

**j**  
**Sachbericht zum Verwendungsnachweis**

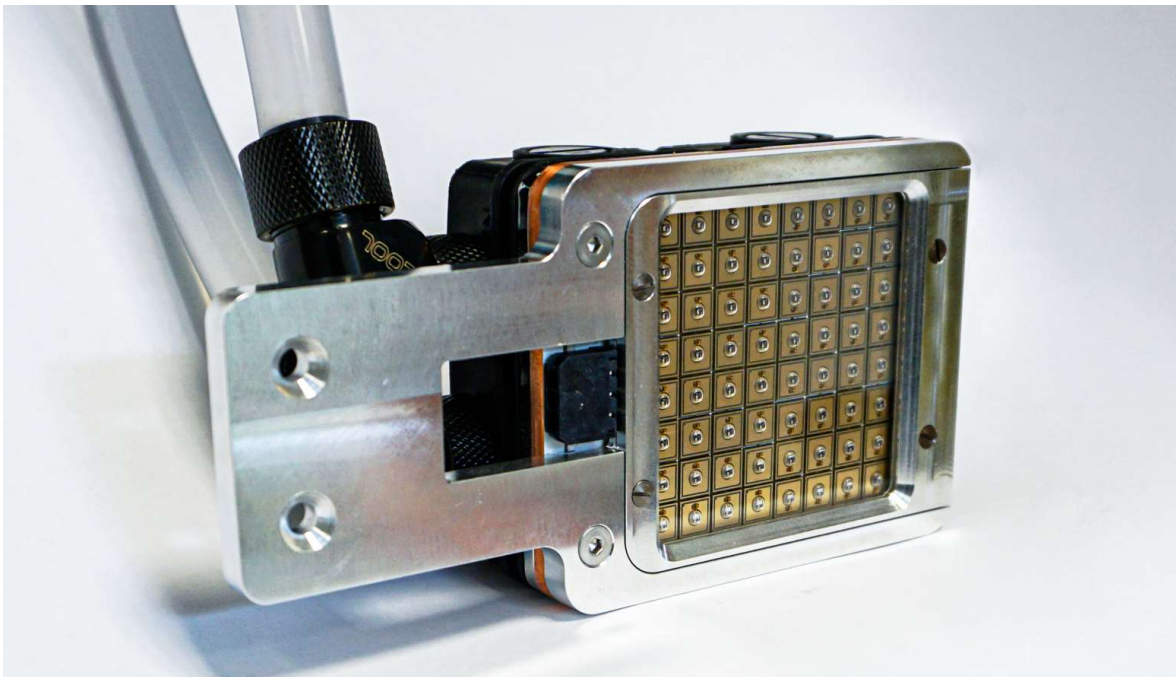
**Verbundprojekt:** CORONA – 3Dsensation – 3DecontaminAid

**Teilprojekt:** TP6: Lichtquellen-Entwicklung

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	03COV09 F
Projektlaufzeit:	01.12.2020 bis 30.11.2023

**Berichtspflichtiger:** Leistungselektronik JENA GmbH (LEJ)

**Projektleitung:** Dr. Jörg Wagner  
Leistungselektronik JENA GmbH  
Stockholmer Str. 5 07747 Jena  
j.wagner@lej.de  
+ 49 3641 3530 14



## Teil I: Kurzbericht

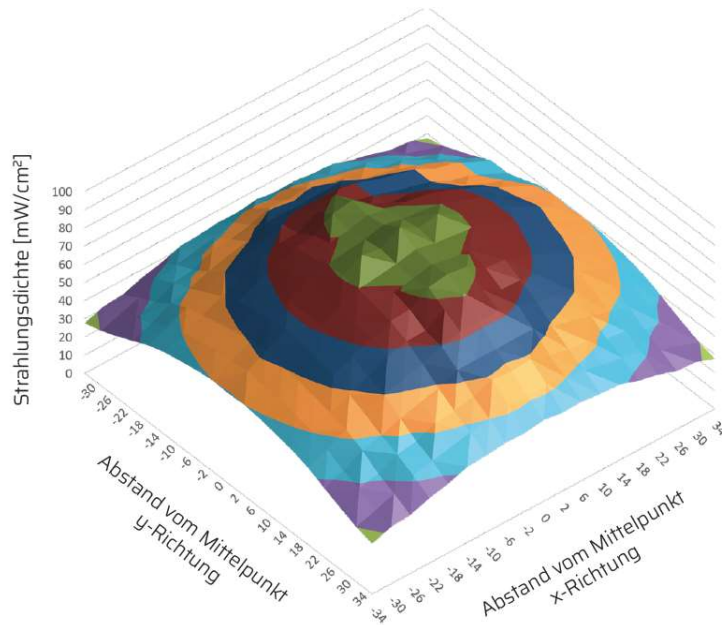
Die Aufgabenstellung der Leistungselektronik JENA GmbH (LEJ) war die Entwicklung einer kompakten Lichtquelle zur effizienten Dekontamination von Oberflächen, welche an einer autonomen mobilen Roboterplattform befestigt ist. Um einen Akkubetrieb der mobilen Roboterplattform zu gewährleisten, sollte die Versorgungsspannung der Lichtquelle für die Dekontamination zwischen 20 und 28 V liegen. Die geplanten Wellenlängen der Lichtquelle lagen zwischen 185 und 550 nm. Die absolute Leistungsaufnahme bestimmt sich durch die Anzahl der Leuchtmittel und somit den Dekontaminationserfolg der jeweiligen Lichtquelle. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Lichtquelle an einem Roboterarm befindet, werden auch der Formfaktor und die Baugröße im Rahmen des Projekts definiert. Von Seiten der LEJ wurde eine maximale Baugröße der Lichtquelle von 25 cm x 20 cm x 10 cm (Höhe x Breite x Tiefe) anvisiert. Es wurden verschiedene Typen von Leuchtmitteln hinsichtlich der Wirkeffizienz betrachtet und bewertet. Dabei erwies sich die Verwendung von UV-LEDs aus verschiedenen Gründen als geeignet im Vergleich zu klassischen UV-Röhrenstrahlern. Die zu verwendenden Wellenlängenbereiche und Intensitäten, in welchen die höchste Dekontaminationseffizienz erreicht wird, wurde innerhalb des Vorhabens zusammen mit den Projektpartnern ermittelt. Hierbei wurde die Entwicklung einer möglichst effizienten Lichtquelle angestrebt, welche zu einer schnellen Dekontamination der Oberfläche führt. Im Ergebnis der Analyse der Literatur und Interviews der Projektpartner ergaben sich die Anforderungen an die Lichtquelle (LEJ-AP2: Analysephase):

- Abstrahlung zw. 260 und 280 nm
- Maximale mögliche Strahlungsintensität
- Bestenfalls Bauraum maximal ca. 40 x 100 x 200 mm<sup>3</sup>
- Masse bis 1500 g
- Beleuchtete Fläche ca. 200 – 1000 cm<sup>2</sup>
- Mittlerer Abstand zur Fläche möglichst klein, zw. 30 und 200 mm
- Stromversorgung max. 30 A bei 20-28V

Ein Vergleich der verfügbaren Lichtquellentechnologien im relevanten Wellenlängenbereich zwischen 260 und 280 nm zeigte, dass UVC-LEDs für die geplante Anwendung am Roboterarm am besten geeignet sind. Nach einer Marktrecherche und einer Übersicht über die verfügbaren UVC-LEDs wurde die effizienteste zum Zeitpunkt verfügbare UVC-LED namens "BOLB 6060 UV-C" erworben, untersucht und vermessen. Die Messergebnisse wurden mit der Simulation zur Strahlformung und Energieverteilung verglichen (LEJ-AP3: Leuchtmittelauswahl). Dadurch konnte der Meilenstein 1 2021, wie geplant erreicht werden, und das AP4 wurde gestartet. Basierend auf der oben genannten LED und den Ergebnissen aus LEJ-AP3 wurde eine Lichtquelle konzipiert, konstruiert und gebaut (LEJ-AP4).

Nachdem wir also Ende 2021 die LEJ-AP4 und LEJ-AP5 wie geplant abschließen konnten, wurde die Lichtquelle nach einer internen Erprobung im November 2021 an den Projektpartner HKI Jena für Bestrahlungsuntersuchungen übergeben. Dies ermöglichte die fristgemäße Erreichung des Meilensteins 2 im ersten Quartal 2022.

Die Erkenntnisse aus der Erprobung beim HKI bestätigen die Auswahl der LEDs des Herstellers Bolb, die auch im Demonstrator Verwendung finden sollten. Um die Strahlungsleistung zu erhöhen, entschieden sich die Projektpartner für einen optimierten Aufbau der Lichtquelle mit 64 LEDs anstelle von 12 und einer Wasserkühlung. Die so optimierte Lichtquelle wurde im LEJ-AP8 konstruiert und gebaut. Anschließend wurde die Lichtquelle physikalisch und optisch charakterisiert, mit folgenden Ergebnissen zur Strahlungsdichteverteilung:



Nach der Charakterisierung wurde die optimierte Lichtquelle dem Projektpartner HKI Jena für eine zweite Serie von Bestrahlungsversuchen übergeben. Ein zweites, parallel aufgebautes Exemplar der optimierten Lichtquelle wurde gemeinsam mit den Projektpartnern Metralabs und IOF Jena erfolgreich am Demonstrator integriert und in ersten Tests beim Projektpartner UKJ eingesetzt.

## Teil II: Ausführlicher Sachbericht

### 1. AP2: Analysephase

#### 1.1 Lastensammlung für die Lichtquelle

Im Kickoff-Meeting mit den Projektpartnern wurden in einem ersten Schritt die folgenden Anforderungen an die Lichtquelle erarbeitet:

- maximaler Strahlungsintensität (notwendige Dosis in kurzer Zeit)
- Bauraum ca. 40 x 100 x 200 mm<sup>3</sup>
- Masse 500 – 1500 g
- Beleuchtete Fläche ca. 200 – 1000 cm<sup>2</sup>
- Mittlerer Abstand zur Fläche möglichst klein, zw. 30 und 200 mm
- Stromversorgung max. 30 A bei 20-28V
- Schnittstelle z.B. RS232, USB oder Ethernet möglich

Diese Eingangsgrößen dienen im weiteren Verlauf des Projektes dann als Rahmen für die Erarbeitung des Konzeptes der UVC-Lichtquelle.

#### 1.2 Grundlagen und Literaturrecherche

Der Hintergrund für die Verwendung von UV-C Strahlung für die Dekontamination ist die Absorption von DNA bzw. von Stoffen aus denen Bakterien oder Viren zusammengesetzt sind.

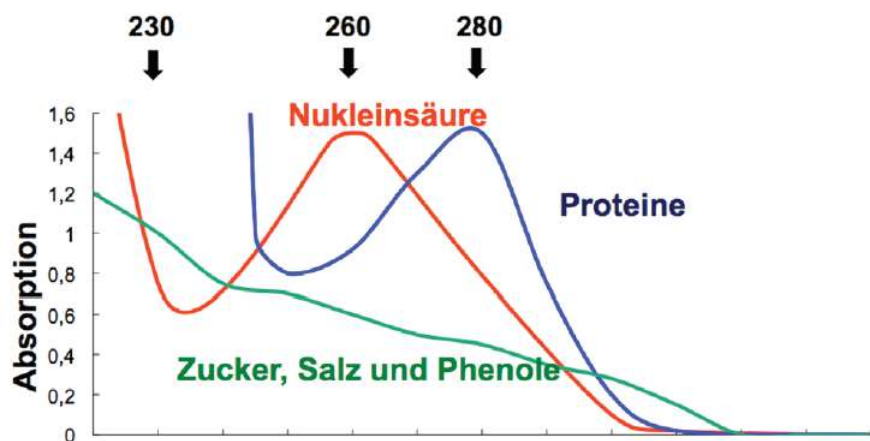


Abbildung 1: Absorptionsspektren der Bestandteile von Bakterien und Viren

Abbildung 1 zeigt die Absorptionsspektren einiger wichtiger Stoffe, welche Bestandteile von Bakterien und Viren sind. Daraus ergeben sich zwei Absorptionsbanden bei 260 nm und bei 280 nm.

Daher sollte das Spektrum der Emissionsstrahlung der Lichtquelle den o.g. Wellenlängenbereich überdecken. Das Ergebnis einer ersten Literaturrecherche zeigt, dass zum Eliminieren von SARS-CoV-2 eine Fluenz von  $1.048 \text{ [J/cm}^2\text{]} = 10\,480 \text{ [J/m}^2\text{]}$  und für H1N1-Influenza  $10\,000 \text{ [J/m}^2\text{]}$  benötigt wird. Daraus folgt eine notwendige Intensität von ca.  $1 \text{ W/cm}^2$  bei einer Bestrahlungszeit von 1 s.

Weitere Werte aus der Literatur sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die angegebenen Werte sind stark davon abhängig in welchem Wellenlängenbereich, mit welchen Organismen und auf welchen Substraten gearbeitet wurde und die Tabelle kann daher nur einen groben Überblick geben und diene uns zur Orientierung bzgl. der notwendigen Dosisleistung bei den weiteren Arbeiten.

**Tabelle 1:** Literaturwerte zur Oberflächendesinfektion mit UVC.

Anwendung/S substrat	Methode	Dosis	MO + Ausgangskonzentra tion	Reduktion	Quelle
Biofilme auf Polycarbonat (PC)	Nach Bestrahlung Abstrich, resuspendiert u. ausplattieren	81 J/m <sup>2</sup>	<i>P. aeruginosa</i> (10 <sup>8-5</sup> CFU/cm <sup>2</sup> )	2 log	<a href="https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.021">https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.021</a>
Edelstahlcarrrier Kunststoffcarrrier (PP)	Auf Träger getrocknet und nach Bestrahlung abgewaschen	18500 J/m <sup>2</sup> 12500 J/m <sup>2</sup>	<i>E. coli</i> u.a. (10 <sup>8</sup> -10 <sup>9</sup> CFU/coupon)	2 log	doi: 10.1111/j.1750-3841.2011.02476.x
Biofilme auf Blasenkatheter	Katheter bestrahl, Biofilm abgekratzt dann ausplattiert	15000 J/m <sup>2</sup>	MO gefunden auf dem Blasenkatheter	2 log	<a href="https://doi.org/10.1080/08927010802716623">https://doi.org/10.1080/08927010802716623</a>
Oberfläche Krankenhauszimmer	MO auf Fläche getrocknet , nach Bestrahlung Abklatsch der Fläche	120 J/m <sup>2</sup> , 360 J/m <sup>2</sup> (Sporen)	<i>C. difficile</i> spores, MRSA, VRE, <i>A. baumannii</i> (10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup> CFU/Fläche (Rodac))	99,9 % 3 log	DOI: 10.1086/656244
Stethoskop-Membran	Abklatsch der Membranen	2,4 mW 5 min	<i>E. coli</i> u.a. (10 <sup>4</sup> CFU)	2 log	doi:10.3390/ijerph13100940

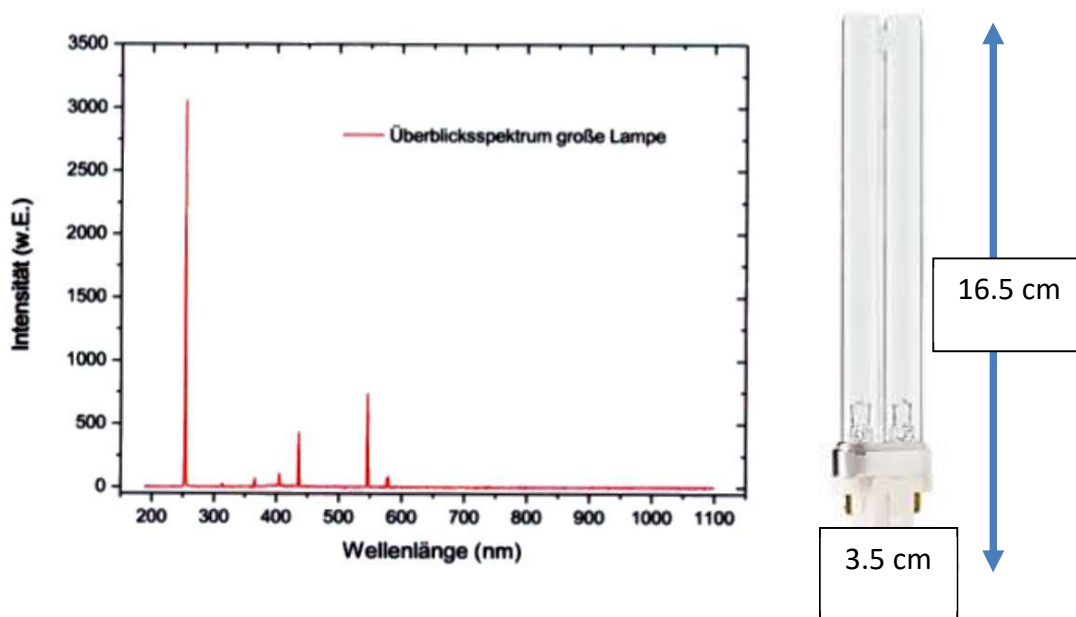
Um die bestmögliche Leuchtmittelauswahl zu treffen, wurden verschiedene Leuchtmittel getestet und evaluiert. Zur Evaluation der Quellen sind die Emissionsspektren, die emittierte Leistung, die Quellengröße bzw. -form und die Abstrahlcharakteristik (Winkelverteilung) wichtige Größen. Dazu wird auch oft die Dosis [J/m<sup>2</sup>] in Intensität [mW/cm<sup>2</sup>] mal die Bestrahlungszeit [s] übersetzt. Die Umrechnung erfolgt durch folgende Formel.

$$Dosis \left[ \frac{J}{m^2} \right] = Intensität \left[ \frac{mW}{cm^2} \right] \times Bestrahlungsdauer [s] \div 10.$$

## 2. AP3: Leuchtmittelauswahl

### 2.1 UVC-Strahler

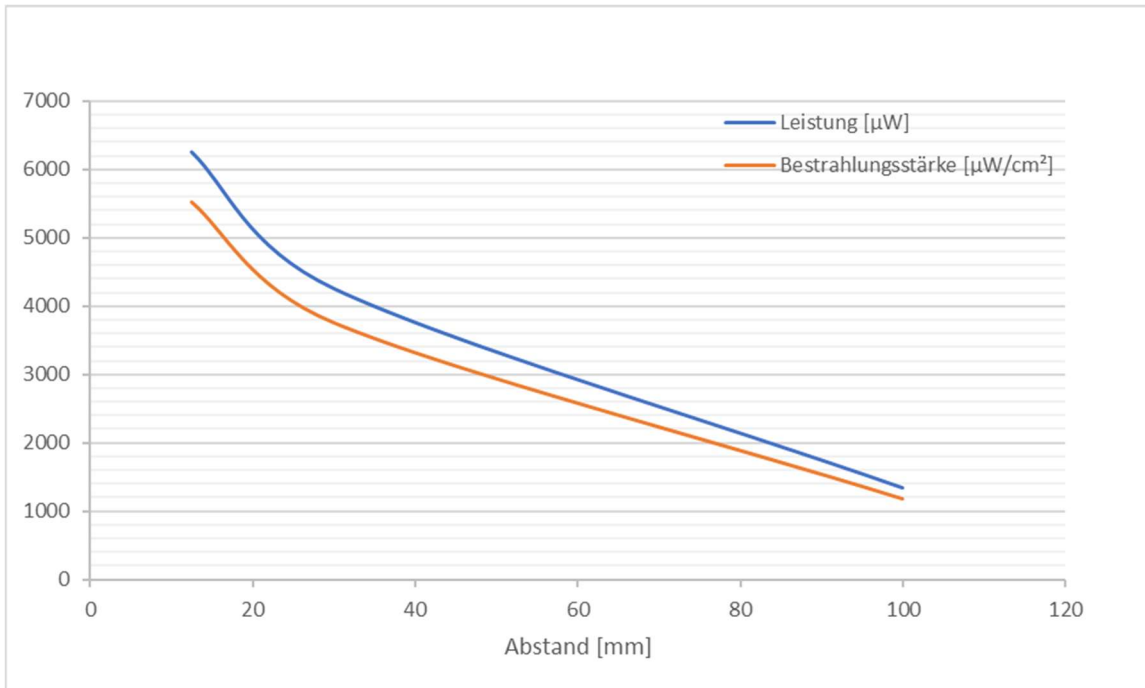
Die erste getestete Strahlungsquelle war ein UV-Hg-Niederdruckstrahler, genauer vom Typ TUV PLS 9 W von Phillips mit dazu passendem Vorschaltgerät. Das Spektrum des Strahlers ist in Abbildung 2 gezeigt:



**Abbildung 2:** Emissionsspektrum des getesteten UV-Hg-Niederdruckstrahlers TUV PL-S 9W links und Abbildung der Quelle mit Maßen rechts.

Der Hauptemissionspeak liegt bei 254 nm und besitzt eine Halbwertsbreite (HWB engl. FWHM) von 2 nm. Bei dieser Wellenlänge werden entsprechend Abbildung 1 ungefähr 85% der Strahlung durch DNA absorbiert. Die Maße des Strahlers sind ebenfalls in Abbildung 2 gezeigt und sind mit 16,5 cm x 3,5 cm alleine in der Fläche schon beachtlich. Die Dicke beträgt ungefähr 1 cm.

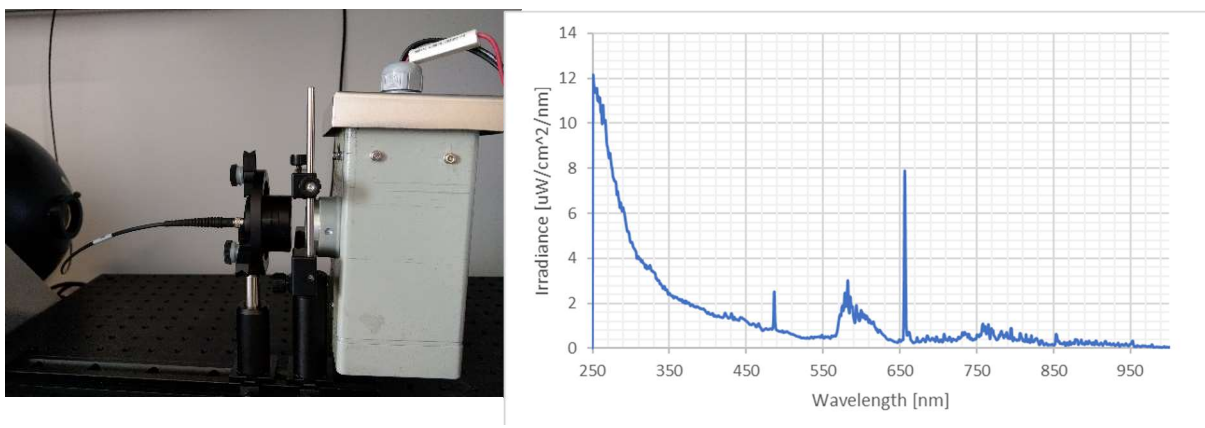
Die von der Quelle emittierte Strahlungsleistung und Strahlungsintensität in Abhängigkeit vom Abstand zur Quelle, ohne Reflektor und im kleinen Raumwinkel ist in Abbildung 3 aufgetragen. Der Abfall der Kurve entspricht dabei in guter Näherung dem quadratischen Abstandsgesetz. Bei einem Abstand von 100 mm (10 cm) ergibt sich eine Strahlungsintensität von rund 1,2 mW/cm<sup>2</sup>. Für die beachtliche Größe der Strahlungsquelle ist dies ein sehr geringer Wert bei einem so kurzen Abstand. Ein Reflektor würde natürlich bei der Lichtausbeute helfen, jedoch würden die Abmaße des Reflektors allein die Abmaße der Quelle übersteigen und erreichbare Strahlungsintensität wäre immer noch relativ gering.



**Abbildung 3:** Strahlungsleistung und Strahlungsintensität des UV-Hg-Niederdruckstrahlers TUV PL-S 9W in Abhängigkeit vom Abstand.

## 2.2 Deuteriumquelle

Die zweite getestete Quelle war eine 30 W Deuteriumlampe, welche in Abbildung 4 links gezeigt ist:



**Abbildung 4:** Messaufbau zur Leistungsmessung der Deuteriumlichtquelle links.

Spektrale Strahlungsintensitätsverteilung der Deuteriumlichtquelle rechts.

Sie wurde in ihrer spektralen Intensitätsverteilung mit 12.5 mm Abstand, also möglichst nah zur später zu dekontaminierenden Oberfläche vermessen. Die sich ergebene Verteilung ist ebenfalls in Abbildung 4 gezeigt. Über das gesamte Spektrum ergibt sich eine Gesamtintensität von 1.06 [mW/cm<sup>2</sup>]. Spektral gesehen ist die Quelle mit den Werten sehr gut geeignet zur Dekontamination, jedoch ist der Leistungswert bei so einem geringen Abstand viel zu niedrig. Der Wert entspricht ungefähr dem Leistungswert bei 100 mm Abstand für den UV-Hg-Niederdruckstrahler. Des Weiteren benötigt die Deuteriumlampe eine nicht zu vernachlässigende Vorheizungsleistung.

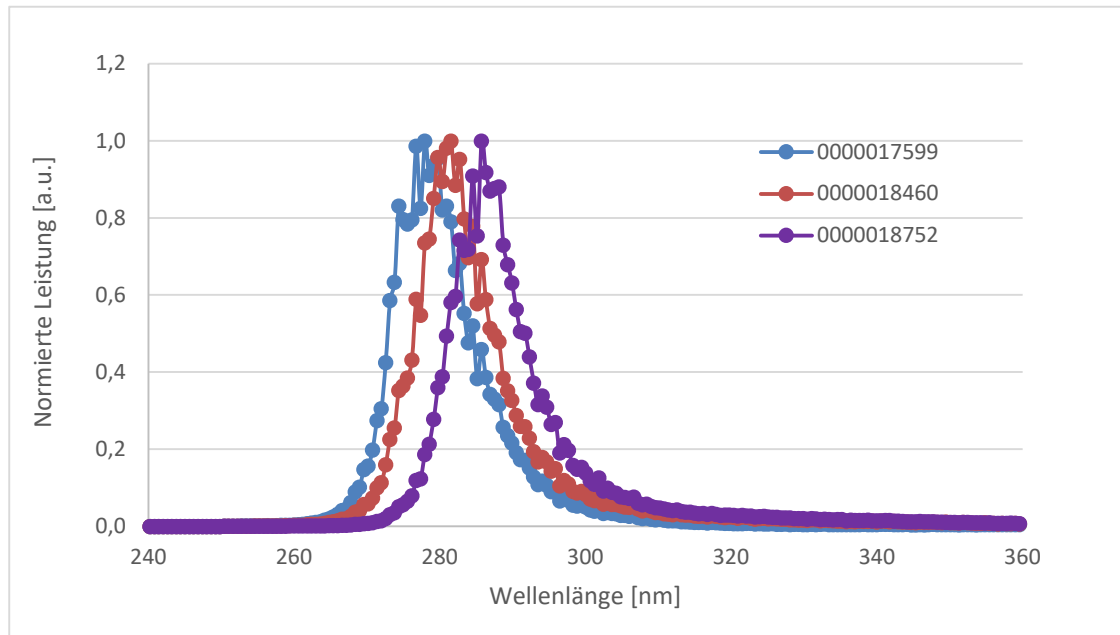
## 2.3 UVC-LEDs

Die zuletzt getesteten Strahlquellen waren UVC-LEDs. Diese waren bereits vor dem fertigen Vergleich der Ergebnisse, die zu favorisierende Strahlquellenform. Dies war der Fall allein aufgrund der Abmaße der LEDs im Vergleich zu den anderen Strahlern und deren Abstrahlcharakteristik (Winkelverteilung), auch wenn die optischen Effizienzen der UVC-LEDs mit wenigen Prozent (ungefähr 3 %) gering ausfällt. Eine LED ist typischerweise ein Lambert-Strahler und strahlt in den halben Raumwinkel ab. Hingegen strahlen die anderen Quellen in den vollen Raumwinkel ab. Dies verringert signifikant den Aufwand für das Kollektordesign und die sich ergebende Lichtquelle wird kompakter.

Es wurden drei verschiedene kommerziell erhältliche UVC-LEDs vermessen, deren Beschaffung die größte Materialposition im Projekt darstellte. Diese werden im Folgenden mit der internen Artikelnummer der LEJ (Leistungselektronik JENA GmbH) bezeichnet. Alle drei LED-Typen wurden wiederum in Kombination mit drei verschiedenen Quarzkollimationslinsen, welche ebenfalls recht kostenintensiv waren, vermessen. Dies wurde durchgeführt, um die Konfiguration mit der maximalen Leistungsausbeute zu finden.

### 2.3.1 Intensität vs. Abstand und spektrale Leistungsverteilung

Die LEDs wurden einerseits hinsichtlich ihrer spektralen Leistungsverteilung in einer Ulbricht-Kugel mit angekoppeltem Spektrometer vermessen und andererseits bezüglich der Strahlungsintensität in Abhängigkeit vom Abstand und abhängig vom Strahlprofil. Die sich bei maximaler Leistung ergebenden spektralen Leistungsverteilungen der LEDs sind in Abbildung 5 zu sehen. Es ist dabei zu beachten, dass der Messaufbau inkl. Ulbricht-Kugel nicht für Wellenlängen unterhalb von 300 nm für Absolutwerte kalibriert werden konnte. Aus diesem Grund sind die Kurven jeweils auf das Maximum normiert dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Halbwertsbreite (engl. FWHM) bei allen LEDs ungefähr gleich groß ist, nur die Zentralwellenlänge von 276 nm, 281 nm und 285 nm ist unterschiedlich.

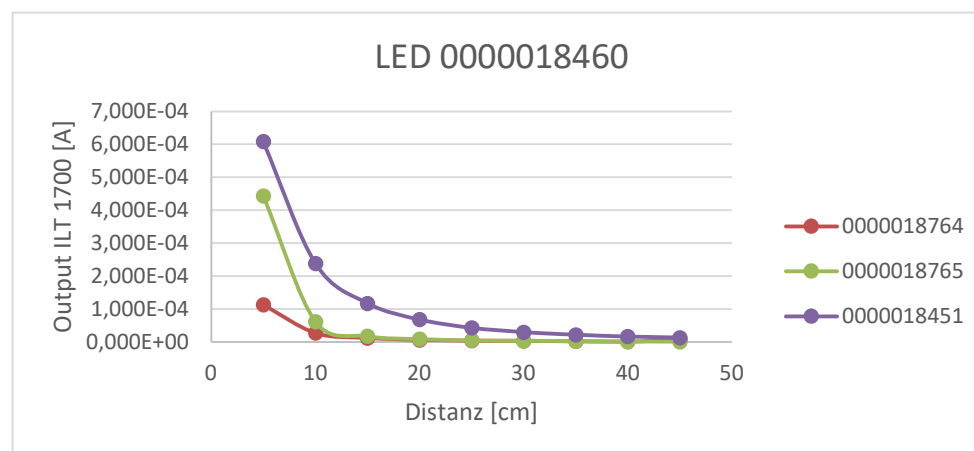
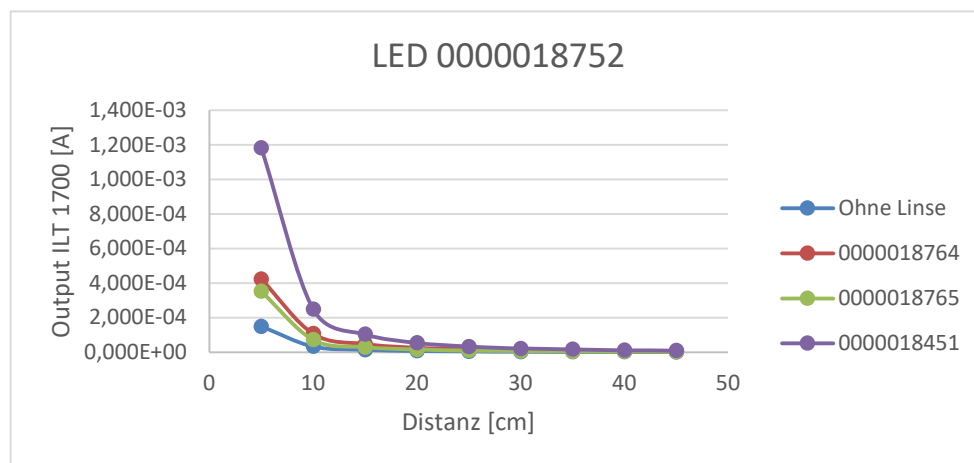
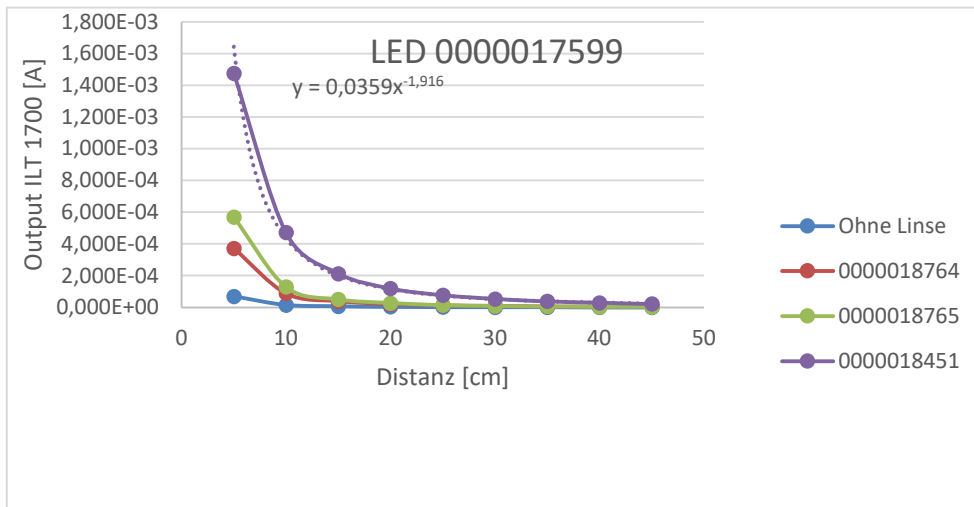


**Abbildung 5:** Normierte Emissionspektren der UVC-LEDs bei maximaler Leistung.

Die sich ergebenden Messwerte für die Intensitäten in Abhängigkeit vom Abstand der Verschiedenen LED und Linsenkombinationen sind in Abbildung 6 illustriert. Auf der Y-Achse ist jeweils das Outputsignal des ILT1700 gegenüber dem Abstandes zur Quelle aufgetragen. Das ILT1700 ist ein Radiometer, welches mit einem Messkopf versehen ist, um die Intensität der auftreffenden Strahlung messen zu können.

Bei der LED 0000017599 ist beispielhaft eine Kurve gefittet und es ergibt sich das erwartete quadratische Abstandsgesetz. Die Messungen zeigen, dass die LED 0000017599 die höchste Strahlungsintensität mit der Linse 0000018451 in Kombination besitzt. Diese Linse ist eine Vollkugellinse mit einem Durchmesser von 8 mm. Die anderen Linsen sind eine Vollkugellinse mit Durchmesser 5 mm (0000018765) und eine Halbkugellinse mit einem Durchmesser von 5 mm (0000018764). Diese Linse 0000018451 liefert aufgrund des besseren Verhältnisses von Größe zu Brennweite die besseren Ergebnisse und sammelt aus diesem Grund mehr Licht auf. Entsprechend der Messungen ist demnach die LED 0000017599 in Kombination mit der Quarzkugellinse 0000018451 die vielversprechendste Wahl. Weiterhin ist die optische Effizienz der LED 0000017599 mit 2.7 % deutlich besser gegenüber der optischen Effizienz von 1.8 % der anderen LEDs, was die thermische Last deutlich verringert und für das Projektziel somit sehr förderlich ist

Damit ist die spektrale Verteilung der LEDs nicht das ausschlaggebende Auswahlkriterium sondern die erreichbare Intensität der emittierten Strahlung.



**Abbildung 6:** Messkurven von Intensität vs. Abstand für die vermessenen LED-Kollektorlinsen-Kombinationen (LED mit Art-Nr. LEJ bezeichnet)

### 2.3.2 Strahlprofil und Öffnungswinkel

Weiterhin wurde das Strahlprofil und der Öffnungswinkel vermessen. Diese Parameter waren für die Projektpartner wichtig, da sich daraus die neuen Intensitäten bei sich veränderndem Abstand berechnen lassen. Um den Öffnungswinkel zu bestimmen, wurde einmal das Strahlprofil für einen Abstand von 20 cm und einmal für einen Abstand von 30 cm in der Größe vermessen. Mit Hilfe eines Maßstabes, in diesem Fall Zentimeterpapier, und einfachen geometrischen Beziehungen kann daraus der Öffnungswinkel (hier immer halber Öffnungswinkel, wie in der Optik gebräuchlich) berechnet werden. Zusätzlich zu diesen Messungen wurde das System aus LED und Quarzkugellinse mit Hilfe eines Raytraces simuliert. Simuliert und vermessen wurden zwei Konfigurationen. In der ersten Konfiguration (Konfiguration 1) waren der Abstand zwischen der LED und der Kugellinse so eingestellt, dass sich eine möglichst gute Restkollimation bzw. minimaler Öffnungswinkel ergibt. Dabei steht die Emitterfläche der LED nahezu in Brennweite der Linse. Bei der zweiten Konfiguration (Konfiguration 2) wurde die Linse möglichst nah an die LED gebracht. Dies wurde durchgeführt um zu sehen, ob sich starke Änderungen in der Intensität und im Öffnungswinkel bzw. Strahlprofil ergeben.

Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 7 gezeigt. Dabei sind wie erwähnt die Ergebnisse beider genannter Konfigurationen gezeigt für einen Abstand von 20 cm und die sich ergebenden Werte sind eingetragen. Die Messungen für 30 cm sind hier nicht gezeigt, fließen jedoch in die Auswertung für den Öffnungswinkel ein. Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass die Simulation und die Messergebnisse sehr gut übereinstimmen. Sie stimmen im Strahlprofil und der sich ergebenden Intensität gut überein. Für Konfiguration 1 ergibt sich wie erwartet die beste Restkollimation bzw. minimaler Divergenzwinkel mit  $6.4^\circ$ .

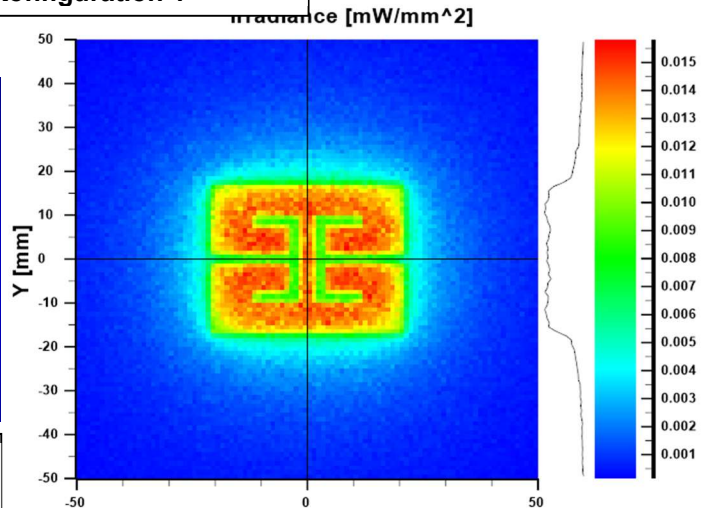
Dabei wird jedoch, wie in der Simulation ersichtlich, nur eine Gesamtleistung von 30.1 mW der ursprünglichen 100 mW erzielt, welche in 20 cm Abstand auf einen Detektor trifft. Bei der Konfiguration 2 werden immerhin 53.6 mW erzielt. Der Rest der Strahlungsleistung geht verloren, da die Kollektorlinse nicht alle Strahlen auffangen kann. Auch wenn die Divergenz mit einem Öffnungswinkel von  $9.8^\circ$  bei Konfiguration 2 höher ist, ist diese aufgrund der höheren erreichbaren Leistung zu bevorzugen, da die Strahlaufweitung mit dem Abstand zur Quelle gegenkompensiert werden kann, sollte eine bestimmte Strahlgröße von den Projektpartnern bevorzugt werden. Die Intensitätsverteilung über das Strahlprofil lässt sich nur Anhand der Simulation erkennen. In der Messung konnte nur ein punktueller Wert gemessen werden, wobei der maximale Wert gewählt wurde. Dabei ergibt sich in der Simulation sowie in der Messung ein maximaler Wert von  $0,03 \text{ mW/mm}^2$ . Demnach kann im Weiteren Vorgehen von diesem Wert ausgegangen werden.

### Konfiguration 1



**Messung:**

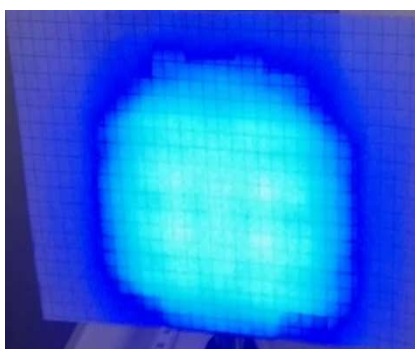
Leistung: 100 mW  
 Breite: 39 mm FWHM  
 halber Öffnungswinkel: 6.4°



**Simulation:**

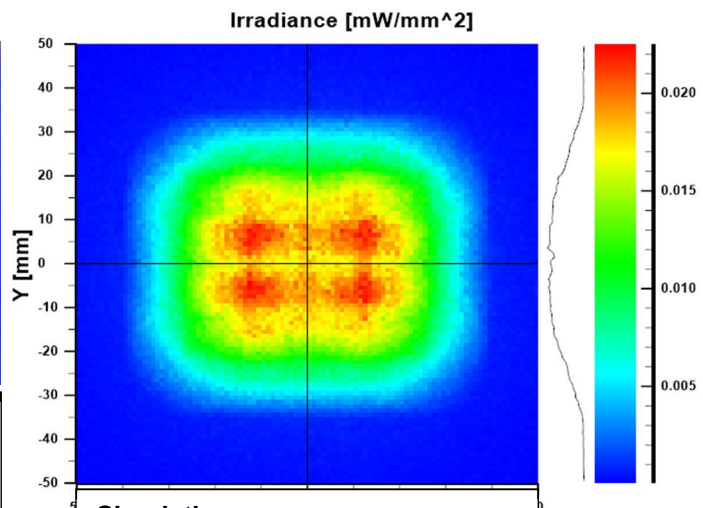
Iput: 100 mW LED-Leistung  
 Total Output: 30.1 mW  
 Breite: 45 mm FWHM

### Konfiguration 2



**Messung:**

Leistung: 100 mW  
 Breite: 72 mm FWHM  
 halber Öffnungswinkel: 9.8°  
 Intensität: 0.03 mW/mm<sup>2</sup>



**Simulation:**

Iput: 100 mW LED-Leistung  
 Total Output: 53.6 mW  
 Breite: 68 mm FWHM

**Abbildung 7:** Ergebnisse der Strahlprofilmessung für zwei Konfigurationen (siehe Text) im Vergleich zur Simulation.

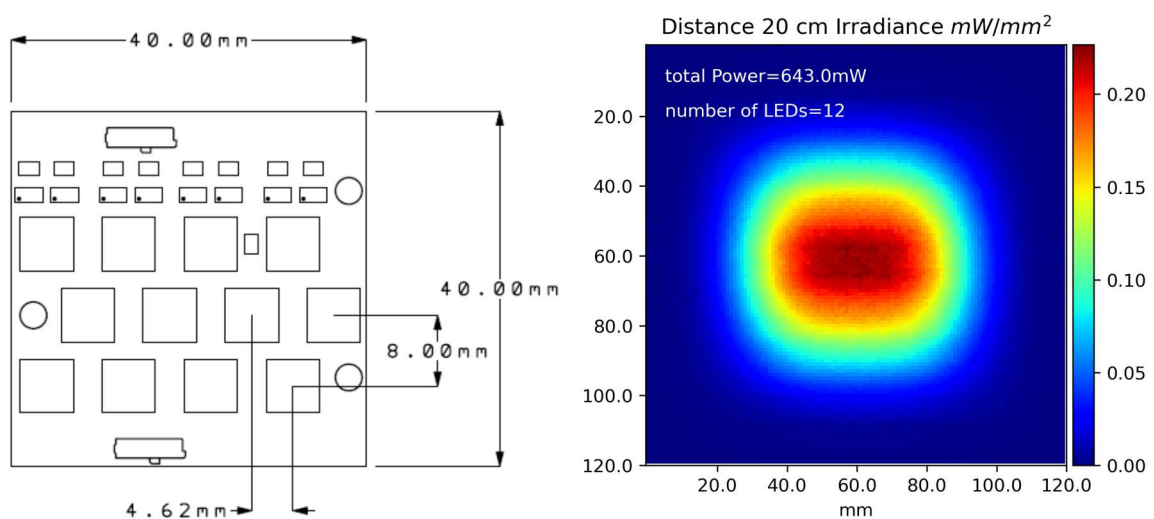
## 2.4 Zusammenfassung und Auswahl

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die UVC-LEDs die am besten geeigneten Primärlichtquellen sind, denn es lässt sich zum einen mit den LEDs eine wesentlich kompaktere Strahlquelle konstruieren als mit Hg-Niederdruckstrahlern und Deuteriumlichtquellen bei gleicher elektrischer Leistungsaufnahme. Zum anderen ist die optische Effizienz durch die für die Anwendung günstigere Abstrahlung in  $1/3$  des Raumwinkels ( $120^\circ$ ) deutlich besser. Dies erhöht nicht nur die zur Verfügung stehende optische Leistung, sondern verringert auch die abzuführende Wärme bei gleicher Leistung. Weiterhin lässt sich mit UVC-LEDs ein relativ homogenes Strahlprofil erzeugen, welches eine geringe Divergenz aufweist. Dadurch lässt sich ein besseres Profil zur Abrasterung einer Fläche erzeugen.

Von den untersuchten LEDs, welche oben mit den LEJ-Art-Nummern bezeichnet wurden, hatte sich die UVC-LED „BOLB 6060 UV-C“ als leistungsstärkste 2021 am Markt verfügbare LED herauskristallisiert. Mit dieser LED, bzw. LEDs dieses Typs wurden in 2021 alle weiteren Arbeiten durchgeführt und die Lichtquelle für die ersten Untersuchungen am HKI aufgebaut.

## 3. AP4: Aufbau der UVC-Lichtquelle

Der Aufbau der Lichtquelle war maßgeblich durch die Ergebnisse aus den anderen Arbeitspaketen bestimmt. Die Abmaße der Quelle mit  $4 \times 4 \times 10$  cm<sup>3</sup> wurden zunächst auf  $20 \times 10 \times 4$  cm<sup>3</sup> aufgeweitet. Für die Erprobungsphase erwies sich dann der Formfaktor als wenig relevant. Daraufhin galt eine kompakte Bauform, die sich an das Sensormodul des Projektpartners IOF montieren ließ, als Vorgabe. Um die optische Leistung der Quelle zu erhöhen und die beleuchtete Fläche zu vergrößern, wird nicht nur eine LED, sondern ein Array aus mehreren LEDs verwendet. Demzufolge wurde im ersten Schritt im Demonstrator ein Array aus 12 LEDs in hexagonaler Anordnung verwendet. Dadurch können Vorgaben bzgl. Formfaktor eingehalten werden. Abbildung 8 zeigt die LED-Anordnung auf der Leiterplatte. Jede LED wurde mit einer Quarzkugellinse versehen, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen.

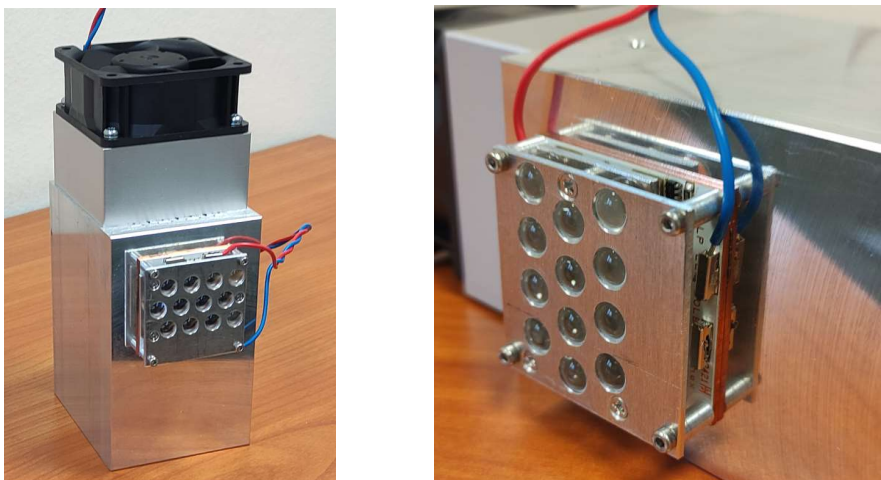


**Abbildung 8:** Hexagonale LED-Anordnung auf der Leiterplatte links.

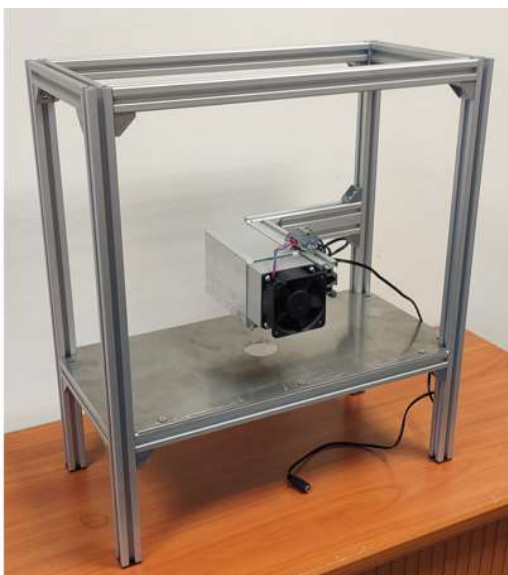
Resultierendes simuliertes Strahlprofil mit Intensitätsverteilung rechts.

Das in dieser Konfiguration sich ergebende simulierte Strahlprofil ist auch in Abbildung 8 gezeigt. Die gesamte Leistung, die sich auf das gezeigte Strahlprofil verteilt, sind ca. 640 mW. Mit dieser Simulation und den bestimmten Öffnungswinkeln, kann man nun auch das Strahlprofil für jeden beliebigen Abstand berechnen bzw. ermitteln.

Auf Basis der o.g. LED und der Ergebnisse der Untersuchungen aus LEJ-AP3 wurde eine Lichtquelle konzipiert, konstruiert und gebaut (LEJ-AP4), welche im November 2021 an den Projektpartner HKI Jena für erste Bestrahlungsuntersuchungen an den gewählten Modellorganismen übergeben wurde.



**Abbildung 9:** Erste Version der LEJ UV-C LED-Lichtquelle mit hexagonaler LED-Anordnung



**Abbildung 10:** Aufbau mit LEJ UV-C LED-Lichtquelle und Lochblende, welche für erste Bestrahlungsuntersuchungen am HKI Jena zum Einsatz kam

## 4. AP6: Erprobungsphase

### 4.1 Ergebnisse der ersten Version der UV-C LED-Lichtquelle mit hexagonaler LED-Anordnung UVC-Strahler

Mit dieser UV-C LED-Lichtquelle konnten wir in Abhängigkeit vom Abstand nachweislich eigener Messung eine Bestrahlungsstärke von ca. 10 – 40 mW /cm<sup>2</sup> erreichen.

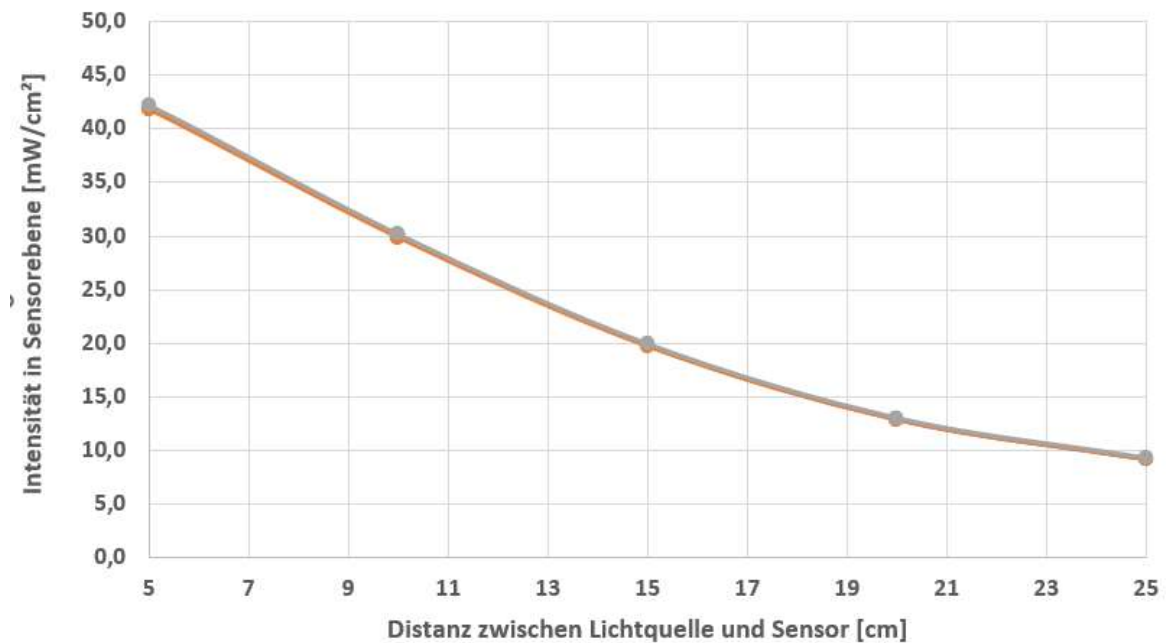


Abbildung 11: Abstandsabhängige Bestrahlungsstärke der ersten UVC-LED Lichtquelle

## 5. AP 7: Leuchtmittel-Optimierung

### 5.1 AP 7.1 Erprobung neuer LEDs

Im Anschluss an die Erprobung der Lichtquelle und den daraus resultierenden Erkenntnissen wurden dann die Optimierung des Leuchtmittels (LEJ-AP7) vorgenommen. Hier wurde eine Recherche nach neuen LEDs am Markt durchgeführt. Es wurden weitere potentielle Kandidaten identifiziert und erprobt.

- Luminus XFM-5050-UV
- IBT L6868-UV-275nm-D4
- Bolb S6060-DR250-W265-P100

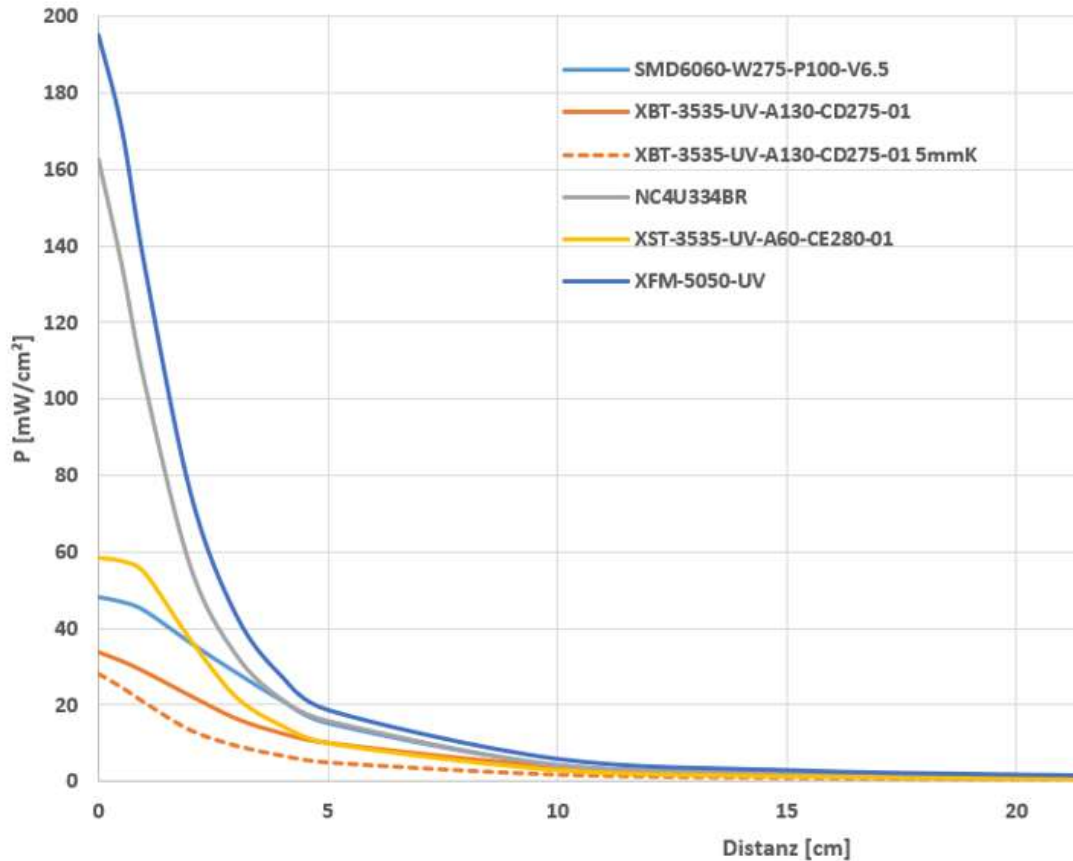
Die Erkenntnis aus dieser Erprobung war, dass die bereits bisher verwendeten LEDs „**6060 UV-C**“ des Herstellers **Bolb**, die mit Abstand effizientesten sind und auch in der Demonstrator-Lichtquelle Verwendung finden sollen.

	Nichia NC4U334BR(T)-E	Luminus XFM-5050-UV	Bolb S6060-DR250-W275-P100	Luminus XBT-3535-UV	Luminus XST-3535-UV
max. Chiptemperatur	110,0 °C	95,0 °C	75,0 °C	100,0 °C	100,0 °C
max. Temperatur der Wärmesenke	77,9 °C	49,5 °C	58,2 °C	84,0 °C	84,1 °C
Nennstrom	0,35 A	2,00 A	0,25 A	0,50 A	0,50 A
Maximalstrom kontinuierlich	0,50 A	3,20 A	0,35 A	0,80 A	0,80 A
max. Flussspannung	22,5 V	8,0 V	7,5 V	7,5 V	7,5 V
Stromreserve	30%	38%	29%	38%	38%
el. Nennleistung	7,88 W	16,00 W	1,88 W	3,75 W	3,75 W
el. Maximalleistung	11,25 W	25,60 W	2,63 W	6,00 W	6,00 W
opt. Nennleistung	200 mW	250 mW	100 mW	40 mW	40 mW
Peak-Wellenlänge	280 nm	275 nm	275 nm	275 nm	275 nm
elektro-opt. Effizienz	2,54%	1,56%	5,33%	1,07%	1,07%
Leistungsdichte bei 10 cm Abstand mit 8mm-Kugellinse	4,36 mW/cm <sup>2</sup>	5,70 mW/cm <sup>2</sup>	4,27 mW/cm <sup>2</sup>	3,80 mW/cm <sup>2</sup>	3,01 mW/cm <sup>2</sup>
Leistungsdichte bei 10 cm Abstand mit 5mm-Kugellinse				1,70 mW/cm <sup>2</sup>	0,90 mW/cm <sup>2</sup>

**Abbildung 12:** Ergebnisse der zweiten LED-Recherche. Die Bolb S6060 zeigt die höchste Effizienz.

### 5.2 AP 7.2 Untersuchung „Überstromen“

Typischerweise lassen sich LED mit höheren Strömen betreiben, wenn man sie nicht kontinuierlich betreibt, sondern im Pulsbetrieb. Dann kann man sie mit dem vom Hersteller genannten Maximalstrom betreiben und nicht nur mit dem Nennstrom. Für die, für die Mikroorganismen entscheidende «Dosisleistung» pro Zeiteinheit bringt dies aber leider keine Vorteile, da quasi während der Pause zwischen den Pulsen keine Leistung auf die Oberfläche übertragen wird. Daher haben wir uns im Projekt entschieden, die LEDs dauerhaft mit dem Nennstrom zu betreiben, da dies auch die Aufwände für die Kühlung der LED reduziert, gegenüber einer Auslegung für den Maximalstrom.



**Abbildung 13:** *Bestrahlungsleistung der untersuchten LED in Abhängigkeit von der Distanz zur Oberfläche. Es wird deutlich, dass die Bolb 6060 die bestgeeignete LED ist.*

### 5.3 AP 7.3 Optimierungsmöglichkeiten Optik

Die Recherche nach alternativen Optiken ergab keine sinnvolle Optimierungsmöglichkeit, da in diesem Wellenlängenbereich nur sehr teure Transmissionsoptiken erhältlich sind. Reflexionsoptiken aus mit metallischen Schichten sind aus geometrischen Gründen bei der geplanten Anwendung auch nicht sinnvoll in die Lichtquelle integrierbar.

Die beste Möglichkeit ist die Minimierung des Abstandes zwischen Lichtquelle und zu bestrahlender Oberfläche auf das aus geometrischen Gründen bei der Anwendung notwendige Mindestmaß, wie in Abbildung 13 gut ersichtlich ist.

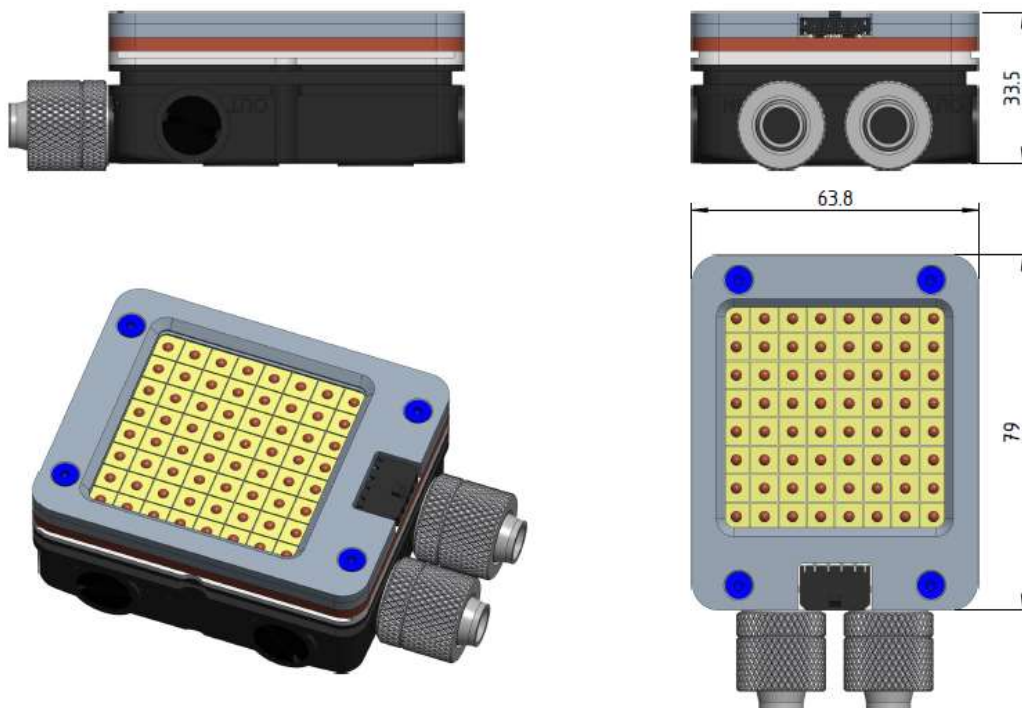
## 6. AP8: Demonstrator-Optimierung

Um in der zweiten, optimierten Version der Lichtquelle die Strahlungsleistung weiter zu erhöhen, entschieden wir gemeinsam mit den Projektpartnern den Aufbau der Lichtquelle für den Demonstrator neu zu konzipieren:

- Maximale Anzahl von LEDs auf möglich kleiner Fläche
- kompaktere Abmessungen der Lichtquelle
- dadurch wurde eine Wasserkühlung der Lichtquelle notwendig,
- Montage der Lichtquelle unterhalb der Sensoreinheit vom IOF
- Verzicht auf Vorsatzoptiken zugunsten der Erhöhung der Anzahl an LEDs pro Fläche, aber minimaler Abstand zur Objektebene

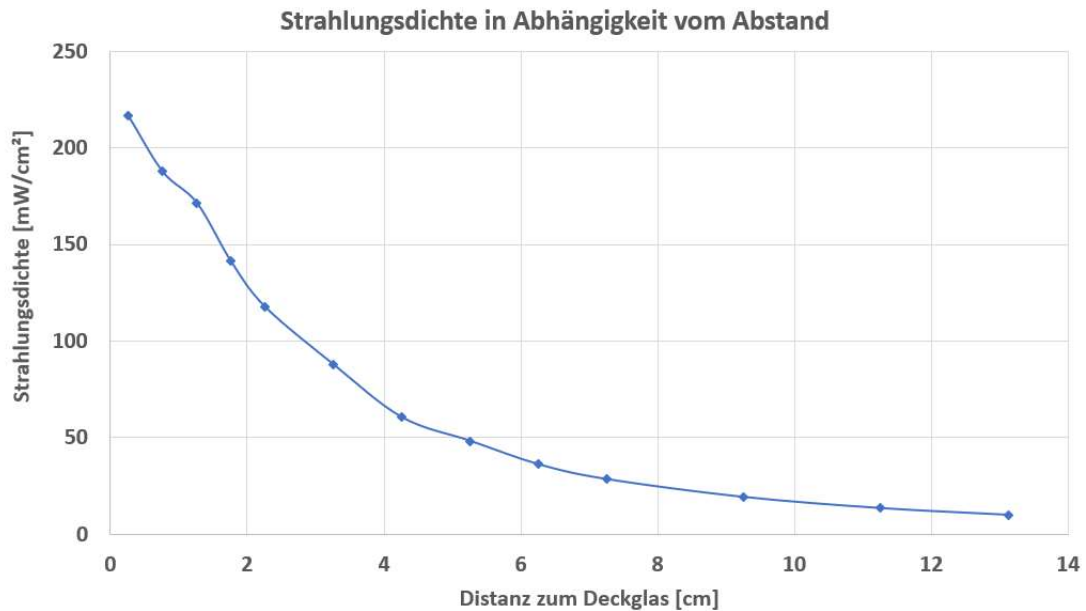
Nach diesen Vorgaben wurde dann die Lichtquelle für den Demonstrator konzipiert, konstruiert und gebaut (LEJ-AP8), welche sich durch folgende Merkmale auszeichnete:

- Maximale Anzahl von 64x Bolb S6060 LEDs (AP 8.1)
- Vergrößerung der Abstrahlfläche auf 50 mm x 50 mm (AP 8.1)
- Wasserkühlung der Lichtquelle, mit abgesetztem Wärmetauscher (AP 8.2)
- Abgesetztes Netzteil für die Lichtquelle (AP 8.3)



**Abbildung 14:** CAD-Darstellung der optimierten UVC-LED-Lichtquelle mit 64 Bolb S6060 LED und Wasserkühlung

Ein Exemplar der entstandenen Lichtquelle wurde nach physikalisch-technischer Charakterisierung an den Projektpartner HKI Jena zur Erprobung übergeben.



**Abbildung 15:** *Bestrahlungsstärke der optimierten UVC-LED Lichtquelle in Abhängigkeit vom Abstand der zu bestrahlenden Oberfläche*

Eine zweite parallel aufgebaute Lichtquelle wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Metralabs Ilmenau und IOF Jena im Demonstrator integriert.

### 7. AP8: Demonstrator-Optimierung

Ein zweites parallel aufgebautes Exemplar der optimierten Lichtquelle wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Metralabs Ilmenau und IOF Jena am Demonstrator integriert.



**Abbildung 16:** *Optimierte UVC-LED-Lichtquelle mit Halterung für Demonstrator-Integration.*

### Teil III: Erfolgskontrollbericht

Die Aufgabenstellung der Leistungselektronik Jena GmbH (LEJ) war die Entwicklung einer kompakten Lichtquelle zur effizienten Dekontamination von Oberflächen, welche an einer autonomen mobilen Roboterplattform zum Einsatz kommen kann.

Das Ergebnis des Vorhabens ist die in Abbildung 16 gezeigte sehr kompakte und leistungsstarke UVC-LED Lichtquelle, welche eine sehr hohe UVC-Strahlungsleistung auf einer 5 x 5 cm<sup>2</sup> großen

Abstrahlungsfläche gewährleistet und in Ihre Abstrahlcharakteristik umfassend untersucht wurde.

Die Ergebnisse wurden in einem vorläufigen Datenblatt zusammengefasst, welches wir dem Projektbericht anfügen.

Die Leistung der Lichtquelle für die Dekontamination im Laborsetup wurde im Teilprojekt des HKI Jena bewertet und die Ergebnisse fallen je nach Organismus und verwendeter Oberfläche- bzw. Vorbehandlung sehr unterschiedlich aus, weisen aber darauf hin, dass es möglich ist mit unserer Lichtquelle die Kontamination auf Oberflächen, um einige Größenordnungen zur verringern und unter bestimmten Bedingungen auch zu desinfizieren.

Durch die Arbeiten innerhalb des Teilprojektes der Leistungselektronik JENA wurden weiterhin folgende Erkenntnisse gewonnen:

Die Verwendung von UVC-LEDs im Vergleich zu herkömmlichen UV-Röhren und Deuteriumlampen bietet einige Vorteile. Insbesondere dichtgepackte UVC-LEDs ohne aufwändige Optik sind eine vielversprechende Lösung für kleine Arbeitsabstände, d.h. wenn es möglich ist die UVC-Lichtquelle bis auf wenige cm an die zu dekontaminierende Oberfläche heranzuführen. Allerdings erfordert der Betrieb bei Maximalstrom eine leistungsstarke Kühlung, um die Lebensdauer der LEDs zu maximieren. Aufgrund der Flächendichte der Leistung und des noch geringen Wirkungsgrads der LEDs ist eine Wasserkühlung notwendig.

Der Technologiedemonstrator, der als kompakte UVC-LED-Lichtquelle für die Dekontamination dient, kann individuell angepasst oder für OEM-Entwicklungen genutzt werden. Schutzrechte und Erfindungen wurden bisher nicht angemeldet. Der erfolgreich entwickelte kompakte UVC-LED Lichtquellendemonstrator, zusammen mit dem vorläufigen Arbeitsblatt wird der LEJ nun zur Identifikation weiterer potentieller Anwendungen dienen, um zukünftig für die LEJ-Kunden und Applikationen im Bereich der UVC-Technologie zu finden. Vertriebsaktivitäten mit dem Prototyp und dem Datenblatt sind in UV-Technologie-Netzwerken und auf entsprechenden Veranstaltungen seit Anfang 2024 durchgeführt bzw. geplant wurden. Darüber hinaus kann die UVC-LED auch in anderer Weise eingesetzt werden, z. B. zur gezielten automatischen Dekontamination begrenzter Flächen mit einfacher Kontur (z. B. Eingabefelder von Geldautomaten). Hierbei ist jedoch die potenzielle Schädigung von Kunststoffoberflächen zu berücksichtigen. Ein Umsatz wird frühestens im Jahr 2026 erwartet.