

Berger GmbH & Co. KG  
Kamp-Lintfort

Kooperationspartner: Herbert Waldmann GmbH & Co. KG  
Villingen-Schwenningen

## **Quecksilberfreies modulares UV-Therapiesystem auf der Basis einer dielektrisch behinderten Entladung „XeTherMed“**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem AZ  
33938/01 21/2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Benjamin Herden

September 2019

06/02		<b>Projektkennblatt</b>			
		der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>33938/01</b>	Referat	<b>21/0</b>	Fördersumme	<b>144.695,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Quecksilberfreies, modulares UV-Therapiesystem auf der Basis einer dielektrisch behinderten Entladung – Kurztitel: XeTherMed</b>				
<b>Stichworte</b>	UV-Therapiesystem, XeTherMed-Lampe, Phototherapie, Dielektrisch behinderte Entladung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
	<b>01.07.2017</b>	<b>30.06.2019</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte	Kurzberichte: 09.02.2018, 25.07.2018, 29.01.2019				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	<b>BERGER GmbH &amp; Co. KG</b>				Tel 02842 9135 - 91
	Friedrichstraße 80				Fax 02872 9135 - 35
	47475 Kamp-Lintfort				<b>Projektleitung:</b> Dr. Benjamin Herden <a href="mailto:Herden@berger-gmbh.de">Herden@berger-gmbh.de</a>
					Bearbeiter Dr. Benjamin Herden
<b>Kooperationspartner</b>	<b>Herbert Waldmann GmbH &amp; Co. KG</b> Peter-Henlein-Straße 5 78056 Villingen-Schwenningen				
<b>Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens</b>					
<p>Die Neuheit des Lösungsansatzes besteht in einer neuen, quecksilberfreien Dreielektrodenflachlampe mit höherer Lebensdauer, einer höheren Energieeffizienz, einem flachen Lampendesign, einem flexiblen, modularen Aufbau der Therapiegeräte sowie der Selektivität der Bestrahlung. Damit steht dem Nutzer eine quecksilberfreie Lösung zur Verfügung mit der ein breiter Anwendungsbereich realisiert werden kann. Es sind Spektren von 280 bis 800 nm realisierbar. Der konstruktive Aufbau von Therapiegeräten ist durch das Modulkonzept einfacher.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• UV-A und UV-B Spektren entsprechend bisheriger bewährter und zugelassener Therapien</li> <li>• Kein Quecksilber</li> <li>• Strahlungsleistung im Abstand von 20 cm: UV-A 20 mW/cm<sup>2</sup>, UV-B 15 mW/cm<sup>2</sup>, Effizienz des Gesamtsystems &gt; 20 %</li> <li>• Sehr hohe Gleichmäßigkeit ohne zusätzliche optische Systeme</li> <li>• Selektive Bestrahlung möglich</li> <li>• Keine Einbrennzeit</li> <li>• Lebensdauer 10.000 Stunden</li> <li>• Modularer Aufbau in Kachelform</li> <li>• Individuelle Gestaltungsmöglichkeiten durch modularen Aufbau</li> <li>• Dicke der Lampe einschließlich Vorschaltgerät 35 bis max. 50 mm</li> <li>• Dimmbarkeit von 1 bis 100 %</li> <li>• Keine Kühlung durch hohe Effizienz und gleichmäßige Wärmeverteilung</li> <li>• Demonstrator 4 Kacheln mit einem Elektronischen Vorschaltgerät (EVG)</li> </ul>					

## **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

- 1 Detaillierte Analyse bestehender Phototherapiegeräte und DBE-Technologien
  - 1.1 Analyse der technischen Anforderungen an Phototherapiegeräte
  - 1.2 Detaillierte Analyse der therapeutischen Parameter und Anforderungen
  - 1.3 Auswahl und Analyse geeigneter Leuchtstoffe
  - 1.4 Konzeptauswahl für elektronische Betriebs- und Steuergeräte
- 2 Entwicklung des prinzipiellen Aufbaukonzeptes für DBE UV-Therapiegeräte
  - 2.1 Erstellen von Aufbaukonzepten für DBE UV-Therapiegeräte
  - 2.2 Ableiten von Aufbauvarianten für DBE-Kachelmodule
  - 2.3 Bewertung von Bauraumkonzepten, thermischen, elektrischen und optischen Faktoren
  - 2.4 Entwicklung eines skalierbaren Aufbaukonzeptes für DBE UV-Therapiegeräte
- 3 Entwicklung des modularen XeTherMed- Lampensystems
  - 3.1 Spezifikation der optischen, elektrischen und fertigungstechnischen Anforderungen
  - 3.2 Konstruktion von Versuchsmustern der XeTherMed-Lampe
  - 3.3 Entwicklung des Vorschaltgerätes
  - 3.4 Aufbau von Versuchsmustern der XeTherMed-Lampe
  - 3.5 Aufbau von Versuchsmustern des Vorschaltgerätes
  - 3.6 Entwicklung und Aufbau einer Versuchsumgebung
  - 3.7 Durchführung von Tests
  - 3.8 Entwicklung des modularen XeTherMed-Lampensystems
- 4 Aufbau des Demonstratorsystems
  - 4.1 Aufbau der XeTherMed-Lampenmodule
  - 4.2 Funktionstests
- 5 Test
  - 5.1 Test der optischen Parameter in unterschiedlichen Anwendungen
  - 5.2 Test der elektrischen Parameter in unterschiedlichen Anwendungen
  - 5.3 Optimierung der Systemkomponenten
  - 5.4 Dokumentation

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

## **Ergebnisse und Diskussion**

Der innovative Kern bestand in der Entwicklung einer neuen, quecksilberfreien Dreielektrodenflachlampe mit höherer Lebensdauer, einer höheren Energieeffizienz, einem flachen Lampendesign, einem flexiblen, modularen Aufbau der Therapiegeräte sowie der Selektivität der Bestrahlung. Nach Untersuchungen bezüglich geeigneter Leuchtstoffe wurden Muster von Lampen mit zwei relevanten UV-Spektren sowie das erforderliche Betriebsgerät entwickelt, aufgebaut und vermessen. Die erforderlichen UV-Spektren wurden in vollem Umfang realisiert. Aus technischer Sicht ist der Lösungsansatz bestätigt. Die erforderlichen Spektren können ohne Quecksilber realisiert werden. Der Aufbau eines Lampenmoduls ist im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen mit quecksilberhaltigen Entladungslampen kleiner. Die erforderlichen Bestrahlungsstärken können realisiert werden.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

In Kooperation mit der Fachhochschule Münster wurde eine Bachelorarbeit mit dem Thema "Anwendung des Leuchtstoffes  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$  (20%) in Xenon Excimerentladungslampen", Merve Aylin Yilmaz, 2018 durchgeführt.

## **Fazit**

Es sind weitergehende Forschungstätigkeiten zur Effizienzsteigerung der DBE-Lampenmodule erforderlich. Lösungsansätze bestehen in der Verbesserung der Transmissionseigenschaften des Glases und der Anpassung der Betriebsparameter. Zur Erweiterung des Anwendungsbereiches auf großflächige Bestrahlungsgeräte müssen neue Aufbaukonzepte entwickelt werden. Zudem müssen industrietaugliche Fertigungsprozesse für DBE-Lampen erarbeitet werden.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

## Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
I. Verzeichnis von Bildern und Tabellen.....	5
II. Verzeichnis von Begriffen und Definitionen .....	6
1. Zusammenfassung.....	8
2. Einleitung .....	9
3. Hauptteil.....	15
3.1. Darstellung der Arbeitsschritte.....	15
3.2. Ergebnisse und Diskussion .....	20
3.3. Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse, zusätzliche Umweltentlastung.....	27
3.4. Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation.....	29
4. Fazit .....	29
1. Literaturverzeichnis .....	31
2. Anhänge.....	31

## I. Verzeichnis von Bildern und Tabellen

### Abbildungen

Abbildung 1: UV-C Niederdrucklampen (Philips, links), PUVA-Lampe (Waldmann, rechts)	Seite 9
Abbildung 2: UV-Therapiegeräte, Firma Waldmann	Seite 10
Abbildung 3: Effizienzvergleich UV-LEDs (Stand November 2018)	Seite 10
Abbildung 4: Prinzipaufbau von dielektrisch behinderten Entladungslampen (Xe-Excimerlampen)	Seite 11
Abbildung 5: Spektraler Verlauf der beiden Lampen TL01 und DBE- Lampenprototyp mit dem Leuchtstoff $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$	Seite 16
Abbildung 6: Spektraler Verlauf der beiden Lampen PUVA und DBE-Lampenprototyp mit dem Leuchtstoff $\text{Ba-Si}_2\text{O}_5:\text{Pb}^{2+}$	Seite 16
Abbildung 7: Transmissionsmessung eines unbeschichteten Lampenprototyps aus Borofloat®33 bei einer Wellenlänge von 305 nm	Seite 17
Abbildung 8: DBE-Lampendemonstrator (42 x 38 cm) mit einer effektiven Leuchtfläche von ca. 1450 cm <sup>2</sup> bestehend aus vier Einzellampen	Seite 18
Abbildung 9: DBE-Lampendemonstrator im Vergleich zu einer Abdeckschale eines Bestrahlungsgeräts der Firma Waldmann	Seite 18
Abbildung 10: DBE-Lampendemonstrator im Betrieb, links die vier einzelnen Lampen, mitte der Hochfrequenzschalter und rechts das Hochspannungsgerät	Seite 19
Abbildung 11: Gasentladung einer DBE-Lampe welche mit Xenon betrieben wird	Seite 21
Abbildung 12: Normierte Bestrahlungsstärken des DBE-Lampendemonstrators mit dem Leuchtstoff $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$ im Vergleich zu der Lampe TL01	Seite 22
Abbildung 13: DBE-Lampendemonstrator während des Betriebs im Messlabor der Firma Waldmann	Seite 23
Abbildung 14: UV-Intensität des DBE-Lampendemonstrators in Abhängigkeit von der Frequenz	Seite 24
Abbildung 15: UV-Intensitätsverteilung über der Lampenfläche einer einzelnen DBE-Lampe	Seite 24
Abbildung 16: Relative Lampenintensität im UV-B Spektralbereich über die Betriebsstunden der DBE-Lampe	Seite 25
Abbildung 17: Transmissionsmessung von Borofloat®33 im Vergleich zu Borofloat®33 HT und einem UV transparentem Acrylglas	Seite 26
Abbildung 18: Aufbau der Schichten aus Schutzschicht und Leuchtstoffschicht in einer DBE-Lampe	Seite 27
Abbildung 19: Mögliche Lichtfarben zum Signalisierung des Betriebes der Lampe	Seite 30

### Tabellen

Tabelle 1: Messwerte der optischen Charakterisierung des DBE-Lampendemonstrators	Seite 23
Tabelle 2: Direkte Umweltentlastung	Seite 28
Tabelle 3: Einsparungen pro Jahr	Seite 28
Tabelle 4: Einsparungen bezogen auf die Lebensdauer	Seite 28

## II. Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

### Begriffe

#### Photo(chemo)therapie

Die Photo(chemo)therapie ist eine Behandlungsmethode mit ultraviolettem (UV) Licht. Als Lichtquellen werden vorwiegend quecksilberhaltige Niederdrucklampen mit speziell abgestimmten, zugelassenen UV-A und UV-B Spektren eingesetzt.

#### UV-Therapiesystem

Leuchten mit speziellen UV Spektren zur Durchführung von medizinischen Photo(chemo)therapie-Behandlungen

#### Dielektrisch behinderte Entladung

Die dielektrisch behinderte Entladung ist eine Wechselspannungs-Gasentladung, bei der mindestens eine der Elektroden vom Gasraum durch galvanische Trennung mittels eines Dielektrikums elektrisch isoliert ist.

#### Excimerstrahler

Die Bezeichnung Excimer ist ein Akronym aus der Kurzform von „excited dimer“ („angeregtes Dimer“). Es handelt sich dabei um ein kurzlebiges Teilchen, das aus zwei oder mehr zusammenhängenden Atomen oder Molekülen besteht.

#### XeTherMed-Lampe

Im Projekt verwendete Bezeichnung für eine neue, quecksilberfreie Dreielektrodenflachlampe mit höherer Lebensdauer, einer höheren Energieeffizienz, einem flachen Lampendesign, einem flexiblen, modularen Aufbau und selektiver Bestrahlung.

#### Solarisation

Verringerung der Transmission (Durchlässigkeit) für Licht verschiedener Wellenlängenbereiche durch Einwirkung von kurzwelligem UV-Licht

### **Abkürzungen**

DBE	-	Dielektrisch behinderte Entladung
LED	-	Leuchtdiode (light-emitting diode)
UV	-	Ultraviolett
UV-A	-	Ultraviolettstrahlung im Bereich 320 – 380 nm
UV-B	-	Ultraviolettstrahlung im Bereich 280 – 320 nm
EVG	-	Elektronisches Vorschaltgerät
KRA	-	Kumulierter Rohstoffaufwand
KEA	-	Kumulierter Energieaufwand
GWP	-	Treibhausgaspotenzial

### **Definitionen**

Entfällt

## 1. Zusammenfassung

### Durchgeführte Untersuchungen

Der innovative Kern bestand in der Entwicklung einer neuen, quecksilberfreien Dreielektrodenflachlampe mit höherer Lebensdauer, einer höheren Energieeffizienz, einem flachen Lampendesign, einem flexiblen, modularen Aufbau der Therapiegeräte sowie der Selektivität der Bestrahlung. Nach Untersuchungen bezüglich geeigneter Leuchtstoffe wurden Muster von Lampen mit zwei relevanten UV-Spektren sowie das erforderliche Betriebsgerät entwickelt, aufgebaut und vermessen. Die erforderlichen UV-Spektren wurden in vollem Umfang realisiert.

### Entwicklungen

Es wurden der modulare Lampenaufbau sowie die Leuchtstoffe entwickelt. Mit einem neu entwickelten elektronischen Vorschaltgerät können derzeit bis zu vier Lampen eines Moduls betrieben werden.

### Erzielte Ergebnisse

Aus technischer Sicht ist der Lösungsansatz bestätigt. Die erforderlichen Spektren können ohne Quecksilber realisiert werden. Der Aufbau eines Lampenmoduls ist im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen mit quecksilberhaltigen Entladungslampen kleiner. Die erforderlichen Bestrahlungsstärken können realisiert werden.

### Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Es sind weitergehende Forschungstätigkeiten zur Leistungs- und Effizienzsteigerung der DBE-Lampenmodule erforderlich. Lösungsansätze bestehen in der Verbesserung der Transmissionseigenschaften des Glases, der Anpassung der Betriebsparameter und einem besseren Thermomanagement.

Zur Erweiterung des Anwendungsbereiches auf großflächige Bestrahlungsgeräte müssen neue Aufbaukonzepte entwickelt werden. Zudem müssen industrietaugliche Fertigungsprozesse für DBE-Lampen erarbeitet werden.

### Kooperationspartner:

Am Projekt war die Herbert Waldmann GmbH & Co. KG, als Kooperationspartner beteiligt.

Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert unter dem Aktenzeichen 33938/01.



## 2. Einleitung

### **Ausgangssituation:**

Die Photo(chemo)therapie ist eine Behandlungsmethode mit ultraviolettem (UV) Licht. Als Lichtquellen werden vorwiegend quecksilberhaltige Niederdrucklampen mit speziell abgestimmten, zugelassenen UV-A und UV-B Spektren eingesetzt (siehe Abbildung 1). Eine 100 W Lampe enthält dabei zwischen 10 und 15 mg Quecksilber. Neben der Verwendung von Quecksilber bestehen weitere Nachteile in der geringen Lebensdauer der Lampen, der Wärmeentwicklung sowie in der Gleichmäßigkeit der Strahlungsverteilung. In der Anwendung werden die Lampen sehr oft im Minuten- bis Sekundentakt ein- und ausgeschaltet. Deren Lebensdauer sinkt dabei drastisch und liegt bei etwa 500 bis 800 Stunden. Zudem zwingt die vorgegebene Lampenform den Konstrukteur eines Therapiegerätes zu erheblichen Einschränkungen. Bei einer maximalen elektrischen Anschlussleistung von bis zu 6 kW (Lichtleistung 1,2 kW) müssen besondere Maßnahmen zur Kühlung des Gerätes und zum Schutz des Patienten vorgesehen werden.

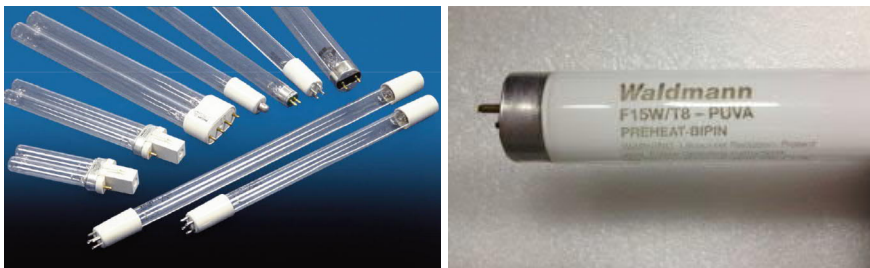


Abbildung 1: UV-C Niederdrucklampen (Philips, links), PUVA-Lampe (Waldmann, rechts)

Bei der Lichtbehandlung von Hautkrankheiten werden mit medizinischen UV-Therapiesystemen weltweit sehr gute Behandlungserfolge erzielt. Alle Therapiesysteme sind in Universitäts-Hautkliniken eingehend erprobt.

Der Kooperationspartner Waldmann ist weltweit als führender Hersteller von UV-Therapiesystemen für die Dermatologie bekannt. Als Pionier mit über 40 Jahren Erfahrung in der Phototherapie zur Behandlung von Hautkrankheiten wie Schuppenflechte und Neurodermitis ist Waldmann ein kompetenter Ansprechpartner für alle Fragen in diesem Bereich. Für die spezifischen Anforderungen an das jeweilige Therapiesystem werden praxisgerechte Lösungen angeboten (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: UV-Therapiegeräte, Firma Waldmann

Effiziente LEDs sind derzeit nur bis 365 nm kommerziell erhältlich. Bei kürzeren Wellenlängen sinkt die Effizienz exponentiell ab (siehe Abbildung 3).

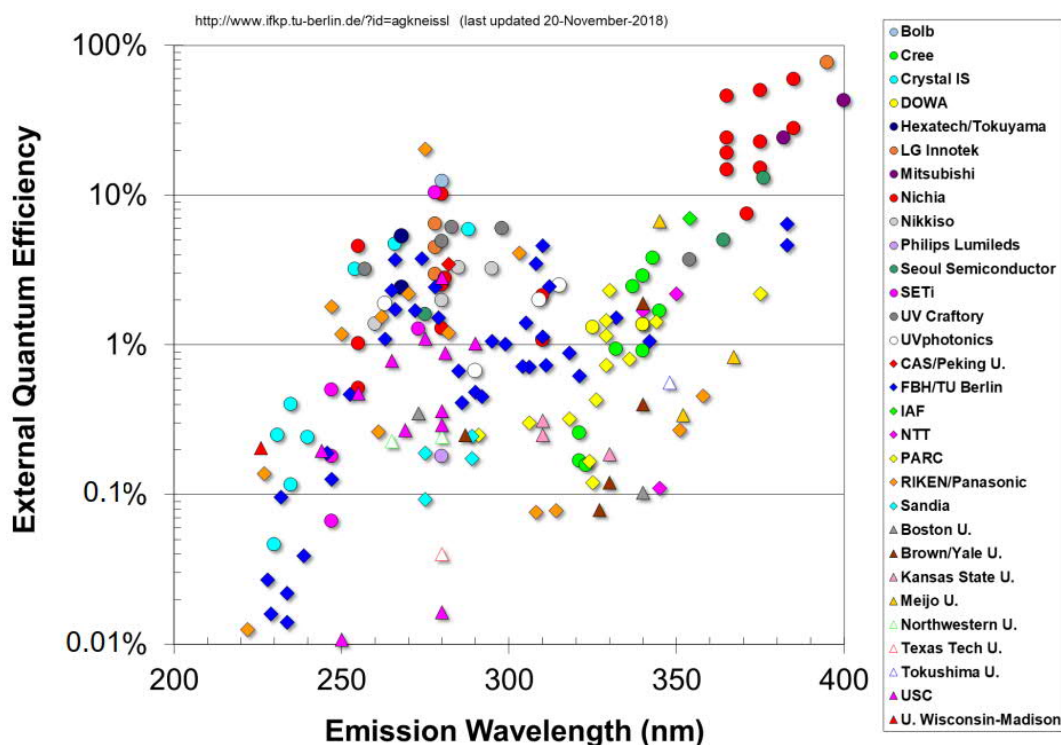


Abbildung 3: Effizienzvergleich UV-LEDs (Stand November 2018)

Die Probleme solcher LEDs sind neben der Effizienz vor allem in der Langzeitstabilität und der Art der Verkapselung zu finden. Außerdem ist die spektrale Lage der LEDs auf bestimmte Bereiche festgelegt und auch die Halbwertsbreiten der Emissionen mit Werten um 10 nm sind materialtypische Eigenschaften. Die Anwendungsgebiete für LEDs bis 365 nm beschränken sich deswegen derzeit auf die Kunststoffindustrie, die Druckindustrie die Sicherheitstechnik und im sichtbaren Spektralbereich natürlich auf die Beleuchtungsindustrie.

Excimerstrahler (siehe Abbildung 4) sind seit Beginn der 80er Jahre wieder verstärkt Forschungsgegenstand und finden sich mittlerweile bereits in kommerziellen Produkten wieder. Von besonders hohen Wirkungsgraden bis zu 60 % - allerdings bei vergleichsweise geringen Leistungsdichten - wird bei Xe-Excimerstrahlern unter Verwendung spezieller elektrischer Anregungsmuster (gepulste Hochvolt-Signale) berichtet. Die primäre Wellenlänge dieser Xe-Excimerstrahler liegt bei 172 nm und eignet sich vor allem für die Behandlung beziehungsweise Reinigung von Oberflächen.

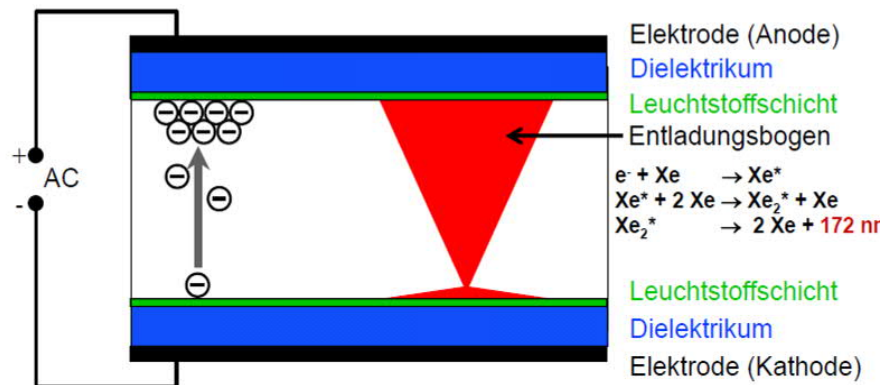


Abbildung 4: Prinzipaufbau von dielektrisch behinderten Entladungslampen (Xe-Excimerlampen)

Eine Xe-Entladung hat viele Vorteile:

- Flache Bauform (aktuell bis ca. 300 cm<sup>2</sup>)
- Stufenlose Dimmbarkeit
- Keine Einbrennzeit
- Kein Elektrodenverschleiß durch außenliegende Elektroden
- Sehr hohe Gleichmäßigkeit durch flächige Entladung
- Hohe Leuchtstoffvielfalt durch niedrige Betriebstemperaturen
- Hohe Strahlungsausbeute
- Geringe Erwärmung
- Hohe Lebensdauer

Einige Excimerlampen hatten sich bereits bis zur Marktreife entwickelt, deren Fokus in allen Fällen auf der Allgemeinbeleuchtung (Weißlichtanwendung) lag.

- Planon (Osram):  
Lichterzeugung durch gepulste dielektrisch behinderte Entladung in Xe-Atmosphäre, Am Elektrodenystem wird von außen eine geeignete Spannung angelegt, Im Entladungsraum werden angeregte Xe-Moleküle erzeugt, Beim Zerfall entsteht kurzwellige UV-Strahlung (172 nm), Umwandlung in sichtbares Licht durch speziell angepassten UV-Leuchtstoff
- Linex (Osram):  
Lichterzeugung erfolgt durch gepulste dielektrisch behinderte Entladung in die Xe-Atmosphäre, Bietet immer sofort Licht und eine konstante Lichtfarbe bis fast zum Lebensdauerende, Ideale Lichtquelle für Anwendungen, bei denen ein schnelles Einschalten gefragt ist, wie z.B. Kopierer, Faxgeräte, Sicherheitstechnik wie Passlesegeräte

- Planilum (Saint-Gobain):  
2,0 cm dick, 50.000 Betriebsstunden 90 % recycelbar, geringe Wärmeentwicklung

Nur wenige Hersteller haben UV-Lampen in ihrem Produktportfolio. Die meisten davon sind allerdings nicht mehr erhältlich da diese oft durch LED-Lösungen ersetzt werden konnten:

- Philips: Quecksilber (Nieder- und Mitteldruck)
- Heraeus: Quecksilber (Nieder- und Mitteldruck), Excimer (Xe<sub>2</sub> 172 nm, KrCl 222 nm, XeBr 282 nm)
- Osram: Quecksilber (Nieder- und Mitteldruck), Excimer Xe<sub>2</sub> 172 nm (Xeradex (Effizienz 40%, 2500 h), Planon (nicht mehr erhältlich), Linex (nicht mehr erhältlich)
- Ushio: Quecksilber (Nieder- und Mitteldruck), Excimer (Ar<sub>2</sub> 126 nm, Kr<sub>2</sub> 146 nm, Xe<sub>2</sub> 172 nm, KrCl 222 nm, XeBr 282 nm, XeCl 308 nm), Excimer + Leuchtstoff (190 und 230 nm)
- Saint Gobain: Excimer Xe<sub>2</sub> 172 nm, Planilum (nicht mehr erhältlich)
- Hönle UV-Technology: Quecksilber (Nieder- und Mitteldruck)

Bei den Phototherapiegeräten existieren schmalbandige UV-B sowie breitbandige UV-B und UV-A Lampenspektren. Das größte Produktportfolio besitzt hier die Firma Waldmann.

### **Zielsetzung**

Die Neuheit des Lösungsansatzes besteht in einer neuen, quecksilberfreien Dreielektrodenflachlampe mit höherer Lebensdauer, einer höheren Energieeffizienz, einem flachen Lampendesign, einem flexiblen, modularen Aufbau der Therapiegeräte sowie der Selektivität der Bestrahlung. Damit steht dem Nutzer eine quecksilberfreie Lösung zur Verfügung mit der ein breiter Anwendungsbereich realisiert werden kann.

Es sind Spektren von 280 bis 800 nm realisierbar. Der konstruktive Aufbau von Therapiegeräten ist durch das Modulkonzept einfacher.

Zusammenfassung der technischen Zielsetzungen:

- UV-A und UV-B Spektren entsprechend bisheriger bewährter und zugelassener Therapien
- Kein Quecksilber
- Strahlungsleistung im Abstand von 20 cm: UV-A 20 mW/cm<sup>2</sup>, UV-B 15 mW/cm<sup>2</sup>, Effizienz des Gesamtsystems > 20 %
- Sehr hohe Gleichmäßigkeit ohne zusätzliche optische Systeme
- Selektive Bestrahlung möglich
- Keine Einbrennzeit
- Lebensdauer 10.000 Stunden
- Modularer Aufbau in Kachelform
- Individuelle Gestaltungsmöglichkeiten durch modularen Aufbau
- Dicke der Lampe einschließlich Vorschaltgerät 35 bis max. 50 mm
- Dimmbarkeit von 1 bis 100 %
- Keine Kühlung durch hohe Effizienz und gleichmäßige Wärmeverteilung
- Demonstrator 4 Kacheln mit einem Elektronischen Vorschaltgerät (EVG)

## Aufgabenstellung

Bisher konnten viele neue Lichtsysteme auf der Basis von LEDs für eine energie- und ressourcensparende Beleuchtung entwickelt und in nahezu allen Anwendungsbereichen erfolgreich am Markt eingeführt werden. Erste praktische Erfolge gibt es auch im Bereich UV-A. Für kurzwelligere Strahlungsquellen muss bisher immer noch auf quecksilberhaltige Leuchtmittel zurückgegriffen werden.

Aus diesem Grund gibt es zurzeit für quecksilberhaltige Lampen mehrere Ausnahmeregelungen.

In der aktuellsten Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten sind die derzeitigen Ausnahmeregelungen der quecksilberhaltigen Lampen aufgeführt [1].

Die zum Projekt in Konkurrenz stehenden quecksilberhaltigen Lampen sind im Anhang III unter

- 1f Für besondere Verwendungszwecke, zurzeit 5 mg, ohne weitere Beschränkung
- 2b IV Lampen für andere allgemeine Beleuchtungszwecke und für besondere Verwendungszwecke (z. B. Induktionslampen) seit dem 31.12.2011 15 mg, danach ohne weitere Beschränkung

aufgeführt.

Dementsprechend gelten für die Lampen keine aktuellen Ausnahmeregelungen mit einem befristeten Datum.

Das Öko Institut für angewandte Ökologie hat die bestehenden Ausnahmeregelungen neu bewertet und in einer Studie zusammengefasst [2]. Die Ergebnisse wurden anschließend an die europäische Kommission übergeben [3].

In der Studie sind nun konkrete Daten angegeben, an welchen die Ausnahmeregelungen für quecksilberhaltige Lampen auslaufen sollen [4]. Für die oben aufgeführten Lampen sind folgende Daten angegeben:

- 1f 21.07.2021
- 2b IV 21.07.2021

Unabhängig davon hat sich die Minamata-Konvention zum Ziel gesetzt, den Ausstoß von Quecksilber weltweit einzudämmen. Ab 2020 ist es verboten, quecksilberhaltige Produkte wie bestimmte Leuchtmittel oder Thermometer zu produzieren oder zu verkaufen [5]. Das Übereinkommen ist mit der Ratifikation durch 50 Staaten am 16. August 2017 in Kraft getreten. Mittlerweile wurde das Übereinkommen von 128 Staaten gezeichnet und von 101 Staaten ratifiziert [6]. Die Umsetzung des Minamata-Übereinkommens in Deutschland er-

folgt auf der Grundlage der ab dem 1. Januar 2018 geltenden Quecksilber-Verordnung 2017/852 der Europäischen Union.

Die Aufgabenstellung bestand in der Entwicklung einer quecksilberfreien Lösung, bestehend aus einer Dreielektrodenflachlampe mit hoher Energieeffizienz, flachem Lampendesign, sowie einem modularen Aufbau mit dem unterschiedliche Therapiegeräte aufgebaut werden können. Neben Untersuchungen bezüglich geeigneter Leuchtstoffe sollten Muster von Lampen mit zwei relevanten UV-Spektren sowie das erforderliche Betriebsgerät entwickelt, aufgebaut und vermessen werden.

### 3. Hauptteil

#### 3.1. Darstellung der Arbeitsschritte

##### Arbeitspaket 1 – Detaillierte Analyse bestehender Phototherapiegeräte und DBE-Technologien

Die Analysen der technischen Anforderungen an Phototherapiegeräte sowie der therapeutischen Parameter und Anforderungen wurden durchgeführt. Lampenprototypen verschiedener Formen und Größen können reproduzierbar hergestellt werden. Das dafür verwendete Glaslot ist bleihaltig.

Zwei vorgegebene Lampenspektren stehen von der Firma Waldmann zur Verfügung, welche mit der neuen Lampentechnologie umgesetzt werden sollen.

- TL01                      Linienemitter bei 311 nm
- PUVA                     breitbandiger Emitter bei 350 nm

Bei dem Lampenspektrum TL01 handelt es sich um den Leuchtstoff  $(\text{Gd}, \text{La})\text{B}_3\text{O}_6:\text{Bi}$ , welcher eine schmale Emissionslinie bei 311 nm besitzt. Alternativ wurde hier der Leuchtstoff  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$  getestet, welcher ebenfalls eine schmale Emissionslinie bei 311 nm besitzt. Für diesen Leuchtstoff wurde eine bessere Performance in den Xenonexcimerentladungslampen erwartet.

Bei dem Lampenspektrum PUVA handelt es sich um den Leuchtstoff  $\text{BaSi}_2\text{O}_5:\text{Pb}^{2+}$ , welcher breitbandig bei 350 nm mit einer Halbwertsbreite von ca. 37 nm emittiert. Dieser Leuchtstoff wird auch in den Xenonexcimerlampen eingesetzt.

Meilenstein 1: Technische Analysen angeschlossen, Leuchtstoffe sind ausgewählt wurde erreicht.

##### Arbeitspaket 2 – Entwicklung des prinzipiellen Aufbaukonzeptes für DBE UV-Therapiegeräte

Aufbaukonzepte für DBE UV-Therapiegeräte und Aufbauvarianten für DBE-Kachelmodule wurden erstellt. Elektronische Vorschaltgeräte (EVG) für den Betrieb der Lampen wurden entwickelt.

Lampenprototypen mit unterschiedlichen Leuchtstoffen wurden hergestellt.

- $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$             Linienemitter bei 311 nm
- $\text{BaSi}_2\text{O}_5:\text{Pb}^{2+}$             breitbandiger Emitter bei 351 nm

Der Lampenprototyp, welcher mit dem Leuchtstoff  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$  beschichtet wurde, zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Lampenspektrum TL01 (siehe Abbildung 5).

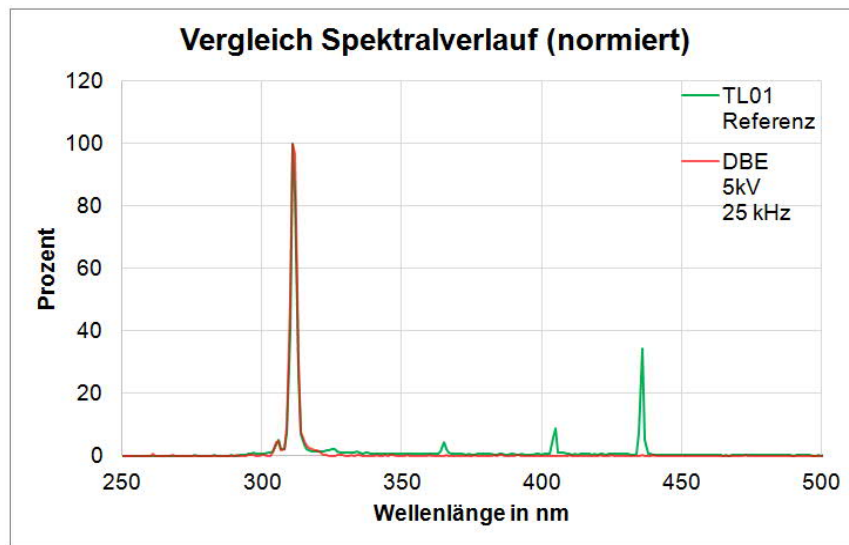


Abbildung 5: Spektraler Verlauf der beiden Lampen TL01 und DBE-Lampenprototyp mit dem Leuchtstoff  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$

Die schmalen Emissionslinien der Quecksilberentladung sind in dem Lampenspektrum der DBE-Lampe nicht enthalten. Die Emissionsmaxima der beiden Lampen liegen bei 311 nm und die Halbwertsbreiten der beiden Emissionsspektren sind nahezu deckungsgleich.

Der Lampenprototyp, welcher mit dem Leuchtstoff  $\text{BaSi}_2\text{O}_5:\text{Pb}^{2+}$  (PUVA, UV-A) beschichtet wurde, konnte ebenfalls spektroskopisch charakterisiert werden (siehe Abbildung 6).

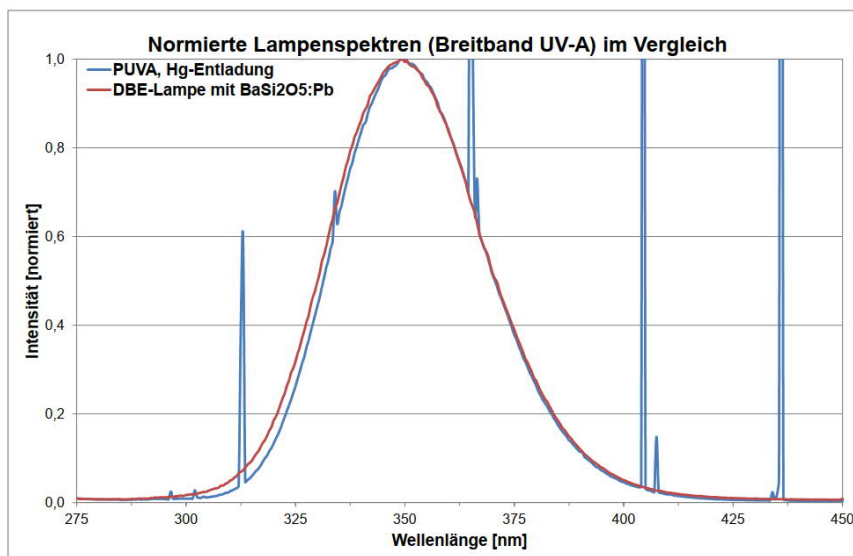


Abbildung 6: Spektraler Verlauf der beiden Lampen PUVA und DBE-Lampenprototyp mit dem Leuchtstoff  $\text{BaSi}_2\text{O}_5:\text{Pb}^{2+}$



Die schmalen Emissionslinien der Quecksilberentladung sind auch in diesem Lampenspektrum der DBE-Lampe nicht enthalten.

Das Maximum der beiden Lampenspektren liegt jeweils bei 350 nm. Im UV-B Spektralbereich besitzt das Spektrum der DBE-Lampe eine um 1 nm breitere Halbwertsbreite als das Lampenspektrum der PUVA-Lampe. Eine genauere spektroskopische Untersuchung muss hier noch erfolgen.

Die Transmission von unbeschichteten Lampenprototypen wurde über einen Zeitraum von knapp 600 h untersucht, um das Alterungsverhalten des Glases zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigten, dass das Borofloat®33 stark solarisiert. Die Transmissionsverminderung entsteht durch die hochenergetische Xenon-Entladung bei 172 nm (siehe Abbildung 7).

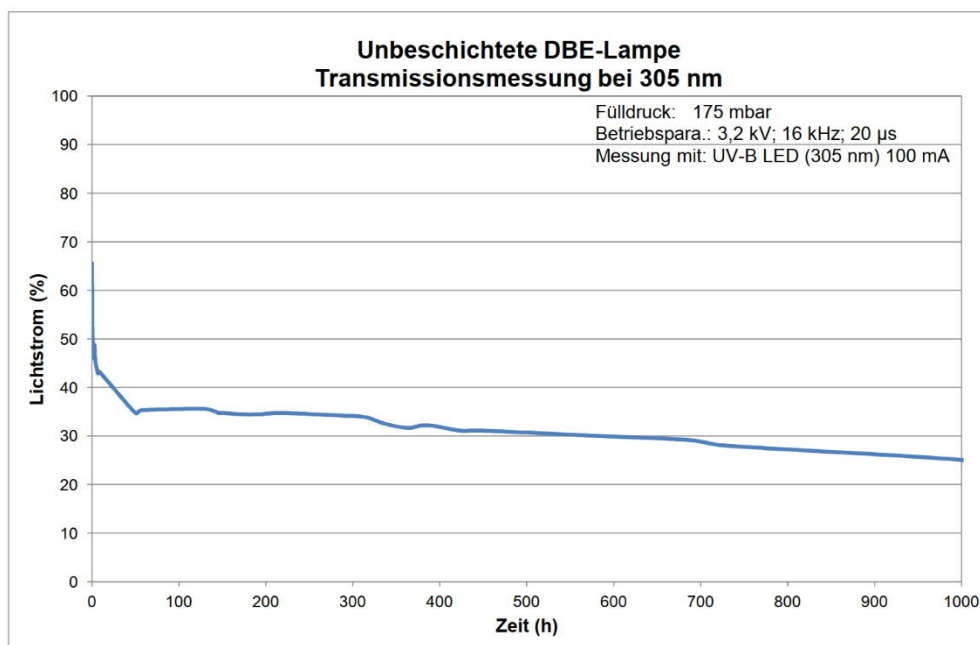


Abbildung 7: Transmissionsmessung eines unbeschichteten Lampenprototyps aus Borofloat®33 bei einer Wellenlänge von 305 nm

Die Verminderung der Transmission ist in den ersten Betriebsstunden am stärksten ausgeprägt. Hier verringert sich die Transmission um ca. 50 %. Nach ca. 50 Betriebsstunden stabilisiert sich der Kurvenverlauf und zeigt über den restlichen Betrachtungszeitraum einen geringen Transmissionsverlust.

Untersuchungen zur Schichtdicke des Leuchtstoffes  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$  wurden durchgeführt, um das optimale Beschichtungsgewicht des Leuchtstoffes in den DBE-Lampen zu optimieren.

Meilenstein 2, Prinzipielles Aufbaukonzept für DBE UV Therapiegeräte entwickelt, wurde erreicht.

Arbeitspaket 3 – Entwicklung des modularen XeTherMed-Lampensystems

Der Lampenprototyp, welcher mit dem Leuchtstoff  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$  (UV-B) beschichtet wurde, zeigt eine sehr gute spektrale Übereinstimmung mit dem Lampenspektrum TL01. Daraufhin wurde auf Basis dieses Lampenprototyps ein erster DBE-Lampendemonstrator aufgebaut (siehe Abbildung 8). Der Demonstrator besteht aus vier einzelnen DBE-Lampen und besitzt eine gesamte Lampenfläche von ca.  $1600\text{ cm}^2$  ( $42 \times 38\text{ cm}$ ). Die effektive Leuchtfläche liegt bei ca.  $1450\text{ cm}^2$  ( $40 \times 36\text{ cm}$ ). Diese Abmessungen entsprechen den Größenverhältnissen von derzeitigen Bestrahlungsgeräten der Firma Waldmann (siehe Abbildung 9). Der Aufbau (Dicke) der Lampen beträgt inklusive Elektroden und Berührungsschutz ca.  $2,5\text{ cm}$ .



Abbildung 8: DBE-Lampendemonstrator ( $42 \times 38\text{ cm}$ ) mit einer effektiven Leuchtfläche von ca.  $1450\text{ cm}^2$  bestehend aus vier Einzellampen



Abbildung 9: DBE-Lampendemonstrator im Vergleich zu einer Abdeckschale eines Bestrahlungsgeräts der Firma Waldmann

Der Betrieb der DBE-Lampen erfolgt über ein Hochspannungsnetzteil und einen Hochfrequenzschalter. Während der Hochfrequenzschalter möglichst nah an den Lampen sitzen sollte (in diesem Fall direkt hinter den Lampen), kann das Hochspannungsnetzteil zentral aufgestellt werden (siehe Abbildung 10).

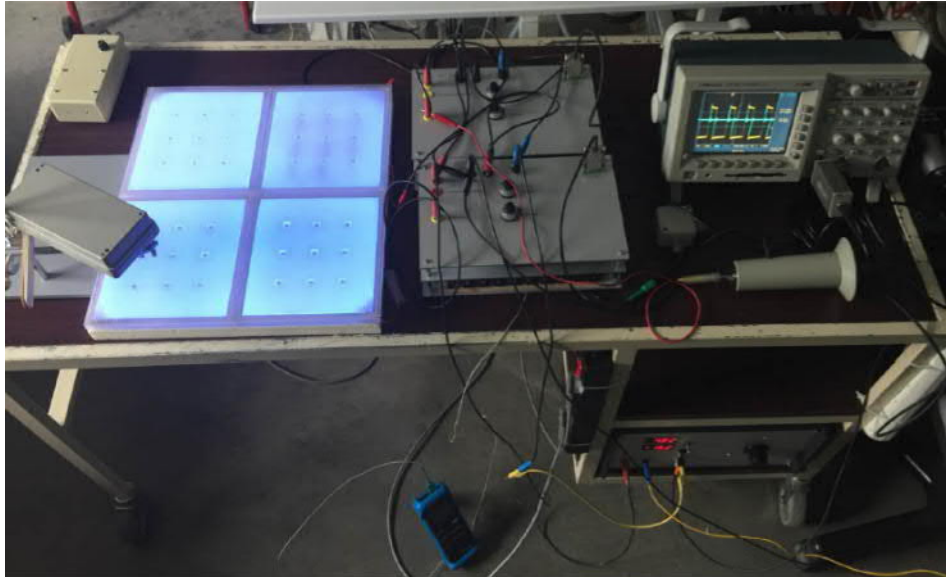


Abbildung 10: DBE-Lampendemonstrator im Betrieb, links die vier einzelnen Lampen, mitte der Hochfrequenzschalter und rechts das Hochspannungsgerät

Die Versorgungsspannung beträgt hinterher bis zu 5 kV. Die Hochfrequenz, welche auch zum Dimmen der Lampe eingesetzt wird, erreicht Werte zwischen 10 und 50 kHz.

Meilenstein 3, Modulares XeTherMed-Lampensystem entwickelt, wurde erreicht.

#### Arbeitspaket 4 – Aufbau des Demonstratorsystems

In Arbeitspaket 4 wurde von Firma Berger ein DBE-Lampendemonstratorsystem für ein Therapiegerät aus vier XeTherMed-Lampenmodulen aufgebaut. Dieser Aufbau entspricht den Anforderungen hinsichtlich der Integration in die von Firma Waldmann erarbeiteten Konzepte neuer XeTherMed-Therapiegeräte. Das Arbeitspaket endete mit erfolgreich abgeschlossenen Funktionstests.

Meilenstein 4, Demonstratorsystem aufgebaut, wurde erreicht.

#### Arbeitspaket 5 – Test

In Arbeitspaket 5 wurde das System umfangreichen Tests der optischen und elektrischen Parameter in unterschiedlichen Anwendungen unterzogen und anschließend die Komponenten und das Gesamtsystem optimiert. Schwerpunkte der Tätigkeiten der Firma Waldmann waren die Erarbeitung der Testkonzepte für unterschiedliche Anwendungsbedingungen, die Tests und Messungen der optischen und elektrischen Parameter, Langzeit-

tests sowie die Detaillierung der Konzepte für neue XeTherMed-Therapiegeräte. Schwerpunkte der Tätigkeiten der Firma Berger waren die Optimierung der optischen und elektrischen Parameter sowie der Schnittstellen zur Integration in Therapiegeräte.

Meilenstein 5, Demonstrator getestet und optimiert wurde erreicht

Aus technischer Sicht ist der Lösungsansatz bestätigt. Die erforderlichen Spektren können ohne Quecksilber realisiert werden. Der Aufbau eines Lampenmoduls ist im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen mit quecksilberhaltigen Entladungslampen kleiner. Die erforderlichen Bestrahlungsstärken können realisiert werden.

#### Kosten:

Die für den Kooperationspartner Berger GmbH & Co. KG geplanten Kosten wurden vollständig abgerechnet. Der Kooperationspartner Herbert Waldmann GmbH & Co. KG hat nur einen Teil der geplanten Projektkosten abgerechnet (61,5 %). Grund hierfür war, dass der für das Projekt ursprünglich vorgesehene Personalaufwand geringer war. Insgesamt wurde mit den bereitgestellten Mitteln sparsam umgegangen.

### **3.2. Ergebnisse und Diskussion**

Aus technischer Sicht ist der Lösungsansatz bestätigt.

Lampenprototypen auf Basis einer dielektrisch behinderten Entladung (DBE) können in verschiedener Formen und Größen reproduzierbar hergestellt werden. Für die Gasentladung wird das Edelgas Xenon verwendet, welches unter den richtigen Druckverhältnissen eine schmalbandige Entladung bei 172 nm besitzt (siehe Abbildung 11).

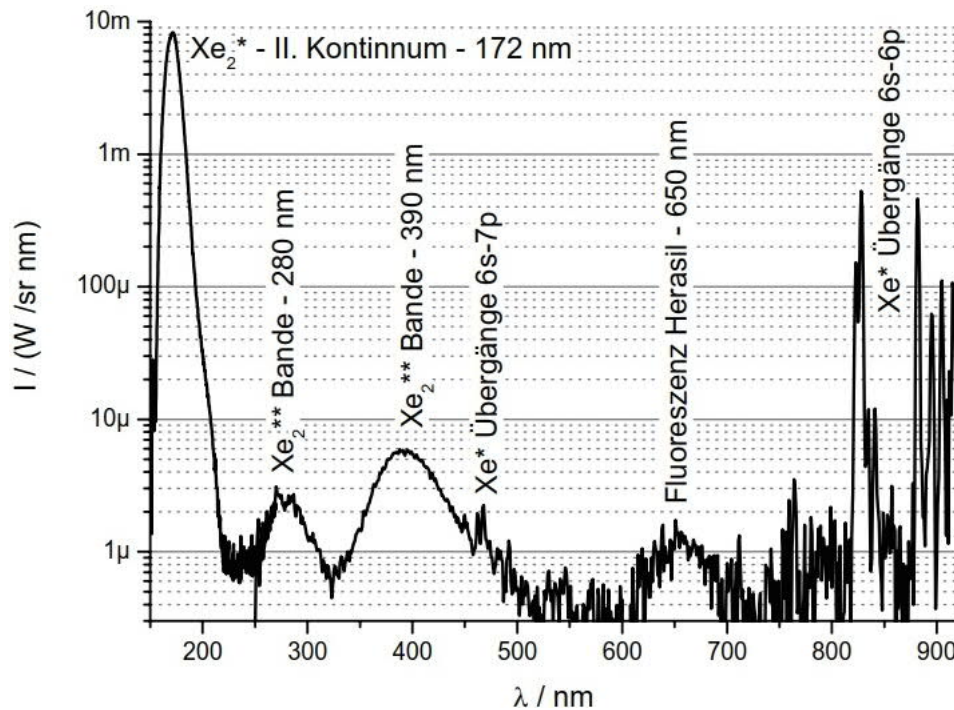


Abbildung 11: Gasentladung einer DBE-Lampe welche mit Xenon betrieben wird

Das für den Lampenbau verwendete Glaslot ist bleihaltig. Eine bleifreie Alternative konnte bis jetzt noch nicht gefunden werden, es findet allerdings ein reger Austausch mit der Firma Schott statt, die mit dem Thema des bleifreien Glaslots vertraut sind.

Die beiden vorgegebenen Lampenspektren konnten mit der neuen Lampentechnologie auf Basis einer dielektrisch behinderten Entladung umgesetzt werden.

- |        |                                  |  |
|--------|----------------------------------|--|
| • TL01 | Linienemitter bei 311 nm         | DBE mit $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$ |
| • PUVA | breitbandiger Emitter bei 350 nm | DBE mit $\text{BaSi}_2\text{O}_5:\text{Pb}^{2+}$         |

Der Lampenprototyp, welcher mit dem Leuchtstoff  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$  (UV-B) beschichtet wurde, zeigt eine sehr gute spektrale Übereinstimmung mit dem Lampenspektrum TL01 (siehe Abbildung 12).

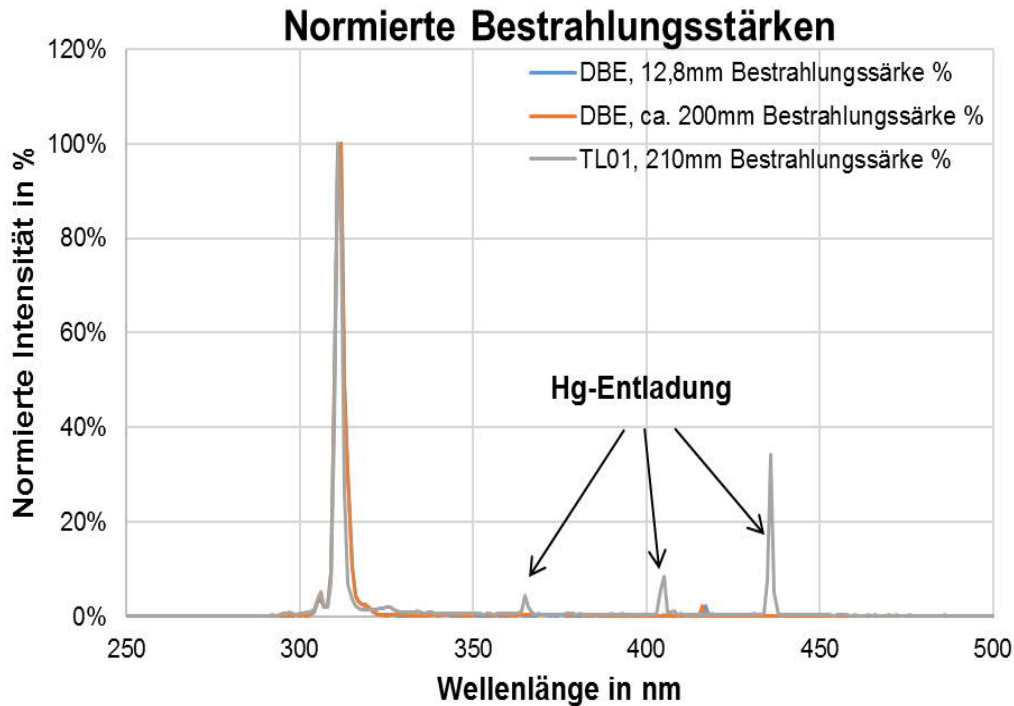


Abbildung 12: Normierte Bestrahlungsstärken des DBE-Lampendemonstrators mit dem Leuchtstoff  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$  im Vergleich zu der Lampe TL01

Auf dieser Basis wurde ein erster DBE-Lampendemonstrator mit einer effektiven Leuchtfläche von ca. 1450 cm<sup>2</sup> (40 x 36 cm) aufgebaut. Diese Abmessungen entsprechen den Größenverhältnissen von derzeitigen Bestrahlungsgeräten der Firma Waldmann.

Der Betrieb der DBE-Lampen erfolgt über ein Hochspannungsnetzteil und einen Hochfrequenzschalter. Die Hochfrequenz, welche auch zum Dimmen der Lampe eingesetzt wird, erreicht Werte zwischen 10 und 50 kHz.

Die ersten optischen Messungen des DBE-Lampendemonstrators wurden in den Messlaboren der Firma Waldmann durchgeführt (siehe Abbildung 13).

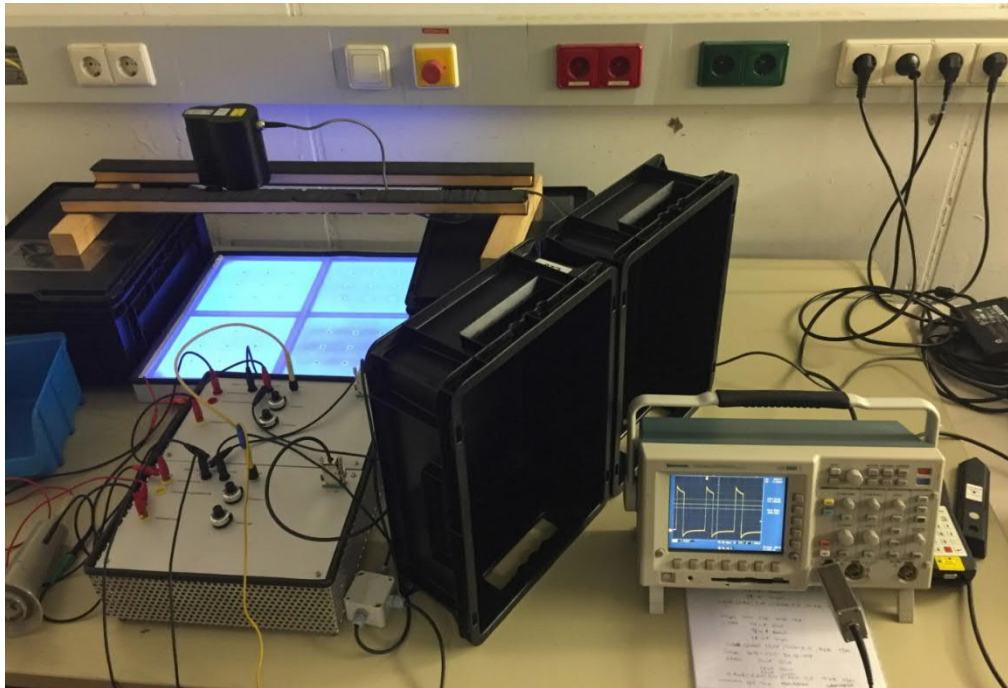


Abbildung 13: DBE-Lampendemonstrator während des Betriebs im Messlabor der Firma Waldmann

Die vollständige optische Charakterisierung ergab vielversprechende Werte. Die gemessenen UV-Intensitäten sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

<b>Pulslänge</b>	<b>μs</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>16</b>
<b>Frequenz</b>	<b>kHz</b>	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
<b>Betriebsspannung</b>	<b>kV</b>	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20
<b>Stom</b>	<b>mA</b>	20,1	29,4	38,7	47,7	56,6
<b>Leistung</b>	<b>W</b>	104,5	152,9	201,2	248,0	294,3
<b>UV-Intensität (Variocontrol, TL01)</b>	<b>mW/cm<sup>2</sup></b>	2,55	3,57	4,47	5,19	5,73
<b>UV-Leistung gesamt (330 cm<sup>2</sup> Lampenfläche)</b>	<b>mW</b>	841,5	1178,1	1475,1	1712,7	1890,9

Tabelle 1: Messwerte der optischen Charakterisierung des DBE-Lampendemonstrators

Die Messung erfolgte bei einer Spannung von 5,2 kV und einer Pulslänge von 16 μs. Die UV-Intensitäten wurden bei unterschiedlichen Frequenzen direkt an der Oberfläche des DBE-Lampendemonstrators gemessen (siehe Abbildung 14). Bei dem Messgerät handelte es sich um eine Eigenentwicklung der Firma Waldmann, welches direkt die UV-Bestrahlungsintensität der Lampe in mW/cm<sup>2</sup> misst.

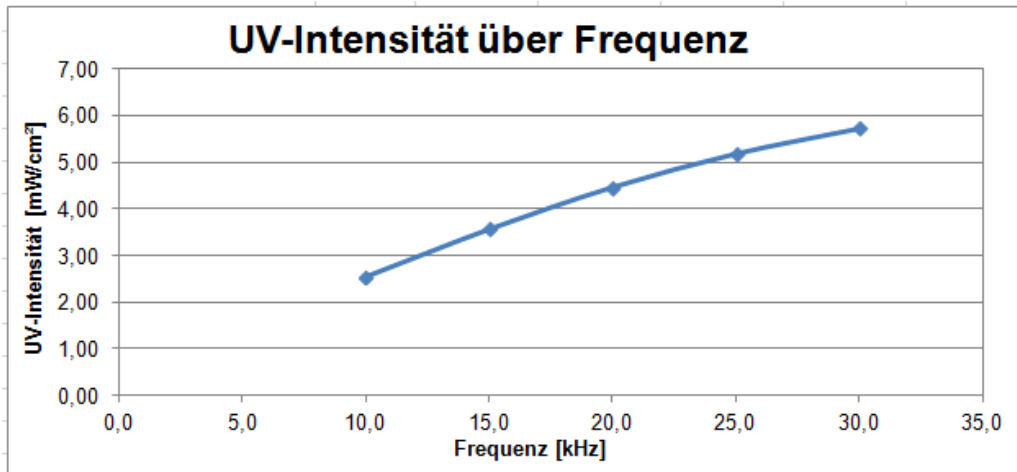


Abbildung 14: UV-Intensität des DBE-Lampendemonstrators in Abhängigkeit von der Frequenz

Die Hochfrequenz, welche auch zum Dimmen der Lampe eingesetzt wird, und die UV-Intensität sollten ein lineares Verhältnis zu einander bilden. Dies ist hier nicht der Fall. Es wird davon ausgegangen, dass das System Excimerbildung ↔ Entladungseffizienz ↔ Leuchtstoffabsorption ↔ Konversion noch nicht im optimalen Verhältnis zueinander stehen. Weitere Untersuchungen sind hier notwendig.

Die UV-Intensitätsverteilung über die Lampenfläche wurde ebenfalls gemessen (siehe Abbildung 15). Hier wurde allerdings nur eine einzelne DBE-Lampe betrachtet mit den Abmessungen 21 x 19 cm.

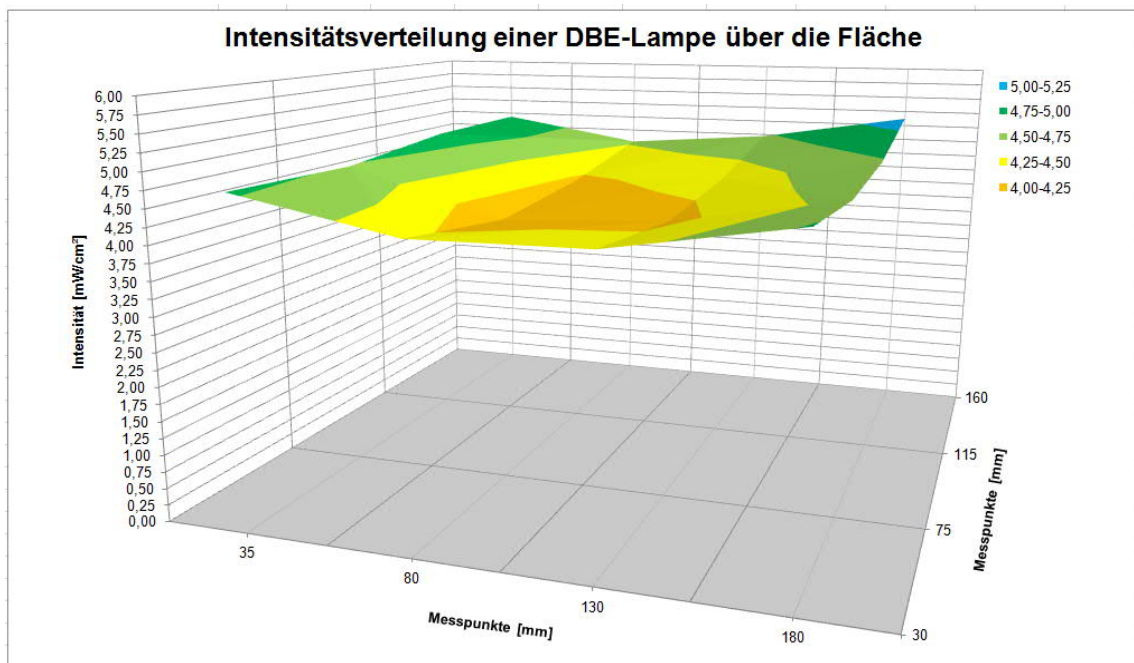


Abbildung 15: UV-Intensitätsverteilung über der Lampenfläche einer einzelnen DBE-Lampe



Die Messung erfolgte bei einer Spannung von 5,2 kV, einer Pulslänge von 16  $\mu$ s und einer Frequenz von 30,0 kHz. Die UV-Intensitäten wurden in einem eingeteilten Raster direkt an der Oberfläche der DBE-Lampe gemessen.

Der Langzeittest (2000 h) eines DBE-Lampenprototyps mit dem Leuchtstoff  $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Gd}^{3+}$  (UV-B) zeigt einen relativ starken Abfall der Intensität um ca. 30 % in den ersten knapp 100 h. Danach verläuft der Abfall schwächer, bis er sich nach 1000 h nicht mehr verändert und bei ca. 60 % Lampenintensität verbleibt (siehe Abbildung 16).

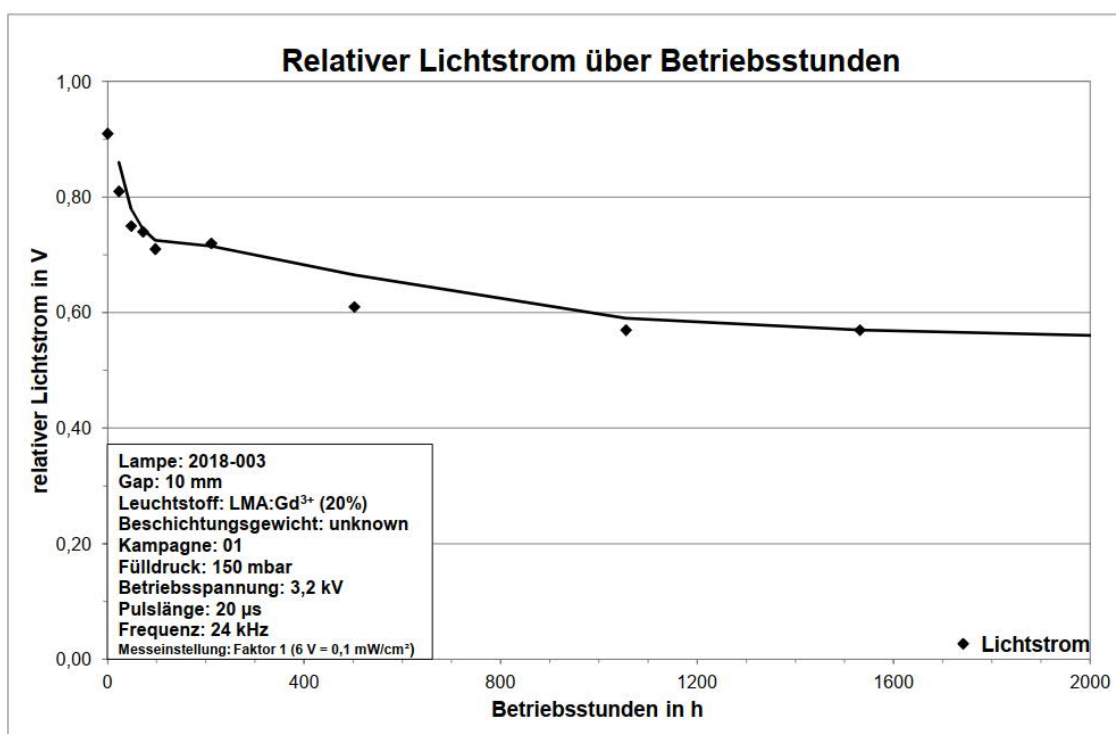


Abbildung 16: Relative Lampenintensität im UV-B Spektralbereich über die Betriebsstunden der DBE-Lampe

Zur Verifizierung der Werte wurde die Transmission einer unbeschichteten DBE-Lampe über einen Zeitraum von knapp 1000 h untersucht (siehe Abbildung 7). Die Ergebnisse zeigen, dass das Borofloat®33 stark solarisiert. Auch hier ist der Abfall in den ersten knapp 100 h um ca. 30 % am stärksten ausgeprägt.

Die Transmissionsverminderung entsteht durch die hochenergetische Xenon-Entladung bei 172 nm. Der Verlauf erinnert sehr stark an den Verlauf der relativen Lampenintensität über die Betriebsstunden der DBE-Lampe. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Abnahme der Lampenintensität durch die Solarisation und damit durch eine Verminderung der Transmission hervorgerufen wird.

Die Firma SCHOTT hat in diesem Zusammenhang das Borofloat®33 HT empfohlen, welches eine verbesserte Transmission im UV Spektralbereich und eine geringere Solarisation aufweist (siehe Abbildung 17). Erste Versuche mit diesem Glas wurden gestartet.

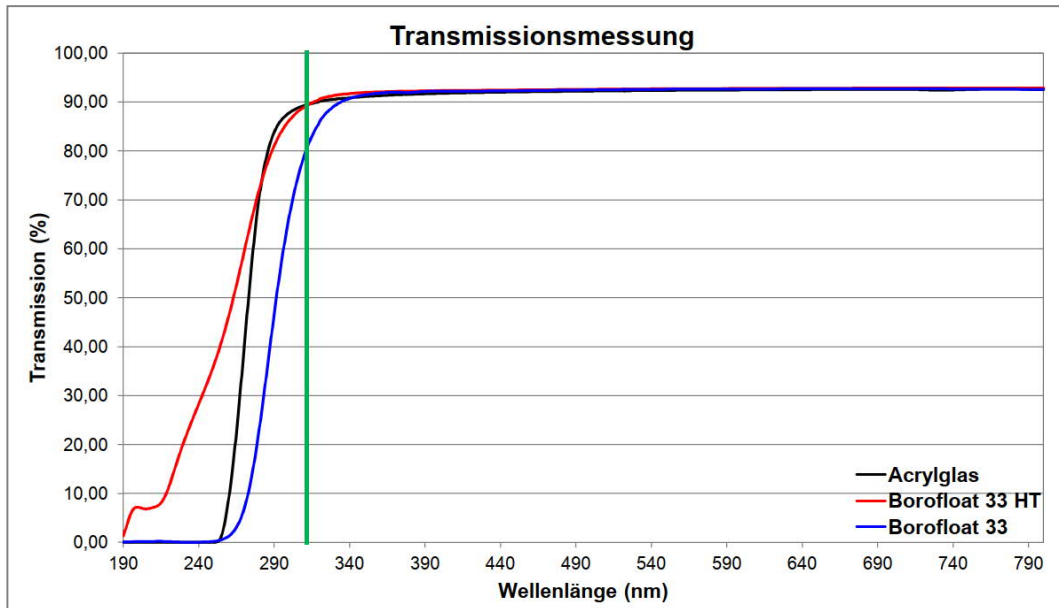


Abbildung 17: Transmissionsmessung von Borofloat®33 im Vergleich zu Borofloat®33 HT und einem UV transparentem Acrylglas

Eine weitere Alternative, um das Glas vor Solarisation zu schützen, sind Schutzschichten aus Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Diese Schutzschichten reflektieren (oder absorbieren) die Entladungswellenlängen der Xenon-Entladung bei 172 nm, wodurch die Solarisation im Glas verhindert wird.

Da die Schutzschichten auch die Emissionswellenlängen des Leuchtstoffs reflektieren würden, dürfen die Schichten nur eine Dicke von wenigen  $\mu\text{m}$  aufweisen.

Die Idee ist hier mit nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  im Sprühlackier-Verfahren dünnen Schichten auf die Glasoberflächen aufzutragen.

Auf der rückwärtigen Lampenfläche soll nach Möglichkeit keine Strahlung ausgekoppelt werden. Dazu wird auf der Innenseite der Lampe eine dicke Schicht aus  $\mu\text{m}$ -skaligen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aufgetragen, um den gesamten Anteil der Entladungswellenlänge (172 nm) und der Emissionswellenlänge des Leuchtstoffs zu reflektieren (siehe Abbildung 18).

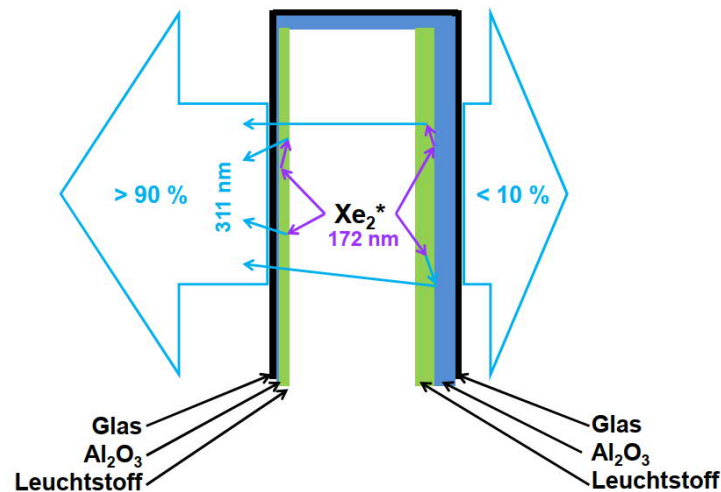


Abbildung 18: Aufbau der Schichten aus Schutzschicht und Leuchtstoffschicht in einer DBE-Lampe

In bisherigen technischen Lösungen für UV-Systeme ist immer eine klare technische Abgrenzung zwischen der eigentlichen Strahlungsquelle, Strahlenkungseinrichtungen, Schutzeinrichtungen und dem Gesamtsystem gegeben. Mit dem neuen Lösungsansatz konnte eine Funktionsintegration realisiert werden die zu weiteren Einsparungen führt.

Die Fertigungskosten für das neue System liegen auf dem Niveau bisheriger Systeme. Zusätzliche Kosten für Lampenwechsel entfallen. Für die Unternehmen kann mit der Entwicklung der Lösung eine technologische Marktführerschaft in Europa erreicht werden.

Nach Projektabschluss erfolgt die Entwicklung eines Prototyps für ein vollständiges UV-Therapiegerät aus modularen DBE-Kacheln. Die Firma Berger wird hierbei die Weiterentwicklung der DBE-Kacheln durchführen. Die Firma Waldmann wird neue Lösungen für UV-Therapiegeräte mit DBE-Kacheln erarbeiten um auch die indirekten Einsparpotenziale (kein Aluminium, flacheres Gehäuse, keine Kühlung, kein Lampenwechsel) erschließen zu können.

Der Modellcharakter der neuen Lösung ist dadurch gegeben, dass neben Anwendungen in der Phototherapie ein weiteres Marktpotenzial für neue Anwendungsfelder im Bereich Medizin (bessere Darstellung des gesamten Sonnenspektrums, Entkeimung von Oberflächen, photochemische Prozesse, usw.) besteht. Insbesondere unter dem Hintergrund eines zunehmenden internationalen Wettbewerbes ist dies ein wesentlicher wirtschaftlicher Faktor.

### 3.3. Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse, zusätzliche Umweltentlastung

#### Umweltentlastung

Eine unmittelbare direkte Umweltentlastung ergibt sich aus der Einsparung von Quecksilber und Glas bei über 16facher Lebensdauer (Tabelle 2).

	PUVA Lampen 100 W <sub>el</sub>	DBE Lampe 100 W <sub>el</sub>	Einsparung
Quecksilber, mg je Lampe	10	0	100 %
Glas, g je Lampe	400	400	0 %
Energieverbrauch, W	100	100	0 %
Lebensdauer, Stunden	600	10.000	1667 %
Quecksilber, mg je Lampe über die Lebensdauer DBE	167	0	100 %
Glas, kg je Lampe über die Lebensdauer DBE	6,6	0,4	94 %

Tabelle 2: Direkte Umweltentlastung

Auf eine angenommene Stückzahl von 10.000 UV-Lampen für Phototherapiegeräte pro Jahr ergeben sich folgende Einsparungen:

	PUVA Lampen 100 W <sub>el</sub>	DBE Lampe 100 W <sub>el</sub>	Einsparung	
Quecksilber bei 10.000 Lampen/ Jahr	0,1 kg	0 kg	100 %	
KRA	39,8 t/t	3,98 kg	0	100 %
KEA	1609 GJ/t	161 GJ	0	100 %
GWP	115 t CO <sub>2</sub> /t	11,5 kg	0	100 %

Tabelle 3: Einsparungen pro Jahr

Bezogen auf die 16fache Lebensdauer ergeben sich folgende Einsparungen:

	PUVA Lampen 100 W <sub>el</sub>	DBE Lampe 100 W <sub>el</sub>	Einsparung	
Quecksilber	1,67 kg	0	1,67 kg	
KRA	39,8 t/t	64,5 kg	0	64,5 kg
KEA	1609 GJ/t	2.687 GJ	0	2.687 GJ
GWP	115 t CO <sub>2</sub> /t	192 kg CO <sub>2</sub>	0	192 kg CO <sub>2</sub>
Glas	66 t	4 t	62 t	
KRA	1,64 t/t	108 t	6,56 t	101 t
KEA	12,6 GJ/t	832 GJ	50,4 GJ	781 GJ
GWP	0,60 t CO <sub>2</sub> /t	39,6 t CO <sub>2</sub>	2,4 t CO <sub>2</sub>	37 t CO <sub>2</sub>

Tabelle 4: Einsparungen bezogen auf die Lebensdauer

Weltweit werden jährlich ca. 5 Mio. quecksilberhaltige UV-Lampen hergestellt, ca. 2 Mio. davon in Deutschland. Die DBE-Technologie könnte zu einem großen Teil auch für andere UV-Anwendungen genutzt werden. Damit könnten in Deutschland jährlich bis zu 20 kg Quecksilber eingespart werden.

Weiterhin ergeben sich durch den einfacheren Systemaufbau zusätzliche Einsparungen da keine Aluminiumreflektoren für eine gleichmäßige Lichtabstrahlung und keine Kühleinrichtungen notwendig sind und der geringere Bauraum auch zu Einsparungen bei Material für Gehäuse führt.

Mit der im Projekt entwickelten neuen Lösung wurde ein quecksilberfreies System für Anwendungen geschaffen bei denen bisher aus physikalischen Gründen der Einsatz von Quecksilber notwendig ist. Mit einer höheren Lebensdauer des lichtemittierenden Systems werden zusätzliche Material- und Ressourceneinsparungen möglich.

Der photonische Systemaufbau eines Phototherapiegerätes wird durch einen einfacheren Aufbau ersetzt:

Alt:	KVG → Hg-Entladung → Leuchtstoff → Reflektor → Oberfläche
Neu:	EVG → Xe-Entladung → Leuchtstoff → Oberfläche

Es wurden die folgenden technischen Zielstellungen vollständig erreicht;

- UV-A und UV-B Spektren entsprechend bisheriger bewährter und zugelassener Therapien
- Kein Quecksilber
- Sehr hohe Gleichmäßigkeit ohne zusätzliche optische Systeme
- Selektive Bestrahlung möglich
- Keine Einbrennzeit
- Lebensdauer 10.000 Stunden
- Modularer Aufbau in Kachelform

Folgende Zielstellung wurden nur zum Teil erreicht:

- Strahlungsleistung im Abstand von 20 cm: UV-A 20 mW/cm<sup>2</sup>, UV-B 15 mW/cm<sup>2</sup>, Effizienz des Gesamtsystems > 20 %

### 3.4. Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Berger GmbH & Co. KG arbeitete mit der Fachhochschule Münster im Rahmen einer Bachelorthesis „Anwendung des Leuchtstoffes LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub>:Gd<sup>3+</sup> (20%) in Xenon Excimerentladungslampen“ (Merve Aylin Yilmaz, 2018) zusammen. Die Projektergebnisse werden beide Kooperationspartner in Form von Präsentationen öffentlich vorstellen.

## 4. Fazit

Aus technischer Sicht ist der Lösungsansatz bestätigt. Die erforderlichen Spektren können ohne Quecksilber realisiert werden. Der Aufbau eines Lampenmoduls ist im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen mit quecksilberhaltigen Entladungslampen kleiner. Die erforderlichen Bestrahlungsstärken können realisiert werden.

Es sind weitergehende Forschungstätigkeiten zur Leistungs- und Effizienzsteigerung der DBE-Lampenmodule erforderlich. Lösungsansätze bestehen in der Verbesserung der Transmissionseigenschaften des Glases, der Anpassung der Betriebsparameter und dem Thermomanagement. Zur Erweiterung des Anwendungsbereiches auf großflächige Be-

strahlungsgeräte müssen neue Aufbaukonzepte entwickelt werden. Zudem müssen industrietaugliche Fertigungsprozesse für DBE-Lampen erarbeitet werden.

Konkrete Forschungs- und Entwicklungsansätze für eine zweite Projektphase sind:

- Intensitäts- und Effizienzsteigerung der DBE-Lampenmodule durch weitere Verbesserung der Transmissionseigenschaften des Glases, sowie der Anpassung der Betriebsparameter und des Thermomanagements für die DBE-Lampen
- Miniaturisierung bzw. Optimierung des Vorschaltgeräts/Schalters sowie der Hochspannungsquelle
- Integration der DBE-Lampenmodule in großflächige Bestrahlungsgeräte der Firma Waldmann
- Industrialisierung des Fertigungsprozesses für DBE-Lampen
- Ergänzung des Lampenspektrums TL01 um einen sichtbaren Leuchtstoff, um dem Anwender den Betrieb der Lampe direkt anzuzeigen. Verschiedene Farben sind für diese Anwendung denkbar (siehe Abbildung 19). Durch ein Siebdruckverfahren können so auch Muster, Formen oder Symbole angezeigt werden.

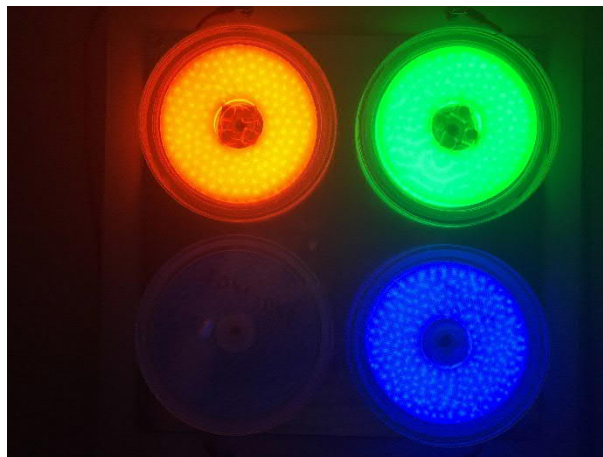


Abbildung 19: Mögliche Lichtfarben zum Signalisierung des Betriebes der Lampe

## 1. Literaturverzeichnis

- [1] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:de:PDF>
- [2] [http://rohs.exemptions.oeko.info/fileadmin/user\\_upload/RoHS\\_Pack\\_9/RoHSPack\\_9\\_Part\\_LAMPS\\_06-2016.pdf](http://rohs.exemptions.oeko.info/fileadmin/user_upload/RoHS_Pack_9/RoHSPack_9_Part_LAMPS_06-2016.pdf)
- [3] 20160920\_LightingEurope Report on the Mercury Exemptions
- [4] 20150225\_Requests to renew exemptions under the RoHS Directive
- [5] <http://www.bmub.bund.de/themen/gesundheit-chemikalien/chemikaliensicherheit/quecksilberkonvention/#c24632>
- [6] <https://www.bmu.de/themen/gesundheit-chemikalien/chemikaliensicherheit/quecksilberkonvention/#c34109>

## 2. Anhänge

Keine