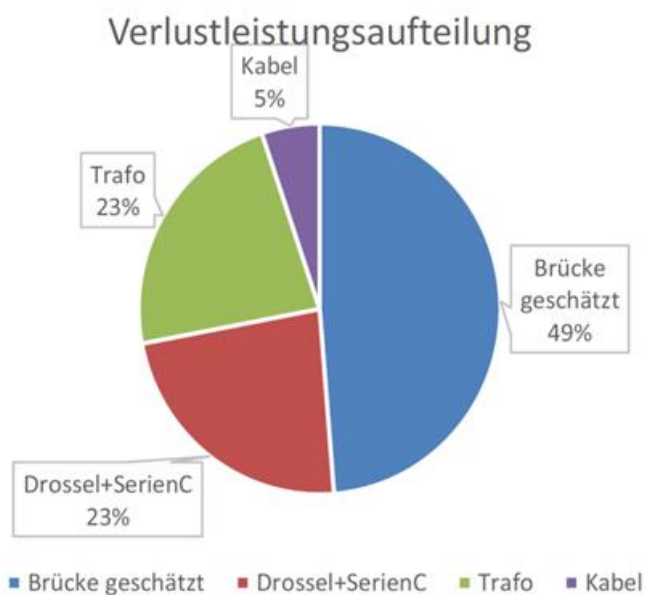


Abb. 13: Verlustaufteilung im Schwingkreis bei 2,11 MHz und 6 A Resonanzstrom. Die Gesamtverlustleistung beträgt 100 W inkl. Treiberleistung.

Nach Abschluss der Labortests mit dem zweiten Musterinverter am LTI wurde ein erster Test des dort entwickelten Inverters im Zusammenspiel mit der induktiven Lampe bei eta plus erfolgreich bis 2 kW durchgeführt. Zur abschließenden Bauteiloptimierung an den Resonanzbauteilen zwecks weiterer Reduktion der Verluste wurde der Resonanzkreis zunächst simuliert und darauf aufbauend optimiert. Im Ergebnis konnte die angestrebte Leistung von 4 kW über einen Zeitraum von ca. 30 Minuten in die Lampe eingekoppelt werden. Der erste Versuch einer Pulspaketsteuerung hat gezeigt, dass sich die Lampe auf diese Weise dimmen lässt.

Im Rahmen von mehreren gemeinsamen Tests mit dem LTI im Hause eta plus konnte gezeigt werden, dass das Gesamtkonzept zwar prinzipiell funktioniert, jedoch die Betriebsstabilität deutlich erhöht werden musste. Darüber hinaus wurde der Schwingkreis für den Betrieb an der Lampe unter Anpassung von Resonanzdrossel (2 neue Prototypen), Resonanzkondensatoren und Ausgangstrafo optimiert.

Aufgrund einer zu starken Variation der Betriebsparameter und fehlender Schutzvorrichtungen wurde dabei zunächst der Wechselrichter thermisch beschädigt. Weitere Arbeiten befassten sich mit einer Anpassung des Leiterplattenlayouts, der Realisierung einer Ansteuerplatine zur Generation von Ansteuersignalen mittels eines FPGA sowie der Realisierung einer Interfaceplatine zur Potenzialtrennung zwischen Ansteuereinheit und Signalgenerator. Als Vorbereitung für die Schutzbeschaltung des Wechselrichters wurde eine Strom- und Spannungsnulldurchgangserkennung experimentell untersucht.

3.8.2. Entwicklung EVG

Zunächst war das Teilprojekt der EVG-Entwicklung in erster Linie beim Auftragnehmer LTI angesiedelt und sollte dann von der eta plus übernommen werden. Jedoch konnte mit dem vom LTI zu Verfügung gestellten EVG kein sicherer und stabiler Lampenbetrieb über einen längeren Zeitraum (> 30 min) gewährleistet werden. Dies führte zu erheblichen zeitlichen Verzögerungen im weiteren Projektverlauf. Nach dem Projekt-Ausstieg des LTI im Dezember 2015 wurde die EVG-Entwicklung vollständig von der eta plus übernommen. Dies erforderte die Einstellung und Einarbeitung von neuem Personal sowie eine Optimierung und Weiterentwicklung der vom LTI übergebenen Komponenten. In der Folge entstanden signifikante zusätzliche Aufwände sowie die Notwendigkeit einer Verlängerung der Projektlaufzeit.

Das vom Auftragnehmer LTI konzipierte Vorschaltgerät wurde im weiteren Projektverlauf stark modifiziert und insbesondere mit entsprechenden Sicherheitsfunktionen (ZVS-Überwachung, Brückenstromüberwachung) ausgestattet. Zur Anpassung des EVG an die neuartige UV-Lampe wurde der dafür notwendige Resonanzkreis durch eine Simulation angepasst, dann technisch realisiert und in einem iterativen Prozess aus abwechselnden weiteren Simulationen und Experimenten für den stabilen Betrieb der Lampe erfolgreich optimiert. In Abb. 14 ist ein Ersatzschaltbild von EVG inkl. Ersatzschaltbild von Resonanzkreis und Koaxiallampe dargestellt.

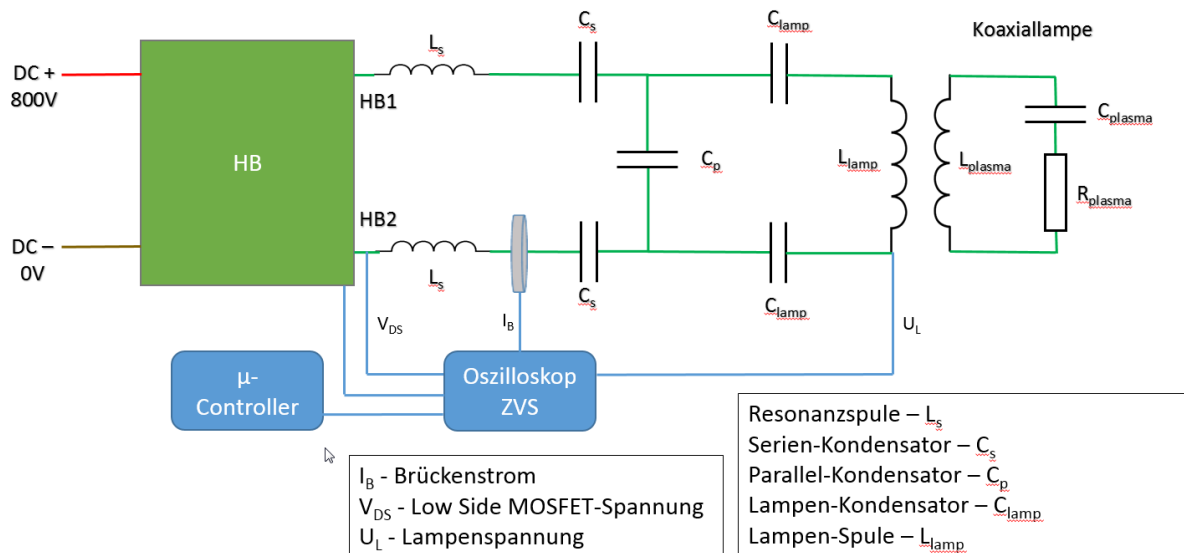


Abb. 14: Resonanzkreis und Ersatzschaltbild der Koaxiallampe (HB = H-Brücke)

3.8.3. Aufbau und Funktionstests EVG

Im Rahmen dieser Arbeiten wurden die zuvor getätigten Entwicklungen in ihrer finalen Form praktisch umgesetzt und aufgebaut. Abb. 15 zeigt eine Fotografie des aufgebauten EVG mit angeschlossenem Resonanzkreis sowie Strom- und Spannungssonde zur Überwachung.

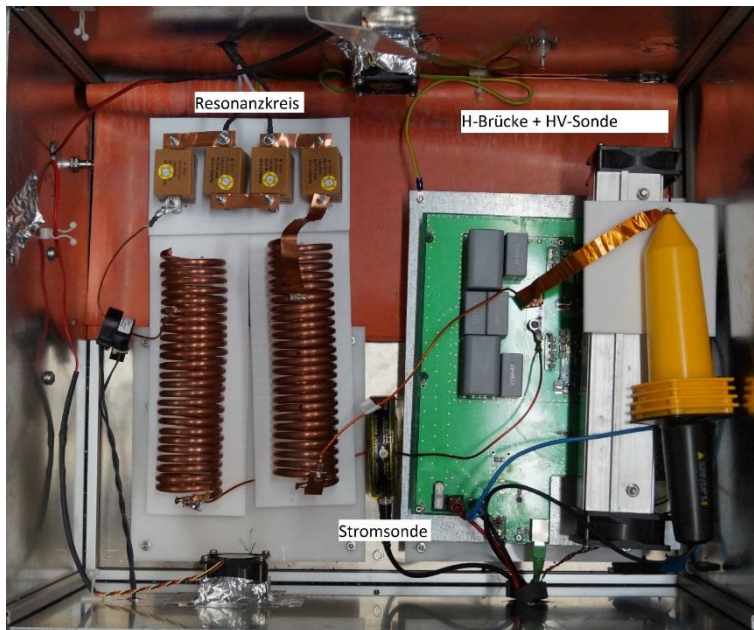


Abb. 15: Fotografie des aufgebauten EVG

Durch die umfangreiche Überwachung der essentiellen Betriebsparameter (MOSFET-Temperatur, Brückenspannung, Brückenstrom, Lampenspannung) konnte in den nachfolgend durchgeführten Funktionstests ein stabiler EVG-Betrieb (Betriebsdauer > 6 h, Gesamtbetriebsdauer > 24 h) im Zusammenspiel mit der neuen UV-Lampe nachgewiesen werden.

Die MOSFET-Temperatur wurde mit einer Thermokamera gemessen und überwacht. Sie bleibt bei einer Lampenleistung zwischen 2 und 3 kW (bei einem Brückenstrom von 8 – 10 A) stabil im Bereich zwischen 50 und 70 °C (siehe Abb. 16).

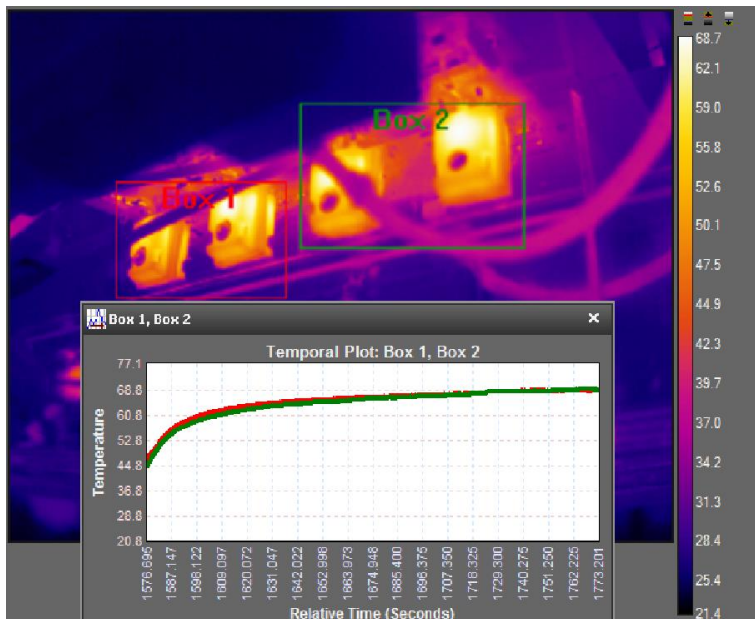


Abb. 16: Messung der MOSFET-Temperatur im Lampenbetrieb bei einer Leistung von etwa 2,5 kW und einer Frequenz von 2 MHz. Der Brückenstrom beträgt bei diesen Betriebsbedingungen typischerweise 7-8 A

Ebenfalls wurde die Zündung der Lampe mit den im Rahmen des Projekts beschafften Spannungssonden genauer analysiert. Wie für induktiv gekoppelte Plasmen üblich, erfolgt der Zündvorgang als Übergang eines kapazitiven in einen induktiven Modus [Lee11]. Der kapazitive Modus hat eine Dauer von 1,5 bis 3 ms und zeichnet sich durch einen erhöhten Brückenstrom (15 A bei 2 MHz und ca. 2 kW) sowie eine erhöhte Lampenspannung (1,4 kV aus). Details dazu finden sich in Abb. 17.

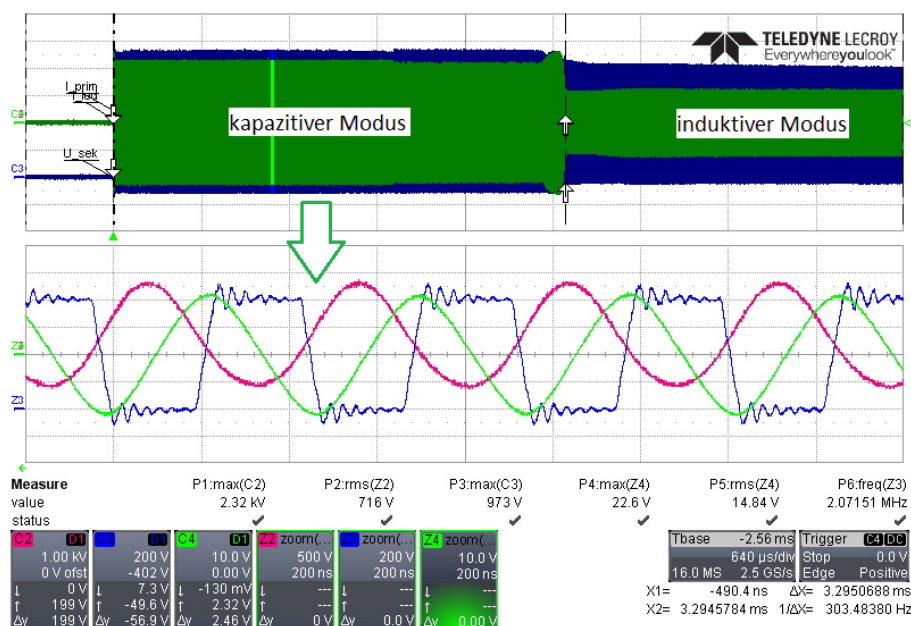


Abb. 17: Drain-Source-Spannung (C3, blau), Brückenstrom (C4, grün) und Lampenspannung (C2, violett) während des Zündvorgangs bei 2 kW und 2,1 MHz. Die angegebenen Werte zeigen typische Verhältnisse im kapazitiven Modus der Entladung

Nach dem Zündvorgang folgt eine Warmlaufphase der Lampe, in welcher der Quecksilber-Partialdruck in einem Zeitraum von 20 bis 30 min auf seinen optimalen Wert in Abhängigkeit von der Kühlungssituation ansteigt. Daraus resultiert eine Erhöhung der Leistungseinkopplung um typischerweise ca. 25 % von 2 kW auf 2,5 kW bei konstanter Frequenz. Diese Warmlaufphase lässt sich durch aktive Heizung des Appendix auf wenige Minuten verkürzen. Unter oben genannten Bedingungen beträgt der Brückenstrom 7 bis 8 A bei einer Lampenspannung von etwa 820 V. Details zu diesem Zusammenhang sind Abb. 18 zu entnehmen.

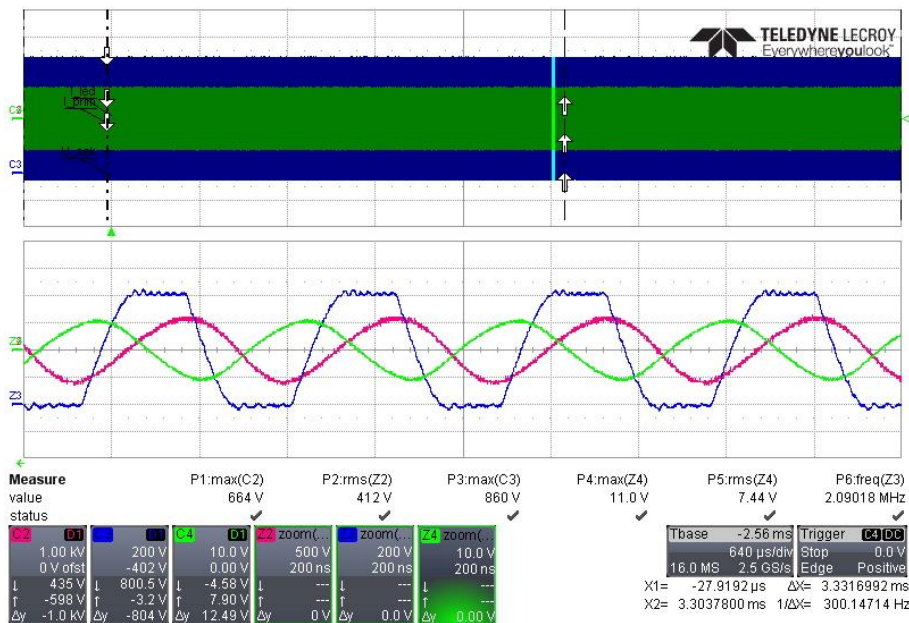


Abb. 18: Drain-Source-Spannung (C3, blau), Brückenstrom (C4, grün) und Lampenspannung (C2, violett) im stabilen Lampenbetrieb bei 2,5 kW und 2,1 MHz. Der Brückenstrom beträgt 7,4 A bei einer Lampenspannung von 820 V. Die Leistungserhöhung um 500 W gegenüber dem Zündmoment resultiert aus einem erhöhten Quecksilber-Dampfdruck.

3.9. Integration und Feldtests

Aufgrund der im Projekt aufgetretenen technischen Schwierigkeiten und Problemstellungen sowie dem geleisteten Mehraufwand für deren Überwindung konnte das vorliegende Arbeitspaket während der Projektlaufzeit nur noch teilweise bearbeitet werden.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurde ein Demonstrator des Wasserentkeimungssystems auf Basis der neuartigen UV-Lampe und des EVG neuer Bauart aufgebaut, der nun nach Abschluss des Projektes die prinzipielle Durchführung von Feldtests erlaubt. Eine schematische Skizze des Versuchsaufbaus ist in Abb. 19 dargestellt; Abb. 20 zeigt eine Fotografie des Demonstrators. Der Demonstrator (Lampe im geplanten Anwendungsfall, d. h. Wasserbehandlung im Sleeve) lässt sich bei einer elektrischen Leistung von 4 kW stabil betreiben. Für den Demonstrator wurde der einstellbare Anpass-Serien-Kondensator durch geeignete Glimmerkondensatoren ersetzt.

Entsprechende Gespräche zur Vorbereitung von Feldversuchen bei geeigneten Anwendungspartnern werden derzeit geführt.

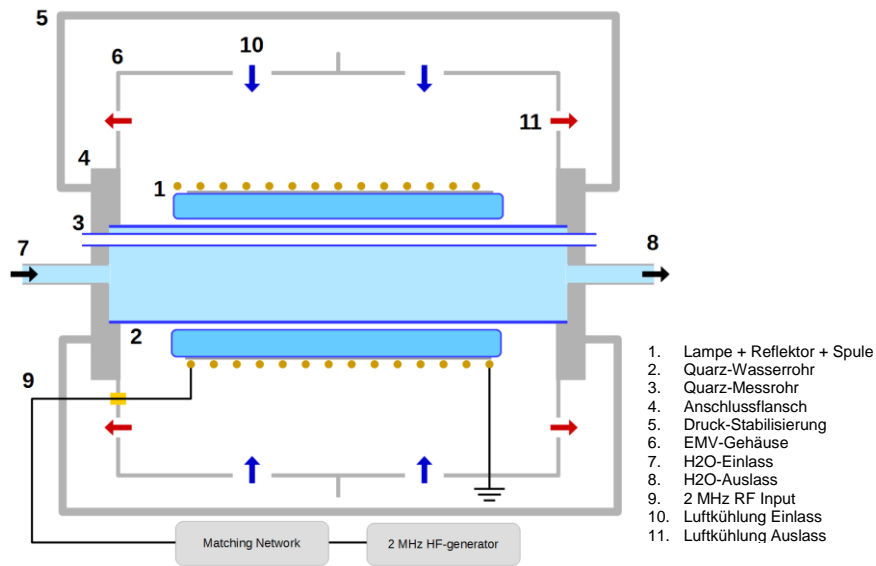


Abb. 19: Schematische Skizze des Demonstrators

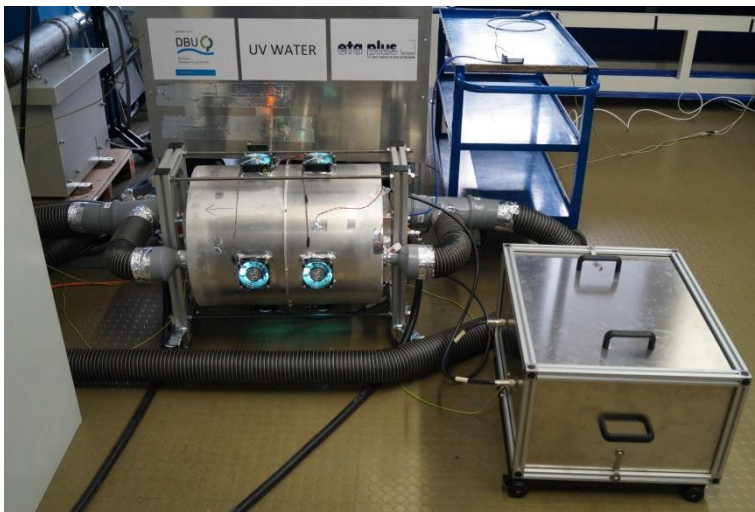


Abb. 20: Fotografie des Demonstrators

Fazit

Die im vorliegenden FuE-Projekt verfolgte Zielstellung der Entwicklung einer UV-Lampe neuartigen Aufbaus mit einer derzeit am Markt nicht verfügbaren Eigenschaftskombination aus UVC-Effizienz und Leistungsdichte konnte prinzipiell voll erreicht werden.

Ein voll funktionsfähiger Demonstrator einer UV-Lampe mit Koaxialaufbau sowie der Möglichkeit eines induktiven Betriebs (betrifft Zündung und Leistungseinkopplung) wurde im vorgesehenen Anwendungsfall der Wasserentkeimung erfolgreich realisiert.

Die quantitativen technischen Zielstellungen konnten ebenfalls weitgehend erfüllt werden, sodass die umweltrelevanten Zielstellungen durch eine erfolgreiche Vermarktung weiterhin voll erreicht werden können.

Der Stand der Technik im Bereich der Wasserentkeimung mittels UV-Systemen wird in Zukunft voraussichtlich in starker Weise von den in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnissen mitbestimmt werden.

Literaturverzeichnis

[Cha01]	CHABERT, P. und LICHTENBERG, A. und LIEBERMAN, M. und MARKHTANOV, A.: <i>Instabilities in low-pressure electronegative inductive discharges</i> , Plasma Sources Sci. Technol. 10, 478, 2001.
[Hee04]	HEERING, W.: <i>UV SOURCES – Basics, Properties and Applications</i> , IUVA News 6, No. 4, p. 7-13, 2004.
[Lee11]	LEE, Y.W. und LEE, H.L. und CHUNG, T.H.: <i>E-H mode transition in low-pressure inductively coupled nitrogen-argon and oxygen-argon plasmas</i> , J. Appl. Phys. 109, 113302, 2011