

K+D Flux-Technic GmbH + Co. KG

Mechanische und elektronische Entwicklung einer energieeffizienten
UV-LED-Handlampe zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung

UV-LED-Handlampe



Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter AZ 27098 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Rupert Dangelmayr und Peter Zipfl

Möglingen, 11. August 2010

Der Bericht ist über die K+D Flux-Technic GmbH + Co. KG erhältlich.

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	27098	Referat	22	Fördersumme	178.990 €
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel Mechanische und elektronische Entwicklung einer energieeffizienten UV-LED-Handlampe zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung

Stichworte UV-LED-Handlampe

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
18 Monate	20.03.2009	19.09.2010	

Zwischenberichte	30.09.2009
------------------	------------

Bewilligungsempfänger K+D Flux-Technic GmbH + Co. KG
Im Wert 24
73563 Mögglingen

Tel 07174 / 89802-15

Fax 07174 / 89802-10

Projektleitung

Rupert Dangelmayr
(Geschäftsführer)

Bearbeiter

Rupert Dangelmayr

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die UV-Strahlung von UV-Rissprüf-Lampen, wie sie bisher von K+D Flux-Technic hergestellt und vertrieben werden, wird überwiegend von Halogen- oder Xenon-Entladungslampen erzeugt. Diese sind in der Anschaffung und Unterhalt (geringe Lebensdauer) teuer und emittieren nicht nur bei der gewünschten Wellenlänge, sondern sehr breitbandig. Bisherige UV-Rissprüf-Lampen haben dadurch den Nachteil, dass der starke, „gesundheitsschädliche“ kurzwelligere Strahlungsanteil mit optischer Filterung extrahiert werden muss. Somit wird nur ein sehr geringer Teil der erzeugten optischen Leistung für die Rissprüfung nutzbar. Der weit größere Teil verursacht Wärme, die abgestrahlt wird oder aufwändig abgeführt werden muss.

Ziel des FuE-Vorhabens ist die Entwicklung und der Bau eines UV-LED-Handstrahler-Prototypen, der sich in gleicher Weise wie bisherige UV-Halogen- oder Xenon-Strahler für die Rissprüfung nach dem Magnetpulver- oder Eindringverfahren eignet. Er soll jedoch deutlich kostengünstiger, einfacher zu handhaben, vielseitiger einsetzbar, sicherer, zuverlässiger, leichter, energieeffizienter und weniger schädlich für die Umwelt sein. Der Handstrahler soll in jedem Betriebszustand, im Neuzustand und auch kurz vor Ende seiner Lebensdauer, Strahlung konstanter Strahlstärke, ausschließlich bei Wellenlängen von 365 nm erzeugen. Durch modulare Bauweise soll überdies ein skalierbarer UV-LED-Strahler entstehen, der Bestrahlungsstärken bis 10 mW/cm² im Messabstand von 400 mm gewährleistet und sich innerhalb der Risikoklasse 2 befindet.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

UV-LED Auswahl und Lampenkonzept: Die Analyse über Verfügbarkeit geeigneter UV-LED in Bezug auf Energieeffizienz und Lebensdauer sind die Grundlage für die Konzeption der elektrischen Ansteuerung und der Optik der Handlampe. Verschiedene Ansätze sollen verglichen und bewertet werden (z.B. Einsatz vieler leistungsschwacher LED, weniger leistungsstarker LED bzw. LED-Arrays).

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Wärmemanagement: Hier werden verschiedene Ansätze zur Entwärmung der Lampe mit Rücksicht auf den praktischen Einsatz (Betrieb in verschmutzter Umgebung, zulässige Betriebstemperatur, etc.) bewertet. Das prinzipielle Lampenkonzept und der Montageort der LED (z.B. Spiegeloptik mit LED im Fokus oder mehrere LED auf gemeinsamem Träger) gehen stark in diese Bewertung ein. Das Wärmemanagement bestimmt stark die Lebensdauer der UV-LED.

Ansteuer-Elektronik: Die Konzeption soll eine Energie effiziente Versorgung und abhängig vom prinzipiellen Lampenkonzept eine möglichst individuelle Ansteuerung und Überwachung der UV-LED ermöglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Die wichtigsten Anforderungen an eine Prüflampe mit UV-LED, die herkömmliche Prüflampen auf der Basis von Entladungslampen ersetzen können, wurden voll erfüllt. Die Energieeffizienz ist aufgrund von Steigerungen des Wirkungsgrads bei UV-LED höher als zu Projektbeginn erwartet. Das Zusammenspiel aus Ansteuer-Elektronik mit hohem Wirkungsgrad, Systemdiagnose und effizienter Entwärmung ermöglichen einen hohen elektrisch-optischen Gesamtwirkungsgrad. Dieser ist von der Qualität der eingesetzten UV-LED und den Parametern zueinander abhängig und wird von der intelligenten Steuerung individuell optimiert. Die Dimensionierung der Lampe ermöglicht einen Betrieb am oberen Ende der Risikogruppe 2 (EM 6, DGZfP) festgelegten Bestrahlungsstärke von 10 mW/cm². Die dafür einzusetzende elektrische Betriebsleistung beträgt je nach Qualität der UV-LED zwischen 9 W und 15 W. Entsprechende Prüflampen der Fa. K+D Flux-Technic auf der Basis von Entladungslampen benötigen für die vergleichbare Strahlungsleistungen am Prüfling zwischen 54 W und 64 W Betriebsleistung.

Die Lebensdauer der Lampe konnte deutlich gesteigert werden. Sie wird anhand der verfügbaren Daten, abhängig von den Betriebsparametern und der gewählten Gehäusevariante (offen bzw. geschlossen) auf 20.000 bis 50.000 Betriebsstunden abgeschätzt. Sie ist damit wesentlich größer als die der vergleichbaren Entladungslampe. Hierdurch können giftige Inhaltsstoffe wie Quecksilber eingespart werden.

Die Prüflampe ist im Vergleich zur Prüflampe mit Entladungslampe leichter geworden. Bei der Konstruktion konnte das Ziel erreicht werden, mit möglichst wenig Materialeinsatz bzw. -abtrag bei der Herstellung auszukommen.

Beim Betrieb der Prüflampe sind nun Gefährdungen durch Verbrennung, berstende Lampen und hohe Betriebsspannungen ausgeschlossen. Der flexible Betrieb der Lampe mit Kleinspannung ermöglicht zudem den mobilen Einsatz mit Akkumulatoren. Die Prüflampe ist nach dem Einschalten sofort einsatzbereit. Ihre Lebensdauer wird durch häufiges Ein- und Ausschalten auch ohne Pause nicht beeinträchtigt. Der Anwender der Prüflampe erhält Signale über die normgerechte Betriebsfunktion und einen etwaigen Wartungsbedarf der Lampe.

Die aus dem neuen Produkt resultierende Umweltentlastung stellt sich wie folgt dar:

Parameter	bisherige UV Leuchten (Mittelwert)	UV-LED-Leuchte
El. Betriebsleistung	59 W	12 W
Strahlungsleistung	vergleichbar (Fläche wurde bei der Berechnung einbezogen)	
Energieverbrauch 2010 (Basis nach Rücksprache mit einzelnen Firmen: 250 Tage/Jahr à 8 Std. / 100 Leuchten)	11,8 MWh	2,4 MWh
CO ² -Emission in 2010	10.148 kg	2.064 kg

Das Projekt konnte in weniger als der veranschlagten Bearbeitungszeit erfolgreich abgeschlossen werden. Die gesammelten Erfahrungen liefern Anhaltspunkte, um den Energiebedarf insbesondere von nicht beweglichen Prüflampen mit hoher Leistung weiter zu reduzieren.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Bewerbung und Präsentation der neuen UV-LED-Handlampe soll zunächst durch entsprechende Publikationen in regionalen Zeitungen und Berichte in Fachzeitschriften wie etwa der DGzFP Zeitung erfolgen. Auf der Fachmesse „Control 2010“, die vom 4. bis 7. Mai 2010 in Stuttgart stattfand, wurde der vorliegende Prototyp erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Resonanz darauf war äußerst positiv. Erste Anfragen nach konkreten Angeboten mit genauer technischer Beschreibung der UV-LED-Handlampe gingen noch während der Messe bei uns ein.

Des Weiteren wurde die Produktneuheit von unserem Vertrieb bereits über 30 Firmen vorgestellt bzw. diesen ein Mustergerät zu Testzwecken überlassen.

Fazit

UV-LED eignen sich hervorragend als Ersatz für herkömmliche Entladungslampe in Prüflampen zur Magnetpulver-Prüfung. Alle wichtigen günstigen Eigenschaften konnten umgesetzt werden.

Als großer Vorteil stellte sich die flexible Gestaltung der Anordnung der UV-LED-Strahlungsquelle der Prüflampe und der Ansteuer-Elektronik (Anpassung durch Firmware) heraus. Dadurch konnte auf Erfahrungen im Zusammenhang mit dem Feldeinsatz der Prototypen sehr flexibel reagiert werden. So wird bei vielen Anwendern ein anderer Prüfabstand gewählt, als in der Norm für die Spezifizierung der Bestrahlungsstärke herangezogen wird und für den das Strahlprofil ursprünglich optimiert wurde. Der Einsatz mit kürzeren Prüfabständen lieferte dann eine inhomogene Strahlqualität. Das optische System konnte jedoch für alle praktisch relevanten Prüfabstände angepasst werden. Die gewählte Konzeption mit 5 Leistungs-LED deckt alle Anforderungen ab und gibt genügend Spielraum zum Ausgleich von Parameter-Schwankungen der Komponenten. Das Wärmemanagement ermöglicht eine sehr effiziente Entwärmung, die voll der Lebensdauer der UV-LED zugute kommt.

Der im sichtbaren Spektralbereich emittierte Strahlungsanteil lag immer deutlich innerhalb der Spezifikationen. Im Feldeinsatz wurde dieser dennoch bei einigen Anwendungen hoch reflektierenden Prüfobjekten als störend empfunden. Die Problematik konnte durch optische Filterung mit beseitigt werden.

Für die während der Projektlaufzeit verfügbaren UV-LED erwies sich das gewählte Lampenkonzept als ideal. Von der künftigen Entwicklung bei UV-LED wird erwartet, dass deren Zuverlässigkeit im Bereich derjenigen von sichtbaren LED der führenden Hersteller ist. Damit kann auf eine umfangreiche Diagnostik bei den LED verzichtet werden. Der Einsatz von einzelnen Hochleistungs-LED-Arrays im Zusammenhang mit Spiegeloptiken mit Freiform-Oberflächen wird dann interessant. Ebenso sollte der Ansatz der Magnetpulver-Prüfung mit der Unterstützung des Maschinensehens und der Bildverarbeitung untersucht werden. Wegen der deutlich kürzeren Prüfdauer kann hierbei von weiteren Energieeinsparungen ausgegangen werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
1 Zusammenfassung	4
2 Einleitung	5
3 Hauptteil	8
3.1 Auswahl der Strahlungsquelle	8
3.2 Optisches System	9
3.2.1 Abbildende Optik	9
3.2.2 Optische Filterung	12
3.3 LED-Ansteuerung	15
3.4 Diagnosefunktionen	17
3.4.1 Elektrische Messungen	17
3.4.2 Optische Messungen	18
3.5 Wärmemanagement	19
3.5.1 Offenes Gehäuse	20
3.5.2 Geschlossenes Gehäuse	21
3.6 LED-Lebensdauer	22
3.7 Mechanische Konstruktion	22
3.8 Feldversuche und Redesign	23
4 Fazit	24
Literaturverzeichnis	25

Abbildungsverzeichnis

1	Elektrisch-optischer Wirkungsgrad $\eta_{\text{elektr./opt.}}$ von Produkten der Firmen Nichia und Seoul	8
2	Kosten für optische Strahlungsleistung von Produkten der Firmen Nichia und Seoul . . .	9
3	Schematische Darstellung der Konzepte mit Linsenoptiken	10
5	Strahlprofile im Abstand von 400 mm (linkes Bild) und 200 mm (rechtes Bild) der Handlampe mit unveränderlicher Ausrichtung der UV-LED	11
4	Zur Kollimiation eingesetzte Fresnel-Linse	11
6	3D-Falschfarben-Darstellung des Strahlprofils der Handlampe in 200 mm Messabstand .	12
7	Auswirkungen der Objektweite auf das Strahlprofil einer einzelnen UV-LED (von links nach rechts um 1 mm zunehmend, Objekweite oben 200 mm, unten 400 mm)	12
8	Strahlprofil der justierten Handlampe im Abstand von 200 mm	13
9	Spektrale Bestrahlungsstärke der UV-LED, Augenempfindlichkeit für Nachtsehen und Gewichtung beider Kurven	14
10	Spektrale Bestrahlungsstärke der UV-LED, Augenempfindlichkeiten für Tag- und Nachtsehen und Transmissionsgrade verschiedenener optischer Bandpassfilter	14
11	Konzept der Stromversorgung der Handlampe	15
12	UV-LED-Einheit mit Ansteuerung	16
13	Signal aus UV-Reflexionen zweier LED	18
14	Ankopplung der UV-Fotodiode über Lichtleiter	19
15	LED mit Montagesockel	19
16	Gebrochene Lötstelle	19
17	Flußverhalten zweier BiSn-Lote (links/rechts des Stegs) bei verschiedenen Temperaturen	20
18	Vereinfachtes thermisches Modell des offenen Gehäuses	20
19	Vereinfachtes thermisches Modell des geschlossenen Gehäuses	21
20	Thermografische Aufnahmen der Lampendeckel	21
21	Kennlinien zur Lebensdauer der Nichia NCSU033A	22
22	Zusammenbauskizze des Lampengehäuses	23
23	Kupferträger mit UV-LED mit starrer Verbindung	24

Symbolverzeichnis

Akku Akkumulator

ε Emissionsgrad für Strahlung

$\eta_{\text{elektr./opt.}}$ Elektrisch-optischer Wirkungsgrad

λ_e Emissionswellenlänge in nm

CCD charge coupled device (Bildsensor nach dem Prinzip der Ladungskopplung)

$\frac{\Delta U_{\text{LED}}}{\Delta T}$ Temperaturabhängigkeit der UV-LED Durchlassspannung

DGzFP Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Rissprüfung

E_e Bestrahlungsstärke in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ bzw. $\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$

I_{LED} Stromstärke durch LED in A

LED light emitting diode, Leuchtdiode
(der Begriff wurde im weiteren Sinne als „Strahlung emittierende Diode“ verwendet)

Li-Ion Litium-Ionen

NiMH Nickel-Metallhydrid

P_v Verlustleistung, Wärmestrom in W

R_{thCAA} Wärmewiderstand zwischen LED-Gehäuse und Umgebung

R_{thCA} Wärmewiderstand zwischen Lampen-Gehäuse und Umgebung

R_{thCD} Wärmewiderstand zwischen LED- und Lampen-Gehäuse

R_{thJC} Wärmewiderstand zwischen Halbleiter-Kristall und LED-Gehäuse

T_A Umgebungstemperatur in K

TIA Transimpedanz-Verstärker

U_V Vorspannung zur Versorgung UV-LED-Einheiten innerhalb der Handlampe

U_{LED} Durchlass-Spannung der UV-LED

U_{Shunt} Klemmenspannung über Strommess-Widerstand der UV-LED-Einheit

$U_{\text{Stromqu.}}$ Klemmenspannung über Steuer-Stromquelle der UV-LED-Einheit

U_{TIA} Ausgangsspannung des TIA

UV-LED Im Ultraviolett strahlende LED

1 Zusammenfassung

Das Hauptziel dieses Projekts, einen energieeffizienten Ersatz zu Handlampen mit Entladungslampe zur Magnetpulver-Prüfung durch UV-LED betriebene zu schaffen, konnte voll erfüllt werden.

Die geschaffene Handlampe erreicht im Arbeitsabstand von 400 mm eine Bestrahlungsstärke von $E_e \geq 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 10 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$. Als elektrische Anschlussleistung werden dafür je nach LED-Qualität nur 9 - 15 W (bei Netzbetrieb) aufgenommen. Der Strahldurchmesser in 400 mm Abstand beträgt ca. 80 mm. Bisher war für die Handlampe mit Entladungslampe mit Strahldurchmesser 80 mm und $E_e \approx 65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ 35 W erforderlich. Die Lampe mit Strahldurchmesser 100 mm und $E_e \approx 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ benötigt gar 100 W Anschlussleistung.

Die Entwärmung der entwickelten Handlampe mit UV-LED erzeugt bei Einsatz eines offenen Gehäuses auf dessen Außenseite nur ca. 10 K höhere Temperaturen als in der umgebenden Luft. Bei Einsatz eines geschlossenen Gehäuses mit entsprechend beschichteter Oberfläche erhöht sich die Temperatur der Außenseite gegenüber der Umgebung um weniger als 22 K. Die UV-LED-Handlampe ist somit unbedenklich in Bezug auf etwaige Verbrennungen gegenüber Berührung.

Durch die geringe Erwärmung des LED-Gehäuses werden LED-Lebensdauern von 50.000 h bis 100.000 h für das offene Gehäuse und 25.000 h bis 50.000 h für das geschlossene Gehäuse aus den Herstellerdaten zur Lebensdauer der LED errechnet. Hieraus ergibt sich ein hohes Einsparpotenzial gegenüber dem Ersatz der Entladungslampen, die bei ihrer Herstellung hohen Energiebedarf und giftiges Quecksilber erfordern.

Die elektronische Ansteuerung ermöglicht sowohl die Überwachung des Betriebszustands jeder einzelnen UV-LED, als auch deren individuelle Steuerung oder Regelung. Es konnte mit Hilfe der Diagnose-Daten zum einen ein energie-effizienter Betrieb der LED erreicht werden. Zum anderen kann durch den Vergleich der aktuellen elektrischen und optischen Parameter mit denen bei Inbetriebnahme Hinweise auf eine vorzeitige Degradation jeder einzelnen LED abgeleitet und dem Anwender signalisiert werden. Mit Hilfe der Regelung der LED kann jederzeit ein normgerechter Betrieb bezüglich der Bestrahlungsstärke gewährleistet werden. Weiterhin muss bei Neugeräten die Strahlungsleistung nicht erhöht werden um eine etwaige Degradation vorwegzunehmen.

Die Handlampe passt sich automatisch auf Versorgungsspannungen im Bereich zwischen 6 V und 20 V an und kann somit sowohl mit einem Schaltnetzteil aus dem 230 V oder 115 V Netz, als auch von verschiedenen Akkutypen versorgt werden.

Als abbildende Elemente für die UV-Strahlung wurden vergütete Asphären mit großem Öffnungsverhältnis eingesetzt. Die Asphären wurden als preiswerte Glas-Presslinge als Fresnel-Linsen ausgeführt. Somit konnte ein sehr großer Teil der erzeugten optischen Strahlung auf den Prüfling fokussiert werden. Der durch die UV-LED nominell geringe Anteil an emittierter Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich war für einige Applikationen dennoch nicht mehr tolerierbar. Er wurde durch ein zusätzliches optisches Bandpass-Filter aus dem emittierten Spektrum entfernt. Die emittierte optische Leistung veränderte sich durch die zusätzlichen Filter dennoch nur unwesentlich.

Das Gerätekonzept wurde so ausgelegt, dass sich künftig verfügbare effizientere UV-LED ohne weitreichende Änderungen der Geräte-Hardware unmittelbar einsetzen lassen. Gegen Projektende wurden jedoch lediglich die UV-LED des bereits favorisierten Herstellers Nichia nochmals bezüglich ihres Wirkungsgrads verbessert. Mitbewerber erreichten diesen Stand bislang noch nicht.

Für künftige Gerätegenerationen sollte eine Abkehr von der personellen Inspektion hin zum Maschinensehen untersucht werden. Dies ermöglicht noch geringere Emissionen im UV bei entsprechender Energieeinsparung und kleinerer Personengefährdung durch die UV-Strahlung.

2 Einleitung

Ausgangssituation

In der Magnetpulver- und Eindringprüftechnik werden bisher schon UV-Strahler zur Überprüfung von dokumentationspflichtigen Bauteilen im Maschinen- und Fahrzeugbau, in Pipelines und Kraftwerken verwendet. Die in der Rissprüftechnik verwendete Wellenlänge der UV-Strahlung ist 365 nm (der Prüfstoff beschichtetes Magnetpulver absorbiert bei dieser Wellenlänge am besten die Anregungsstrahlung zur Fluoreszenz) und wird derzeit überwiegend von Halogen- oder Xenon-Entladungslampen erzeugt. Diese sind in der Anschaffung und Unterhalt (geringe Lebensdauer) teuer und emittieren nicht nur bei der gewünschten Wellenlänge, sondern sehr breitbandig. Zudem nutzen Sie nur einen geringen Anteil der elektrischen Betriebsleistung zur Erzeugung von Strahlungsleistung im geforderten Wellenlängen-Bereich.

Bisherige UV-Rissprüf-Lampen, wie sie auch derzeit von K+D Flux-Technic hergestellt und vertrieben werden, haben dadurch den Nachteil, dass der starke, gesundheitsschädliche kurzwelligere Strahlungsanteil mit optischer Filterung extrahiert werden muss. Somit wird nur ein sehr geringer Teil der erzeugten optischen Leistung für die Rissprüfung nutzbar. Der weit größere Teil verursacht Wärme und wird abgestrahlt oder muss aufwändig abgeführt werden. Die Strahlergehäuse erwärmen sich so stark, dass bei Berührung Verbrennungen entstehen können. Die Aufwärmzeit bei Entladungslampen beträgt bis zu 15 Minuten. Nach dem Ausschalten verhindert die obligate längere Abkühlphase (ca. 15 min.) die sofortige erneute Einsatzbereitschaft.

Da die Leistungsaufnahme bis max. 400 Watt (Geräte der K + D Flux-Technic) beträgt, ist in der Arbeitsumgebung ein entsprechender elektrischer Anschluss erforderlich. Ein mobiler Feldeinsatz wird durch die hohe Leistungsaufnahme stark erschwert. Enge Räume (innerhalb von Pipelines) heizen sich im Betrieb schnell auf.

Werden die optischen Filter defekt, was im rauen Alltagseinsatz des Öfteren geschieht, kann der unsichtbare UVB- Anteils des Lampenlichts unkontrolliert nach draußen gelangen und so Gesundheitsschäden an Augen und Haut des Anwenders hervorrufen (Richtlinie EM6 der DGZfP ist einzuhalten). Teils werden auch Hochdruck-Entladungslampen für die UV-Strahler eingesetzt, die bei Glasbruch ein Gesundheitsrisiko darstellen. Die eingesetzten Entladungslampen verlieren im Laufe ihres Betriebs an Strahlungsleistung und können spontan, d.h. ohne Vorwarnung ausfallen. Insgesamt ist in vielen Branchen und Technologiegebieten, in denen UV-Strahlung verwendet wird, der Trend zum Einsatz der neuen UV-LED-Technik wegen deren zahlreicher Vorteile vorgezeichnet.

UV-LED besitzen wesentlich kleinere Abmessungen als Entladungslampen. Die von UV-LED im genutzten Spektralbereich emittierte optische Leistung kann mit einem wesentlich höheren Wirkungsgrad als bei Entladungslampen erzeugt werden. Der Hauptgrund dafür ist, dass fast die gesamte erzeugte optische Leistung im benötigten Spektralbereich entsteht. Aus diesem Grund sind auch keine zusätzlichen optischen Filter erforderlich. Die Gehäusetemperaturen der UV-Strahler bleiben moderat und vermeiden deshalb Gefährdungen des Nutzers.

UV-LED sind im Gegensatz zu Entladungslampen sehr leicht elektrisch steuerbar und sogar modular. Diese ermöglicht es, UV-LED mit definierter emittierter Strahlungsleistung zu betreiben und diese im Laufe des Lebenszyklus der UV-LED an die Erfordernisse zu adaptieren. Während bei üblichen Strahlern mit Entladungslampen bei fabrikneuen Geräten höhere Strahlungsleistungen als bei Geräten am Ende ihrer Lebensdauer emittiert werden. Im Gegensatz zu Entladungslampen benötigen die UV-LED zur Versorgung keine Hochspannung. Diese Eigenschaft prädestiniert sie auch zum sicheren Betrieb auch in feuchten Klimaten oder beim Einsatz unter Spritzwasser.

Auch die LED besitzen einige Nachteile oder erzeugen zumindest Randbedingungen, die bei ihrem Einsatz unbedingt beachtet werden müssen. So muss die gesamte erzeugte Verlustwärme über Wärmeleitung vom LED-Chip abgeführt werden. Eine Erwärmung der LED auf Temperaturen, die eine nennenswerte Abstrahlung der Verlustwärme ermöglichen, würde die LED schnell zerstören. Auch der Betrieb bei erhöhten Temperaturen lässt LED schnell altern. Auch mit herstellungsbedingten Spontanausfällen ist bei LED zu rechnen [Lem10]. Die Stromversorgung der LED sollte selbst kurzzeitige Spannungsüberhöhungen (z.B. ESD) vermeiden, da hierdurch ebenfalls eine Schädigung der LED versucht werden kann.

Die verhältnismäßig leicht während des Betriebs erfassbaren elektrischen Parameter der UV-LED lassen jedoch eine Diagnose ihres Betriebs- bzw. Alterungszustands (Degradation) möglich erscheinen. Somit kann eine Frühwarnung vor Ausfällen geschaffen werden. Weil die geringeren absoluten Strahlungsleistungen einzelner LED, selbst auf mittlere Sicht hin, die Verwendung mehrerer LED oder LED-Arrays voraussetzen, kann für künftige Gerätegenerationen ein modularer Ansatz verfolgt werden. Nach dem Baukastenprinzip könnten so Geräte unterschiedlicher Leistungsklassen aus gleichen Modulen konfiguriert werden, was einer erheblichen Kostenersparnis gleichkommt. Aus den beschriebenen Randbedingungen wurde unter Berücksichtigung der Betriebserfahrung mit den herkömmlichen Handlampen das nachfolgende Lastenheft für eine Handlampe auf UV-LED-Basis entwickelt.

Lastenheft und Anwendbarkeit auf UV-LED

Bei der zu entwerfenden Handlampe soll ein für die Anwendung adäquater Ersatz für bereits bestehende Prüflampen für die Magnetpulver-Prüfung von metallischen Bauteilen gefunden werden. Die spezifischen Nachteile bestehender Lampen, wie hohe Wärmeentwicklung, hoher Energieverbrauch, Einsatz von Problemstoffen wie Quecksilber sollen hingegen vermieden werden. Es ergibt sich für die Umsetzung des Vorhabens das folgende Lastenheft:

- Es ist eine Prüflampe zur Magnetpulverprüfung nach DIN EN ISO 9934 und DIN EN ISO 3059 zu erstellen.
- Die Prüflampe soll im Abstand von 400 mm eine maximale Bestrahlungsstärke von $10.000 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ nicht überschreiten, eine minimale Bestrahlungsstärke von $1.000 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ jedoch nicht unterschreiten. Standardmäßig sollte die Lampe geringfügig unterhalb $10.000 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ betrieben werden. Dies entspricht einem Betrieb innerhalb der Risikogruppe 2 der Richtlinie EM6 nach DGzFP [BGI5006]. Der Strahldurchmesser soll im Abstand von 400 mm ca. 80 mm betragen.
- Der emittierte Beleuchtungsstärke soll 20 lux nicht überschreiten.
- Prüflampe sollte eine mindestens doppelte Energieeffizienz gegenüber bestehenden Systemen aufweisen
- Der Problemstoff Quecksilber, der üblicherweise in den Entladungslampen verwendet wird, soll vermieden werden.
- Das Lampengehäuse soll berührungssichere Temperaturen aufweisen. Damit sollen Verbrennungen am Lampengehäuse und insbesondere am Strahlungsausstritt, wie sie bei bestehenden Lampen auftreten können, vermieden werden.
- Es soll eine Lebensdauer der Strahlungsquelle von über 10.000 h erreicht werden. Damit entfällt der Abfall der quecksilberhaltigen Entladungslampen und die zur Herstellung derselben aufgewendete Energie. Darüber hinaus können die Service-Zeiten der Handlampe verringert werden.

- Die Handlampe soll spontan, d.h. ohne lange Abkühl- oder Aufwärmzeiten einsatzbereit sein. Die Lebensdauer der Lampe soll durch häufiges Ein- und Ausschalten nicht beeinträchtigt werden. Damit steigt die Energieeffizienz insbesondere bei Prüflampen, die immer nur kurz zum Einsatz kommen. Bei diesen Einsatzbedingungen reduziert sich üblicherweise die Lebensdauer der Entladungslampen deutlich.
- Ein Betrieb mit Niederspannung in gefährdeten Bereichen soll möglich sein.

Die geforderten Eigenschaften können prinzipiell mit UV-LED als Strahlungsquellen erreicht werden. Um die gewünschte Bestrahlungsstärke von bis zu $10.000 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ im Messabstand von 400 mm bei einem Strahldurchmesser von 80 mm zu erreichen, wird eine optische Leistung von $\approx 0,5 \text{ W}$ am Prüfling erforderlich. Etwaige Verluste durch das optische System, Streuungen bei den UV-LED Parametern und eine entsprechende Regelreserve wegen der Degradation über der Lebensdauer der LED müssen zusätzlich berücksichtigt werden. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte ist die Erzeugung einer optischen Leistung von ca. 1 W realistisch. Solche optische Leistungen sind nur durch Einsatz mehrerer LED zu erreichen.

3 Hauptteil

3.1 Auswahl der Strahlungsquelle

Um normgerechte Magnetpulverprüfungen durchzuführen, musste die Emissionswellenlänge der Strahlungsquelle bei 365 nm liegen. Diese Vorgabe schränkte die Auswahl an in Frage kommenden LED stark ein. Während der Konzeptionsphase der Handlampe gab es im Wesentlichen nur zwei Hersteller von UV-LED dieser Wellenlänge, mit denen die Vorgaben mit vertretbarem Aufwand umgesetzt werden konnte. Dies waren die Firmen Nichia und Seoul. Selbst unter diesen Firmen konnte ein deutlicher Unterschied beim elektrisch-optischen Wirkungsgrad festgestellt werden. Nichia war seinen Mitbewerbern diesbezüglich deutlich voraus, wie die Grafik (Abbildung 1) deutlich macht. Dieser Vorsprung der Ni-

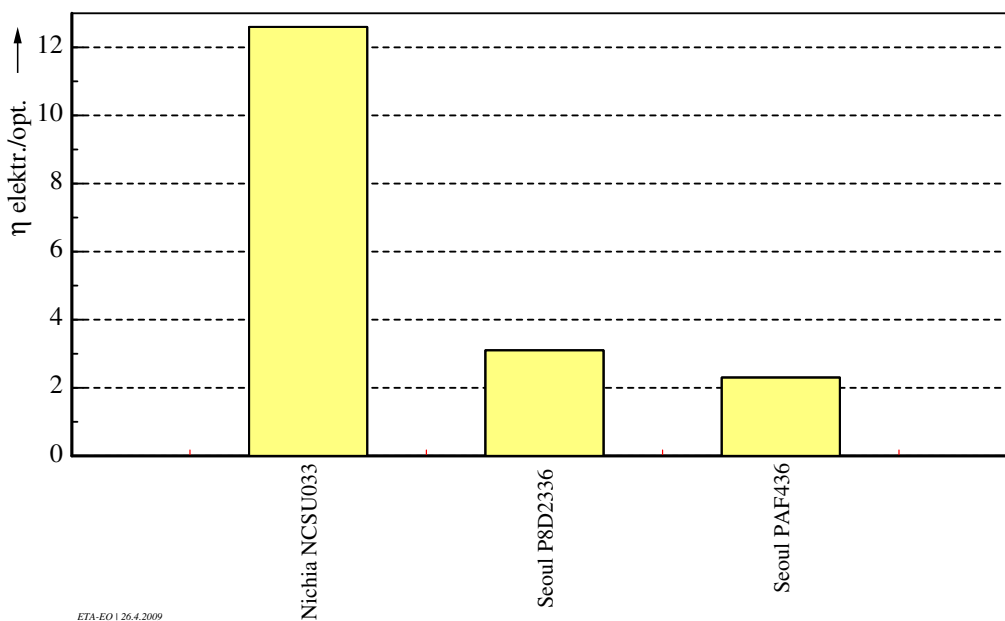


Abbildung 1: Elektrisch-optischer Wirkungsgrad $\eta_{\text{elektr./opt.}}$ von Produkten der Firmen Nichia und Seoul

chia UV-LED konnte auch bis kurz vor Projektende nicht völlig aufgeholt werden, wenn es auch weitere Ernst zu nehmende Mitbewerber gab. Der maximale elektrisch-optische Wirkungsgrad von Nichia-UV-LED bei 365 nm betrug zum April 2010 bereits 15,8 %.

Mitbewerber für UV-LED versuchten den Abstand im Wirkungsgrad durch günstigere Preise wettzumachen (Abbildung 2). Jedoch muss beim Entwurf immer das System ganzheitlich betrachtet werden. Niedrigere LED Preise wären dann immer mit einem erhöhten Aufwand im Wärmemanagement und größerem Energieeinsatz zu sehen. Aus diesen und insbesondere aus Gründen der Einsparung von Energie wurde das Konzept des Handstrahlern für den Einsatz der Nichia NCSU033 entworfen. Es wurde jedoch so flexibel gestaltet, dass UV-LED anderer Hersteller, wenn sie einmal ähnliche Wirkungsgrade erreichen sollten, die Nichia LED ersetzen können.

Die Fragestellung, ob zahlreiche LED mit kleiner optischer Leistung oder wenige Hochleistungs-LED eingesetzt werden sollen, wurde zugunsten der Hochleistungs-LED entschieden. Zwar sind die UV-LED kleiner Leistung teilweise mit eigenen Glaslinsen ausgestattet. Deren Divergenzwinkel sind mit ca. 15° aber noch zu groß, um ohne weitere zusätzliche Kollimations-Optik auskommen zu können. Der Montageaufwand wird bei deutlich über 200 LED zu hoch. Bezüglich der Effizienz entstehen keinerlei Vorteile. Außerdem ist bei einer solchen Anzahl eine individuelle Diagnostik nicht mehr praktikabel.

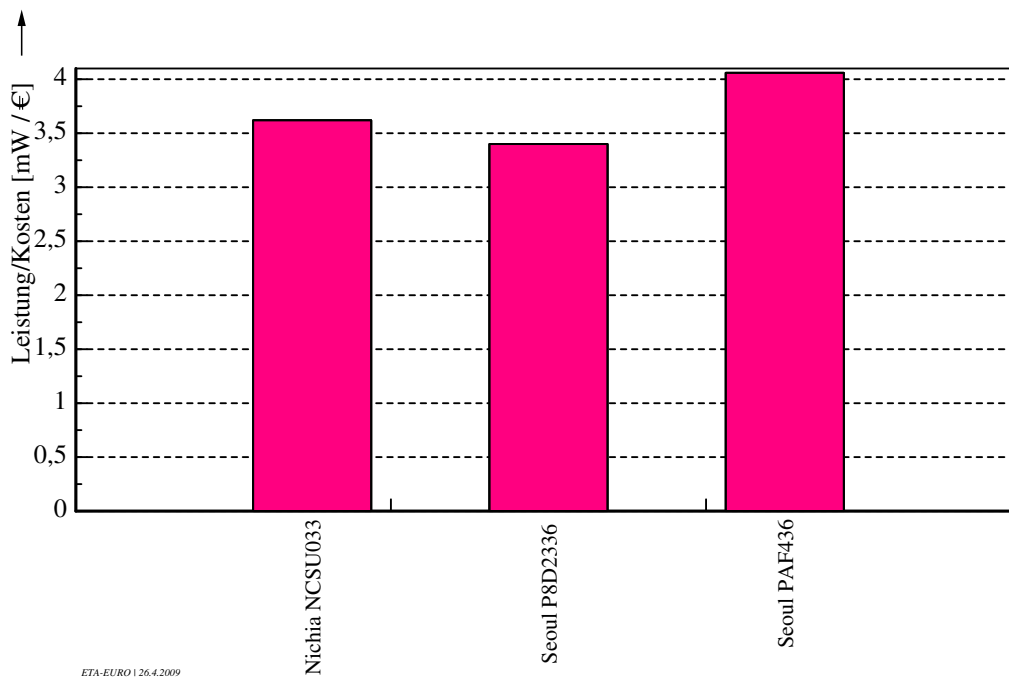


Abbildung 2: Kosten für optische Strahlungsleistung von Produkten der Firmen Nichia und Seoul

Weiterhin wurde die Möglichkeit ein einzelnes Chip-Array einzusetzen erwogen. Dieses war zum Zeitpunkt des Projektstarts von Nichia (mit hohem Wirkungsgrad) noch nicht verfügbar. Erst gegen Projektende bot Nichia ein solches Produkt mit entsprechenden Leistungsdaten an, weshalb diese Variante hier nicht berücksichtigt wurde.

3.2 Optisches System

3.2.1 Abbildende Optik

Die einzusetzende Optik hat die Aufgabe, die von den UV-LED üblicherweise im Winkel von 120° abgestrahlte optische Leistung zu kollimieren. Im Abstand von 400 mm soll ein Strahldurchmesser von 80 mm erzeugt werden. Das Strahlprofil soll möglichst homogen sein und darf keine Muster generieren. Beim optischen System sollen möglichst geringe optische Verluste entstehen, da diese den Gesamt-Wirkungsgrad ungünstig beeinflussen.

Um Optiken mit geringen Verlusten zu erstellen, wurden Konzepte mit hochreflektierende Parabolspiegeln erarbeitet. Beim Parabolspiegel befindet sich die Strahlungsquelle jedoch im Strahlengang und kann einen Teil der fokussierten Strahlung abschatten. Die LED hat zwar selbst geringe Abmessungen, der erforderliche Aufbau zu deren Entwärmung typischerweise jedoch nicht. Selbst diese Problematik kann konstruktiv umgangen werden, indem die LED mit ihrer Wärmesenke direkt auf eine Heat-Pipe mit geringem Querschnitt gelötet wird. Die Schmelztemperatur der meisten Lote mit unproblematischen Inhaltsstoffen liegt jedoch zu hoch um die Heatpipe durch den Lötvorgang nicht zu beschädigen. Auch hierbei ist der Einsatz bei niedriger Temperatur schmelzender Lote erforderlich.

Alternativ kann zur Kollimation der Strahlung ein Offset-Paraboloid erzeugt werden, bei dem die Strahlungsquelle außerhalb des kollimierten Strahls liegt. Die LED könnte somit einfach entwärmt werden. Letztendlich wurde die Kollimation mit Hilfe von Spiegeln deswegen verworfen, weil die

benötigten Formen und Werkzeuge für den Spritzguß in der erforderlichen optischen Qualität einen zu hohen Kostenfaktor bei den angepeilten Stückzahlen darstellen. Zu dieser Entscheidung hat auch beigetragen, dass eine einmal geschaffene Optik wenig Spielraum für weitere Änderungen bietet. Letztendlich liegen die erwarteten Verluste beim Einsatz einer Linsenoptik nur unwesentlich über denen der Spiegeloptik. Auch eine Lampe mit Spiegeloptik benötigt ein Schutzglas und zeigt damit teilweise die gleichen systematischen Reflexionsverluste einer Linsenoptik und bedarf deshalb einer Vergütung der Oberflächen.

Aus den genannten Gründen wurde eine Linsenoptik zur Strahlformung entworfen, deren Aufgabe es ist, möglichst die gesamte von der UV-LED emittierte Strahlungsleistung zu kollimieren. Deshalb müssen die Oberflächen der Linsen für die Emissionswellenlänge $\lambda_e = 365 \text{ nm}$ antireflex-beschichtet, d.h. vergütet werden. Ansonsten treten an jeder Grenzschicht Luft-Glas / Glas-Luft Reflexionsverluste von ca. 4 % auf.

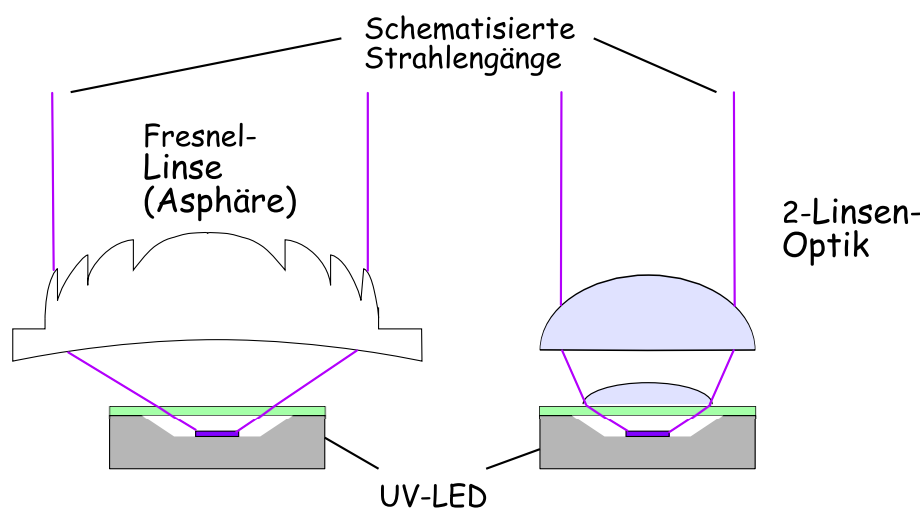


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Konzepte mit Linsenoptiken

Die LED-Chips weisen bezüglich der emittierten Strahlung einen Divergenzwinkel von ca. 120° auf. Das bedeutet, dass bereits eine in geringem Abstand von der LED platzierte Linse eine relativ große Apertur besitzen muss, um annähernd die komplette emittierte Strahlung formen zu können. Strahlungsanteile, die über die Apertur hinausgehen, werden vom metallischen Linsenträger diffus reflektiert und können nicht mehr auf den Prüfling fokussiert werden.

Eine einzelne Linse, die in geringem Abstand von der Strahlungsquelle montiert wird, muss eine entsprechend kurze Brennweite aufweisen, um den Strahl kollimieren zu können. Eine solche Linse mit großem Öffnungsverhältnis nimmt für eine gegebene Apertur eine große Dicke an, wenn sie nicht als Fresnel-Linse ausgeführt wird. Eine entsprechende Anordnung ist in der linken Skizze in Abbildung 3 gezeigt.

Alternativ kann eine Plan-Konvex-Linse direkt auf das Austrittsfenster der UV-LED geklebt werden (rechte Skizze in Abbildung 3). Wegen der Oberflächen-Welligkeit des Austrittsfensters ist hierfür ein UV-transparenter und UV-beständiger optischer Kleber als Füllmedium erforderlich. Beide in Abbildung 3 dargestellten Varianten werden bezüglich des Aufwands, der optischen Verluste und Strahlqualität als ähnlich eingeschätzt. Durch die zusätzliche Masse der aufgeklebten Linse reagiert die Befestigung der LED empfindlich auf hohe Beschleunigungswerte und kann abreißen. Hohe Beschleunigungswerte waren im Feldversuch durch Stoß der Lampe oder Sturz auf den Boden aufgetreten.

Letztendlich wurde jedoch die Variante mit der Fresnel-Linse umgesetzt. Abbildung 4 zeigt die eingesetzte Fresnel-Glaslinse, die für $\lambda_e = 365 \text{ nm}$ einseitig vergütet wurde. Eine beidseitige Vergütung ist wegen der strukturierten Oberfläche der Fresnel-Linse problematisch.

Bei der Fresnel-Linse handelt es sich um blankgepresstes Glas. Die Abmaße der Linse erwiesen sich bei den gelieferten Chargen als groß. Da zusätzliche Toleranzen bei der Montage der Strahlungsquelle auftraten, wurde die Strahlungsquelle justierbar konstruiert. Damit entsteht die Möglichkeit das Strahlprofil in gewissen Grenzen nachträglich zu beeinflussen.

In einem frühen Entwurf war die Anordnung der Strahlungsquellen noch unveränderlich. Dies führte zwar zum gewünschten homogenen Strahlprofil im normkonformen Messabstand von 400 mm. In der Anwendungspraxis wurde jedoch bei deutlich geringeren Abständen, typischerweise bei 200 -250 mm gemessen. Bei diesem Abstand konnten die Spots der einzelnen Strahlungsquellen deutlich unterschieden werden, das Strahlprofil wurde inhomogen (Abbildung 5).

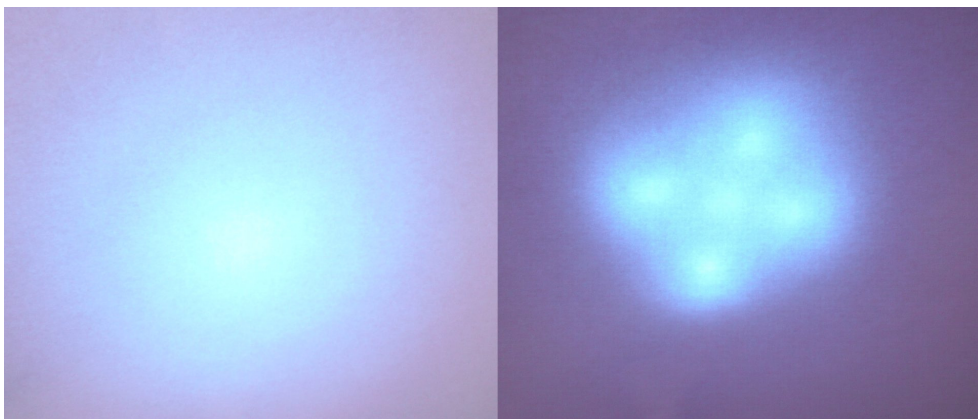


Abbildung 5: Strahlprofile im Abstand von 400 mm (linkes Bild) und 200 mm (rechtes Bild) der Handlampe mit unveränderlicher Ausrichtung der UV-LED

Das Strahlprofil wurde messtechnisch erfasst, um die Inhomogenität der Bestrahlungsstärke quantifizieren zu können. Dazu wurde die UV-Strahlung über eine fluoreszierende Fläche in Licht konvertiert. Das entstehende Bild wurde dann mittels einer CCD-Kamera aufgezeichnet und digitalisiert. Eine entsprechende Aufnahme des Strahlprofils in 200 mm Abstand von der Strahlungsquelle in der 3-D-Falschfarben-Darstellung ist in Abbildung 6 gezeigt.



Abbildung 4: Zur Kollimation eingesetzte Fresnel-Linse

Nach dem Überarbeiten der Handlampe war die UV-LED in 3 Achsen justierbar. So konnten sowohl die einzelnen Spots der UV-LED zueinander justiert werden, als auch eine Defokussierung durch Verändern des Abstands zwischen LED und Linse (Objektweite) erreicht werden. Die Auswirkungen der Objektweite auf das Strahlprofil ist in Abbildung 7 gezeigt. Die Objektweite vergrößert sich von links nach rechts zwischen den einzelnen Bilder jeweils um 1 mm. Die obere Reihe wurde im Abstand von 200 mm aufgenommen, die untere Reihe bei 400 mm.

Durch geeignete Justage gelang es das Strahlprofil für den gesamten Abstandsbereich zwischen 200 mm und 400 mm hinreichend homogen zu gestalten und Toleranzen bezüglich der Abmessungen auszugleichen. Das Strahlprofil der justierten Handlampe ist in Abbildung 8 gezeigt.

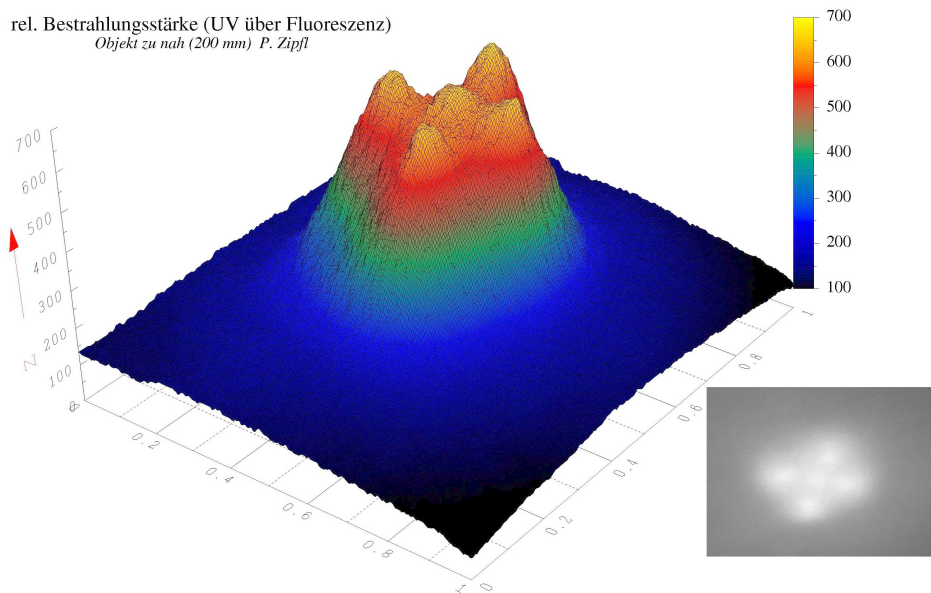


Abbildung 6: 3D-Falschfarben-Darstellung des Strahlprofils der Handlampe in 200 mm Messabstand

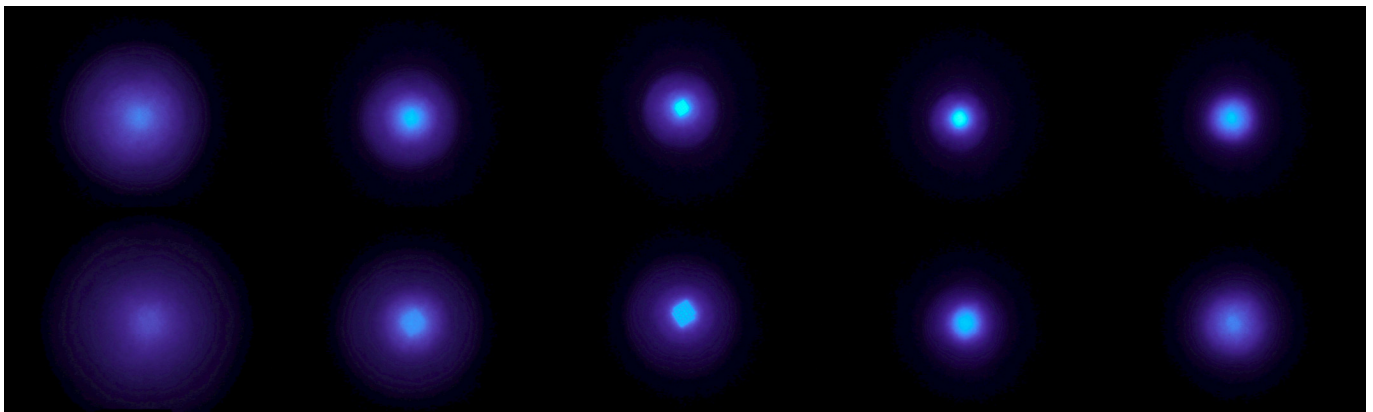


Abbildung 7: Auswirkungen der Objektweite auf das Strahlprofil einer einzelnen UV-LED (von links nach rechts um 1 mm zunehmend, Objektweite oben 200 mm, unten 400 mm)

3.2.2 Optische Filterung

Die im Sichtbaren emittierte Beleuchtungsstärke der Handlampe erreichte selbst bei der maximalen Bestrahlungsstärke im UV von $10.000 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ immer weniger als 20 lux und blieb dabei im zulässigen Bereich. Dennoch wurde dieser Wert bei einigen Applikationen während der Feldversuche von den Anwendern nicht akzeptiert.

Bei Prüflingen mit stark spiegelnden Oberflächen entsteht ein durch deren Form verzerrtes Spiegelbild der Handlampe. Insbesondere bei auf Dunkelheit adaptierten Betrachtern wirkte dieser Effekt so störend, dass keine sichere Prüfung mehr durchgeführt werden konnte. Eine seitliche Bestrahlung des Prüflings beseitigt zwar diesen Effekt. Diese Ausrichtung der Handlampe wurde jedoch von den Anwendern als ungewohnt und deshalb als störend empfunden. Daraufhin wurde die spektrale Bestrahlungsstärke der UV-LED gemessen und mit der Augenempfindlichkeit für Nachtsehen gewichtet. Diese Daten und die resultierende spektrale Verteilung der Beleuchtungsstärke ist in Abbildung 9 grafisch dargestellt.

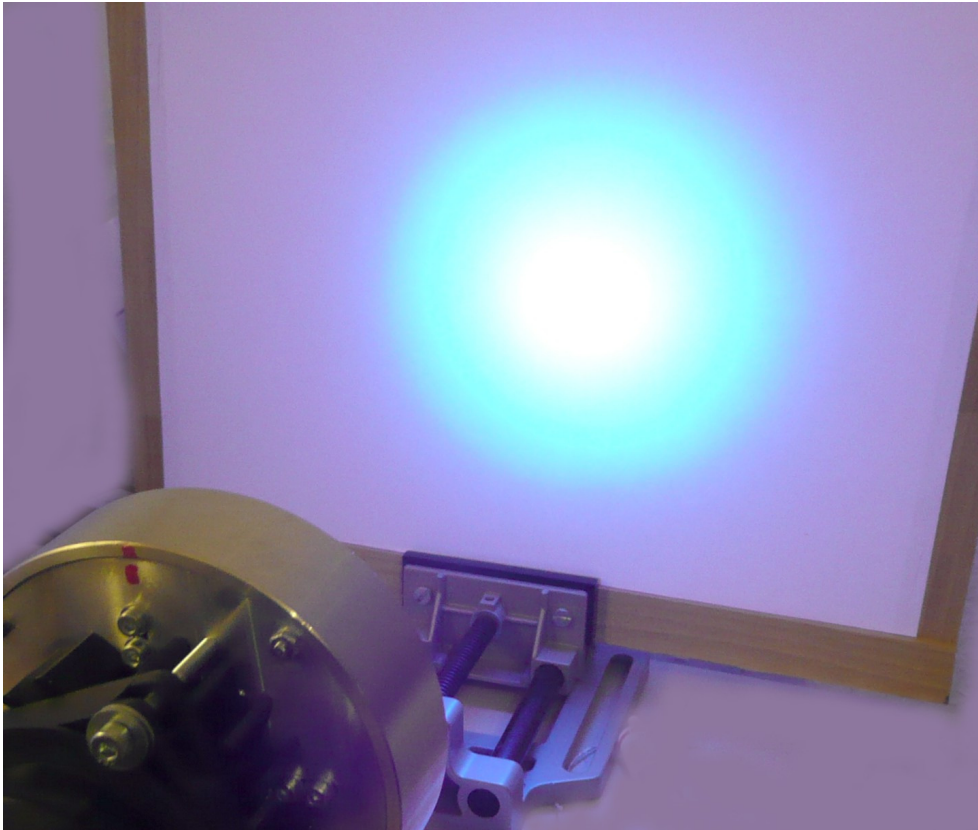


Abbildung 8: Strahlprofil der justierten Handlampe im Abstand von 200 mm

Die geringe spektrale Bestrahlungsstärke der UV-LED oberhalb von $\lambda_e > 400$ nm erzeugte den beschriebenen Störeffekt. Sie konnte mit dem optischen Bandpassfilter UG11 [Schott] oberhalb bei $\lambda_e = 400$ nm um den Faktor $4 \cdot 10^{-2}$ und oberhalb von 410 nm um mehr als 10^{-5} abgeschwächt werden. Damit war die Handlampe im Sichtbaren kaum noch wahrzunehmen. Die Bestrahlungsstärke reduziert sich durch diese Maßnahme jedoch um bis zu 20 %. Die entsprechenden Kennlinien sind in Abbildung 10 dargestellt.

Das erforderliche optische Bandpassfilter wurde direkt auf das optische Fenster der UV-LED geklebt. Aufgrund seiner geringen Dicke und Durchmesser besitzt es nur eine kleine Masse und beeinflusst die Montagefestigkeit der UV-LED bei großen Beschleunigungen nur minimal. Zudem erfordert die Platzierung des Filters an der Quelle den kleinsten Aufwand an Filtermaterial und beeinflusst die Kosten dadurch günstig.

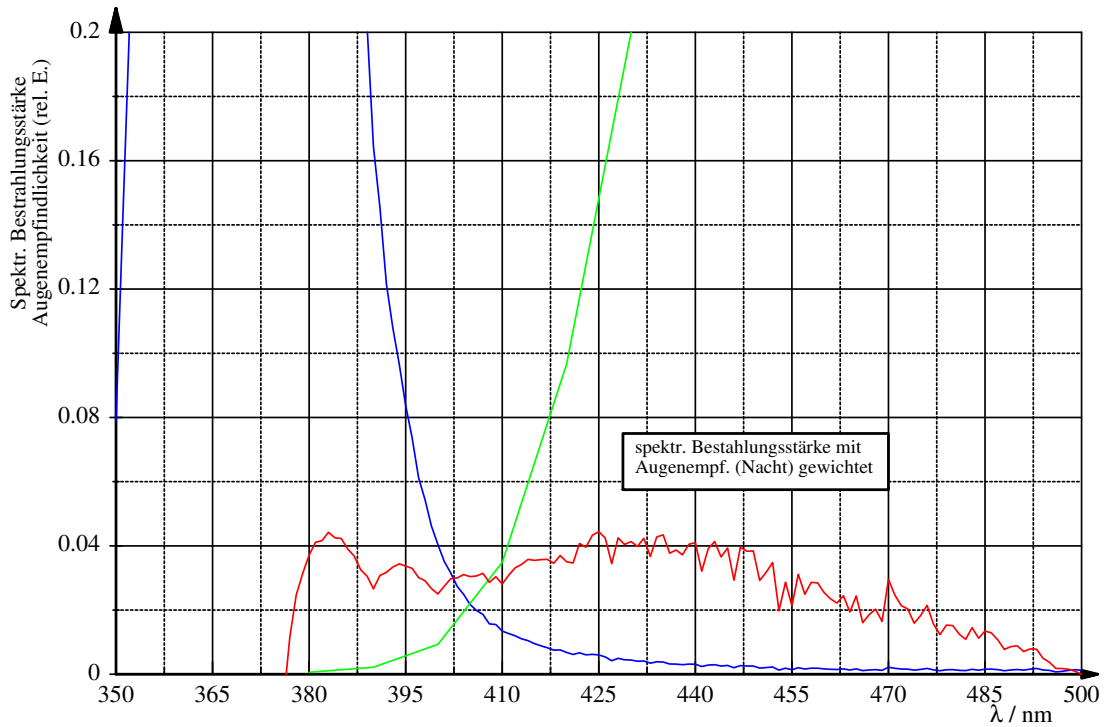


Abbildung 9: Spektrale Bestrahlungsstärke der UV-LED, Augenempfindlichkeit für Nachtsehen und Gewichtung beider Kurven

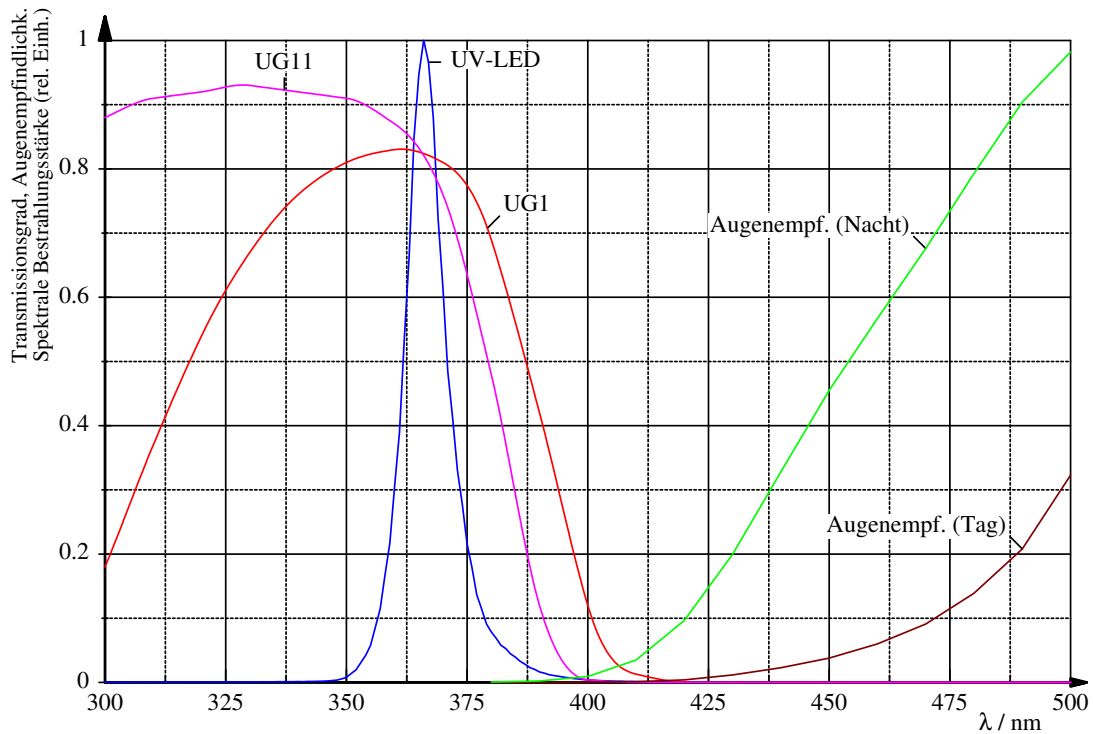


Abbildung 10: Spektrale Bestrahlungsstärke der UV-LED, Augenempfindlichkeiten für Tag- und Nachtsehen und Transmissionsgrade verschiedener optischer Bandpassfilter

3.3 LED-Ansteuerung

Zur elektrischen Ansteuerung der UV-LED mussten mehrere Randbedingungen erfüllt werden:

- Individuelle Ansteuerung
Diese soll in der Lage sein, etwaige Unterschiede im elektrisch-optischen Wirkungsgrad auch durch Degradation einzelner UV-LED ausgleichen zu können. Die individuelle Ansteuerung der UV-LED ist auch erforderlich, um eine individuelle Diagnose der LED durchführen zu können.
- Energieeffizienz
Die Ansteuerung der UV-LED soll mit einem hohen elektrischen Wirkungsgrad erfolgen, damit die Effizienzvorteile der LED nicht durch das Vorschaltgerät zunichte gemacht werden.
- Mehrspannungs-Betrieb
Die Handlampe sollte sowohl vom Netz als auch mit Akkus betrieben werden können. Eine längere Zuleitung vom Vorschaltgerät mit entsprechendem Leitungswiderstand sollte berücksichtigt werden.

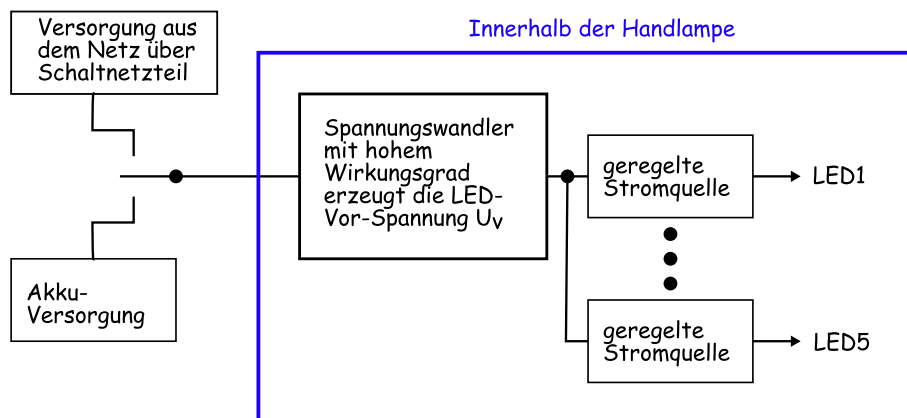


Abbildung 11: Konzept der Stromversorgung der Handlampe

Für die Realisierung der LED-Ansteuerung wurde ein mehrstufiges Konzept entworfen (Abbildung 11). Die erste Stufe befindet sich außerhalb der Handlampe in einem separaten Gehäuse. Die Handlampe kann dabei wahlweise über ein Schaltnetzteil aus dem Netz oder aus einer Akku-Einheit versorgt werden. Der Eingangsspannungsbereich für die Handlampe liegt zwischen 6 V und 20 V Gleichspannung. Damit ist innerhalb des möglichen Eingangsspannungsbereichs ein Betrieb mit unterschiedlichen Akku-Arten (NiMH, Li-Ion) möglich.

Die Gleich-Spannung für die Handlampe speist einen internen getakteten Spannungswandler mit hohem Wirkungsgrad von über 90 %, der die Vorspannung U_V für die LED-Einheiten in räumlicher Nähe zu diesen erzeugt um Leitungsverluste zu vermeiden.

In früheren Entwicklungsstadien wurde U_V noch außerhalb der Handlampe erzeugt und über eine Zuleitung zugeführt. Dies hatte jedoch einige Nachteile und führte zu erhöhten elektrischen Verlusten. Zum einen war bei Betrieb mit portablen Akkumulatoren (Akkus) die Bandbreite der möglichen Akku-Spannungen in dieser Variante sehr gering, da der Spannungsbereich für den Betrieb einzuhalten war. Meist musste die Anzahl der Zellen erhöht werden, um einen sicheren Betrieb der LED unter Berücksichtigung der Toleranzen der Durchlass-Spannungen zu gewährleisten. Die überschüssige Spannung und damit elektrische Leistung wurde über Spannungsregler in Wärme umgesetzt.

Zum anderen ist die Verbindungsleitung zwischen Schaltnetzteil bzw. Akku-Einheit und Handlampe nicht immer einheitlich. Sowohl der Querschnitt als auch die Länge der Leitung können variieren und damit ihr ohmscher Widerstand. Auch bei Versorgung aus dem Netz musste aus diesem Grund U_V , die Versorgungs-Spannung für die LED-Einheiten, ursprünglich etwas höher gewählt werden, um die Leitungsverluste auszugleichen.

Zudem war die Betriebsspannung für die Handlampe in der ursprünglichen Ausführung deutlich kleiner als im nachfolgenden Konzept. Dies hatte einen höheren Strom durch die Zuleitung und damit entsprechend größere Verluste darin zur Folge. Die Leitungsverluste lagen bei manchen Konfigurationen bei über 20 % der Betriebsleistung der Handlampe. Aus diesen Gründen sollte die Spannung für die Handlampe in der aktuellen Version beim Betrieb mit Schaltnetzteil insbesondere bei großen Leitungslängen und geringem Leitungs-Querschnitt möglichst groß gewählt werden.

Wie beschrieben, erzeugt eine getaktete Stromversorgung die Vorspannung U_V für die LED-Einheiten. Diese soll so klein wie möglich gewählt werden und setzt sich aus drei Spannungen zusammen:

$U_V = U_{LED} + U_{Stromqu.} + U_{Shunt}$. U_{shunt} ist der Spannungsabfall an dem Strom-Messwiderstand. U_{LED} ist die Durchlass-Spannung der UV-LED. Sie kann laut Hersteller [Nichia] beim Betriebsstrom $I_{LED} = 500\text{mA}$ Werte zwischen 3,2 V und 4,4 V annehmen. UV-LED sind diesbezüglich in drei Gruppierungen eingeteilt erhältlich. Innerhalb einer Gruppierung ist die Streubreite der Durchlassspannungen 400 mV. $U_{Stromqu.}$ ist die Klemmenspannung der steuernden Stromquelle.

Um möglichst effizient zu werden, muss U_V möglichst klein werden. Da mehrere UV-LED-Einheiten parallel an U_V betrieben werden, muss $U_{Stromqu.}$ bei derjenigen UV-LED-Einheit minimal werden, bei sich der größte Wert für U_{LED} einstellt und umgekehrt. Sind beispielsweise die Durchlass-Spannungen aller UV-LED identisch, so nehmen alle Klemmen-Spannungen der Steuer-Stromquellen ihre kleinstmöglichen Werte an. Diese sind jedoch durch die Sättigungs-Spannung des verwendeten Transistors zu kleinen Werten hin begrenzt.

Die direkte Ansteuerung jeder LED erfolgt demnach über eine geregelte analoge Stromquelle. Zwar erscheint hier eine getaktete Stromversorgung mit hohem Wirkungsgrad zunächst günstiger. Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit moderner Bipolar-Transistoren mit extrem geringen Sättigungsspannungen in Verbindung mit der Möglichkeit die Betriebsspannung U_V für die LED-Ansteuerung zu variieren, wird das analoge Konzept ebenso effizient. Die Verluste durch die individuelle Ansteuerung der LED reduzieren den Wirkungsgrad um ca. 10 % und liegen somit im Bereich guter getakteter Spannungswandler. Die hier beschriebene Realisierung ist jedoch wesentlich weniger aufwändig. Es werden aktuell fünf einzelne LED mit individueller Ansteuerung entsprechend Abbildung 12 parallel an U_V betrieben. Die Versorgungsspannung U_V der LED-Ansteuerung wird so niedrig wie möglich eingestellt, d.h. dass über der ansteuernden Stromquelle jeder UV-LED die kleinstmögliche Spannung $U_{Stromqu.}$ abfällt.

Wird die Handlampe aus dem Netz versorgt, wird ein elektrischer Gesamtwirkungsgrad von ca. 72 % erreicht. Bei dieser Abschätzung wurden das Schaltnetzteil, Spannungswandler im Lampengehäuse und LED-Stromquelle ($0,85 \cdot 0,94 \cdot 0,9 \approx 0,72$) berücksichtigt. Die Verluste der Zuleitung wurden hier nicht berücksichtigt. Die Steuerung der Konstantstromquellen für die UV-LED erfolgt linear über jeweils einen Digital-Analog-Wandler (DAC), der wiederum über den zentralen Mikro-Controller angesteuert wird.

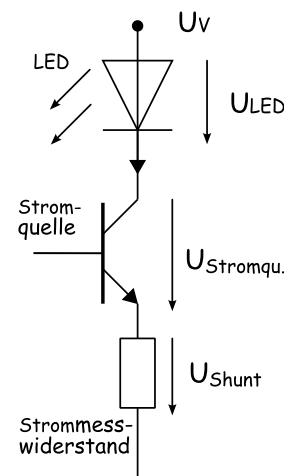


Abbildung 12:
UV-LED-Einheit
mit Ansteuerung

3.4 Diagnosefunktionen

3.4.1 Elektrische Messungen

Es werden zahlreiche Betriebsparameter der UV-Handlampe erfasst und verarbeitet. Zweck der Messungen sind zum einen eine konstante Strahlungsleistung der LED über die Lebensdauer der Lampe zu ermöglichen. Zum anderen sollen bevorstehende Frühausfälle von LED rechtzeitig erkannt werden. Damit wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben, immer normgerechte Untersuchungen durchzuführen und im Falle einer erforderlichen Wartung, diese rechtzeitig einplanen zu können. Wie zuvor dargestellt benötigt auch die Ansteuer-Einheit für die UV-LED entsprechende Messwerte um energetisch effizient zu arbeiten. Es werden die nachfolgenden Parameter erfasst:

- Strom durch jede UV-LED über U_{shunt}
- Klemmenspannung jeder UV-LED über $U_{\text{Stromqu.}}$, U_{shunt} und U_V
- Vorspannung U_V für alle LED-Einheiten
- Bezugspotenzial der LED-Platine gegenüber der Prozessorplatine
- Umgebungstemperatur der Luft im Innern der Handlampe
- Temperatur der Montageplatte der UV-LED
- In den Innenraum des Lampengehäuses reflektierte UV-Bestrahlungsstärke

Die Klemmenspannung der LED kann in Verbindung mit Temperatur der Montageplatte dazu verwendet werden, die Chiptemperatur zu ermitteln. Die Abhängigkeit der Klemmenspannung von der Temperatur beträgt $\frac{\Delta U_{\text{LED}}}{\Delta T} \approx -2,4 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$. Mit diesen Daten ist eine Überprüfung des thermischen Kontakts der LED möglich. Eine LED mit fehlerhafter Entwärmung zeigt eine deutliche Erhöhung ihrer Chiptemperatur gegenüber der der Montageplatte.

Die reflektierte UV-Bestrahlungsstärke ist ein Maß für die emittierte optische Leistung der einzugesetzten UV-LED. Dieser Parameter muss bei Inbetriebnahme einkalibriert werden und beim späteren Betrieb konstant geregelt werden. Mit der Kenntnis des Betriebsstroms und der LED-Temperatur lässt sich daraus auf den Grad der Degradation jeder LED schließen.

Steigt die Temperatur der Montageplatte über zulässige Grenzwerte hinaus, so kann die Strahlungsleistung der LED zunächst innerhalb der zulässigen Grenzen reduziert und ggf. die Lampe vollständig ausgeschaltet werden. Dem Anwender kann über eine Anzeige ein kritischer Betriebszustand mitgeteilt werden. Mit Hilfe der Messung des Potenzialunterschieds zwischen LED- und Prozessorplatine kann eine fehlerhafte Verkabelung zwischen diesen beiden Einheiten diagnostiziert werden. Alle Messwerte sind über eine Diagnose-Schnittstelle auslesbar. Die Betriebsparameter der Handlampe sind von außen per Software vom Hersteller einstellbar.

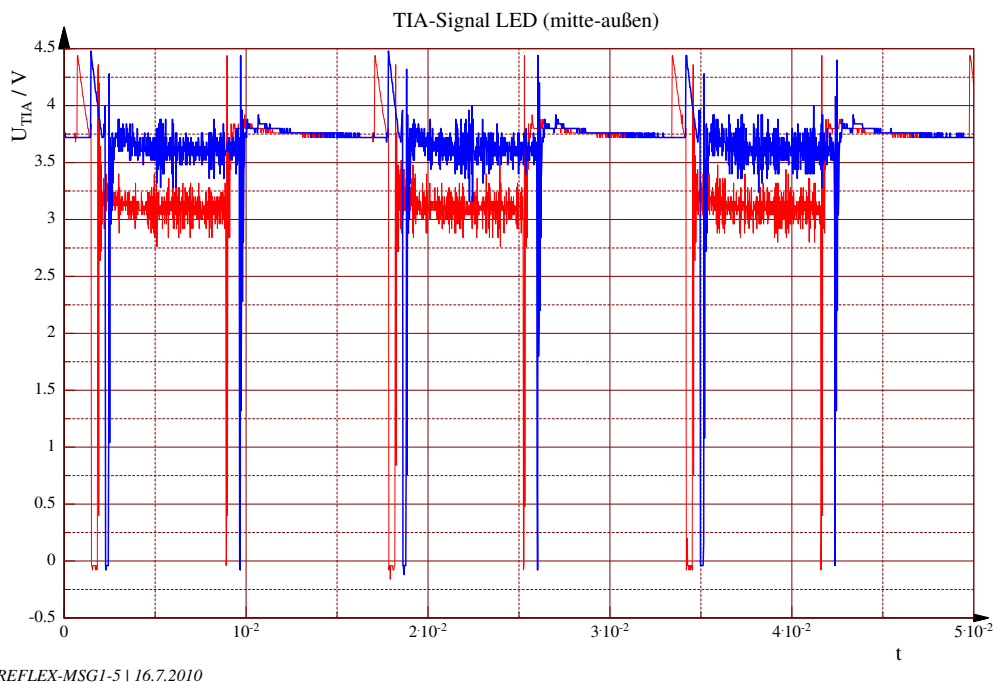


Abbildung 13: Signal aus UV-Reflexionen zweier LED

3.4.2 Optische Messungen

Ziel der optischen Messungen ist eine Erfassung der aktuell emittierten Strahlungsleistung der UV-LED mit Bezug auf emittierte Leistung zum Zeitpunkt der Herstellung. Dadurch soll eine etwaige Degradation der UV-LED frühzeitig erkannt werden. Bei beginnender Degradation ist eine LED zwar noch einsatzbereit. Ihr bevorstehender Defekt ist aber vorhersehbar und kann dem Anwender mitgeteilt werden.

Die optische Messung soll während des Betriebs durchgeführt werden. Eine Erfassung der gesamten emittierten optischen Leistung ist nicht praktikabel. Vielmehr soll ein geringer Teil der von der LED emittierten Strahlungsleistung erfasst werden. Dieser wird daraufhin mit dem unter gleichen Bedingungen erfassten Anteil zum Zeitpunkt der Auslieferung verglichen.

Die zu erfassende Messgröße ist die von den Linsen und der Innenseite des metallischen Linsenträgers diffus reflektierte Strahlung. Die Linsen reflektieren trotz Vergütung ca. 5 % der auf sie gestrahlten UV-Leistung. Auch wird aufgrund der Strahldivergenz der UV-LED ein Teil der Strahlung nicht auf die Linsen fokussiert. Diese Streustrahlung soll erfasst werden. Die Erfassung der UV-Strahlung erfolgt mit einer UV-empfindlichen Fotodiode, deren Signal durch einen Transimpedanz-Verstärker (TIA) für den Mikro-Controller verarbeitet wird. Idealerweise würde man je UV-LED eine Fotodiode verwenden, um diese optimal auf die Streustrahlung fokussieren zu können.

Die UV-empfindlichen Fotodioden sind jedoch so teuer, dass versucht werden muss, mit einer einzigen Fotodiode die Streustrahlung aller LED zu erfassen. Die UV-LED wurden zu diesem Zweck im Zeitmultiplex gepulst angesteuert und die entsprechende diffus reflektierte Bestrahlungsstärke am Ort der Fotodiode erfasst. Bei entsprechender Ausrichtung der Fotodiode wurden je nach Abstand der gerade vermessenen LED zur Fotodiode Bestrahlungsstärken zwischen $E_e = 5 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ und $85 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ gemessen. Die entfernten UV-LED liefern nur noch ein sehr kleines Signal und sind damit nicht mehr sicher bezüglich

der Degradation zu vermessen. Die Ausgangssignale des TIA einer der Fotodiode nahen und entfernten LED sind in Abbildung 13 gezeigt.

Zur Erhöhung des Anteils an diffus reflektierter Strahlung wurden Versuche mit Lichtleitern aus Glas (Abbildung 14), an die die Fotodiode angekoppelt wurde, durchgeführt.

Darüber hinaus wurden Flächen aus blankem Aluminium unter einem Winkel von 45° auf der Platine befestigt, um einen höheren Anteil der diffus reflektierten Strahlung auf die UV-Fotodiode zu lenken. Ein befriedigendes Ergebnis konnte jedoch in keinem Fall erzielt werden. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

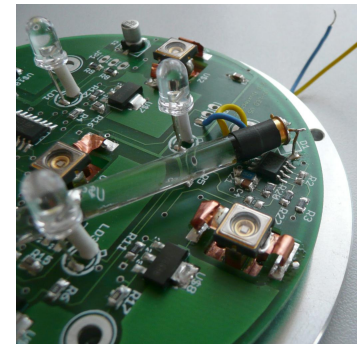


Abbildung 14: Ankopplung der UV-Fotodiode über Lichtleiter

3.5 Wärmemanagement



Abbildung 15: LED mit Montagesockel

Wird die Handlampe, wie vorgesehen, mit den Nichia NCSU033 ausgestattet, so muss pro LED ein Wärmestrom bis maximal ca. 2 W also insgesamt ca. 10 W + ca. 2 W für Spannungswandlung und Ansteuerung innerhalb der Handlampe abgeführt werden. Dabei sollte der Wärmewiderstand zwischen LED und Umgebung gering bleiben. Die LED selbst verursacht den Wärmewiderstand R_{thJC} zwischen Halbleiterchip und LED-Gehäuse. Dieser beträgt nach Herstellerangabe 7 K/W.

Der Montagepunkt der LED muss in Anhängigkeit der Anwendung und aufgrund von Toleranzen räumlich verändert werden können. Deswegen wurden die LED mit ihrer Wärmesenke auf Kupfersockel mit einer verhältnismäßig großen Montagefläche gelötet (Abb. 15), um einen geringen Wärme-Übergangswiderstand auf den LED-Träger zu ermöglichen. Der Sockel besitzt dadurch eine nicht zu vernachlässigende Wärmekapazität.

Nichia erlaubt für die UV-LED eine Erwärmung, wie sie zum Löten mit üblichem bleifreien Lot erforderlich ist, auf bis zu 240°C nur für maximal 10 Sekunden. Würden die LED zu lange auf hohe Temperaturen gebracht, droht deren vorzeitige Alterung (Degradation).

Weil die Wärmekapazität der Sockel so groß ist, um sie mit moderaten Wärmeströmen hinreichend schnell auf die Schmelztemperaturen von üblichen bleifreien Loten zu erwärmen, wurde ein Lot mit sehr geringem Schmelzpunkt auf BiSn-Basis eingesetzt. Zum Lötverhalten der LED mit niedrig schmelzenden Loten wurden umfangreiche Versuche angestellt. So war beispielsweise die Festigkeit nach dem Lötvorgang der spröden Lote von Interesse (Abb. 16). Weiterhin wurde das Flussverhalten der Lote untersucht, weil sich bei nicht perfekter Dosierung schnell Kurzschlüsse einstellen. Das Flussverhalten zweier verschiedener Lote bei gleicher Erwärmung zeigt Abbildung 17.

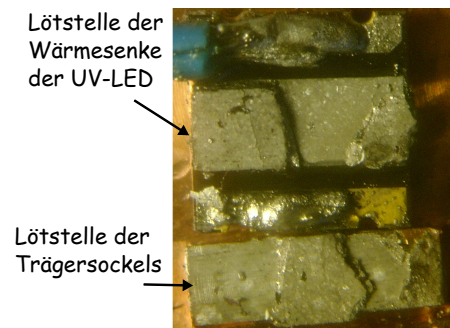


Abbildung 16: Gebrochene Lötstelle

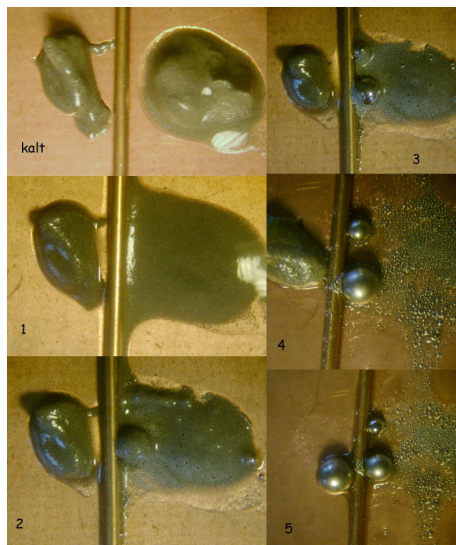


Abbildung 17: Flußverhalten zweier BiSn-Lote (links/rechts des Stegs) bei verschiedenen Temperaturen

Lote auf Indium-Basis sind ebenfalls Niedertemperatur-Lote. Zwar weisen Lote auf Indium-Basis in der Regel die bessere Wärmeleitfähigkeit auf. Wegen der deutlich geringeren Kosten wurden jedoch Lote auf BiSn-Basis favorisiert.

Um einen geringen Wärmewiderstand bei der Entwärmung des Lampengehäuses zu erreichen, wurde es anfangs mit Luftschlitzen zum Luftein- und Auslass versehen (offenes Gehäuse). Ein Lüfter sorgt für erzwungene Konvektion. Im Feldversuch in stark verschmutzter Umgebung entstand der Wunsch nach einem komplett geschlossenen Gehäuse, da insbesondere elektrisch leitende Verunreinigungen der Elektronik und dem Lüfter schaden können. Die Luftschlitze wurden dafür entfernt, der Lüfter aber beibehalten. Er sorgt dann für eine im Gehäuse zirkulierende Konvektion. Beide Gehäusevarianten können entsprechend dem Einsatzbereich verwendet werden.

3.5.1 Offenes Gehäuse

Für den Weg des Wärmestroms zwischen LED-Chip und Umgebung beim offenen Gehäuse ergibt sich das vereinfachte thermische Modell nach Abbildung 18. Der überwiegende Teil der Verlustwärme wird über erzwungene Konvektion nach außen an die Umgebung abgeführt. Dies ist im Modell durch den thermischen Widerstand R_{thCAA} beschrieben. Parallel dazu folgt ein Teil des Wärmestroms über Wärmeleitung und erzwungene Konvektion auf die Innenwandung des Gehäuses (R_{thCD}) und wird von dort über natürliche Konvektion und Strahlung (R_{thCA}) an die Umgebung abgegeben.

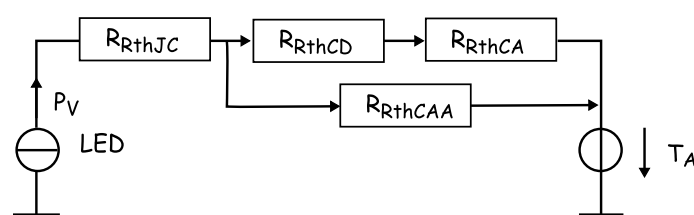


Abbildung 18: Vereinfachtes thermisches Modell des offenen Gehäuses

Die Erwärmung der LED-Montageplatte im Lampengehäuse gegenüber der Umgebung wurde mit lediglich 8,5 K gemessen. Das entspricht einem Wärmewiderstand $R_{thCA} = (R_{thCA} + R_{thCD}) || R_{thCaA}$ von weniger als 0,7 K/W. Zwischen LED-Gehäuse und Montageplatte kommt noch einmal 1 K/W für die Wärmeleitung für jeden LED-Montagesockel hinzu. Somit erwärmt sich der LED-Chip gegenüber der Umgebung um $\Delta T_{JA} = 24,5$ K

3.5.2 Geschlossenes Gehäuse

Für den Weg des Wärmestroms zwischen LED-Chip und Umgebung ergibt sich beim geschlossenen Gehäuse das vereinfachte thermische Modell nach Abbildung 19.

Bei diesem Konzept wird ein Teil des Wärmestroms von der LED-Trägerplatte über erzwungene Konvektion mittels Lüfter an die Innenseite des Lampengehäuses gebracht. Ein weiterer Teil gelangt über Wärmeleitung dort-

hin. Beide Mechanismen sind in R_{thCD} zusammengefasst. Von der Gehäuse-Innenseite gelangt der Wärmestrom über Wärmeleitung mit einem vernachlässigbarem Wärmewiderstand auf die Gehäuse-Aussenseite. Von dort kann der Wärmetransport nur über Strahlung und natürliche Konvektion an die Umgebung erfolgen (R_{thCA}). Die Temperatur der LED-Montageplatte erhöhte sich bei sonst gleichen Betriebsparametern gegenüber der offenen Version des Lampengehäuses um bis zu 31 K.

Bei der blanken Aluminium-Oberfläche der Lampengehäuse wurde ein Emissionsgrad von ca. 0,05 gemessen (Abbildung 20, linkes Bild). Damit erwärmt sich der LED-Chip bei dieser Variante gegenüber der Umgebung um $\Delta T_{JA} = 55,5K$. Eine solche Erwärmung reduziert die Lebensdauer um den Faktor 2 - 4.

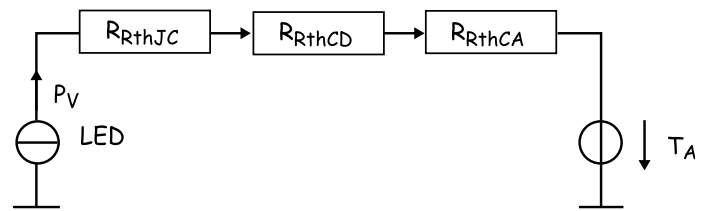


Abbildung 19: Vereinfachtes thermisches Modell des geschlossenen Gehäuses

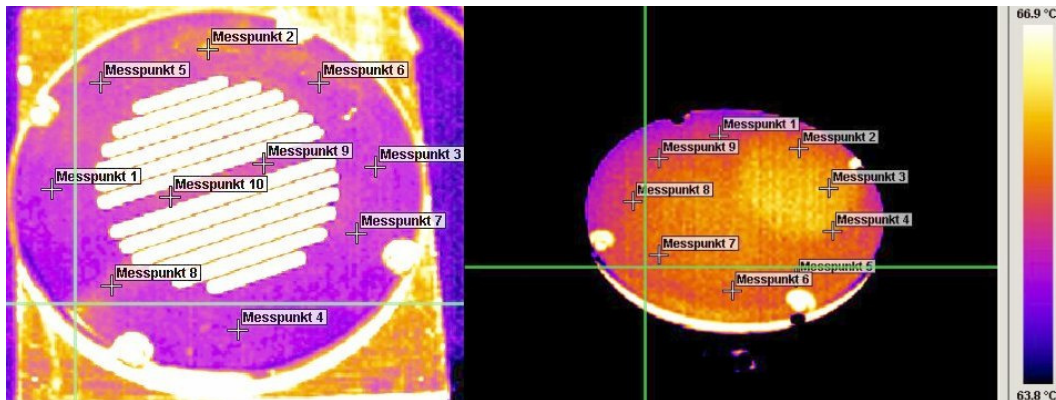


Abbildung 20: Thermografische Aufnahmen der Lampendeckel

Aus der Simulation ergab sich im Fall der blanken Aluminium-Oberfläche mit dem Emissionsgrad von 0,05 eine Temperaturdifferenz zwischen Gehäuse-Oberfläche und Umgebung von ca. 33 K. Der Anteil der Strahlung am Wärmestrom beträgt dabei nur ca. $\frac{1}{12}$ dessen für natürliche Konvektion. Deshalb erschien die Verringerung des thermischen Widerstands für Strahlung durch Vergrößerung des Emissionsgrads der Oberfläche als praktikabel. Es wurden unterschiedliche Beschichtungen der Aussenseite des Lampengehäuses simuliert, hergestellt und thermografisch vermessen (Abbildung 20). So konnten Oberflächen mit einem Emissionsgrad von 0,95 erreicht werden. Die Temperaturerhöhung der Trägerplatte gegenüber der Umgebung beträgt bei beschichtetem Gehäuse dennoch 21,5 K, im Gegensatz zu den 8,5 K bei der offenen Version. Damit erwärmt sich der LED-Chip gegenüber der Umgebung um $\Delta T_{JA} = 37,5K$.

Die Temperaturmessung zeigt beim Emissionsgrad von 0,95 eine Temperaturdifferenz zwischen Gehäuse-Oberfläche und der Umgebung von ca. 14 K. Die thermische Simulation ergibt dabei, dass der

Anteil des durch Strahlungsaustausch übertragenen Wärmestroms dabei etwa doppelt so groß ist, wie der Anteil durch natürliche Konvektion. Im Falle des Einsatzes des geschlossenen Gehäuses sollte die Lampenoberfläche unbedingt mit hohem Emissionsgrad versehen werden.

3.6 LED-Lebensdauer

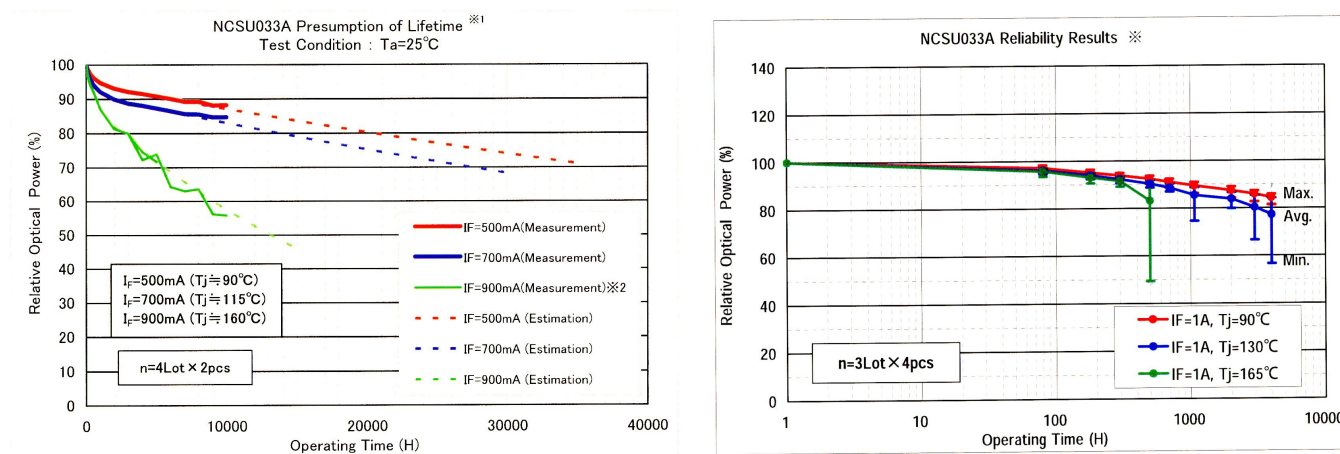


Abbildung 21: Kennlinien zur Lebensdauer der Nichia NCSU033A

Die Lebensdauern der UV-LED sind stark von der Chip-Temperatur und von der Stromdichte im Betrieb abhängig. Die Herstellerdaten sind bezüglich der Lebensdauern jedoch nur mit kleinen Losen ermittelt worden. Zwei entsprechende Grafiken sind in Abbildung 21 gezeigt. Aus den Daten lässt sich mit der entsprechenden Unsicherheit aufgrund der Losgröße etwa eine Halbierung der Lebensdauer für eine Erhöhung der Chiptemperatur von ca. 20 K ableiten. Bei Leistungs-LED im sichtbaren Bereich liegt dieser Wert sogar bei nur ca. 10 K [Philips].

Die LED gelten als ausgefallen, wenn ihre Strahlungsleistung auf unter 80 % des Nennwerts abgefallen ist. Dies ist bei der NCSU033A bei einem Betrieb mit 500 mA und einer Chiptemperatur von $\vartheta_j = 90^{\circ}\text{C}$ erst nach 20.000 Betriebsstunden der Fall. Um diese Chiptemperatur zu erreichen, muss die Temperatur des LED-Gehäuses 76°C und die der Trägerplatte lediglich ca. unter 74°C bleiben. Dies ist bei der Handlampe unter Nenn-Betriebsbedingungen sogar mit dem geschlossenen Lampengehäuse bis zu einer Umgebungstemperatur von $34,5^{\circ}\text{C}$ erreichbar. Im Falle des offenen Lampengehäuses mit einer maximalen Umgebungstemperatur von 35°C dürfte die Lebensdauer der LED auf über 50.000 Stunden ansteigen.

3.7 Mechanische Konstruktion

Das Gehäuse der Handlampe besteht im Wesentlichen aus Aluminium. Der Lampenkopf nimmt die 5 Fresnel-Linsen der LED-Optik und 4 Weisslicht-LED auf. Die Trägerplatte (LED-Halteplatte) nimmt die LED-Platine und die UV-LED samt Sockel auf. Auf deren Rückseite befinden sich ein Luft-Wärmetauscher (Kühlkörper) mit Lüfter. Dieser saugt die Kühlluft über zwei seitlich im Gehäuse angebrachte Luftschlitze an, leitet sie über den auf dem rücksichtig am LED-Träger angebrachten Kühlkörper und bläst sie auf der Rückseite des Gehäuses aus.

Alternativ wurde für den Betrieb in verschmutzter Umgebung eine geschlossene Variante entworfen. Hier fehlen die Luftschlitze für Ein- und Auslass. Stattdessen wird im Innern des Gehäuse ein zirkulierender Luftstrom vom Kühlkörper zurück über die Innenseite des Gehäuses erzeugt. Von der Innenseite

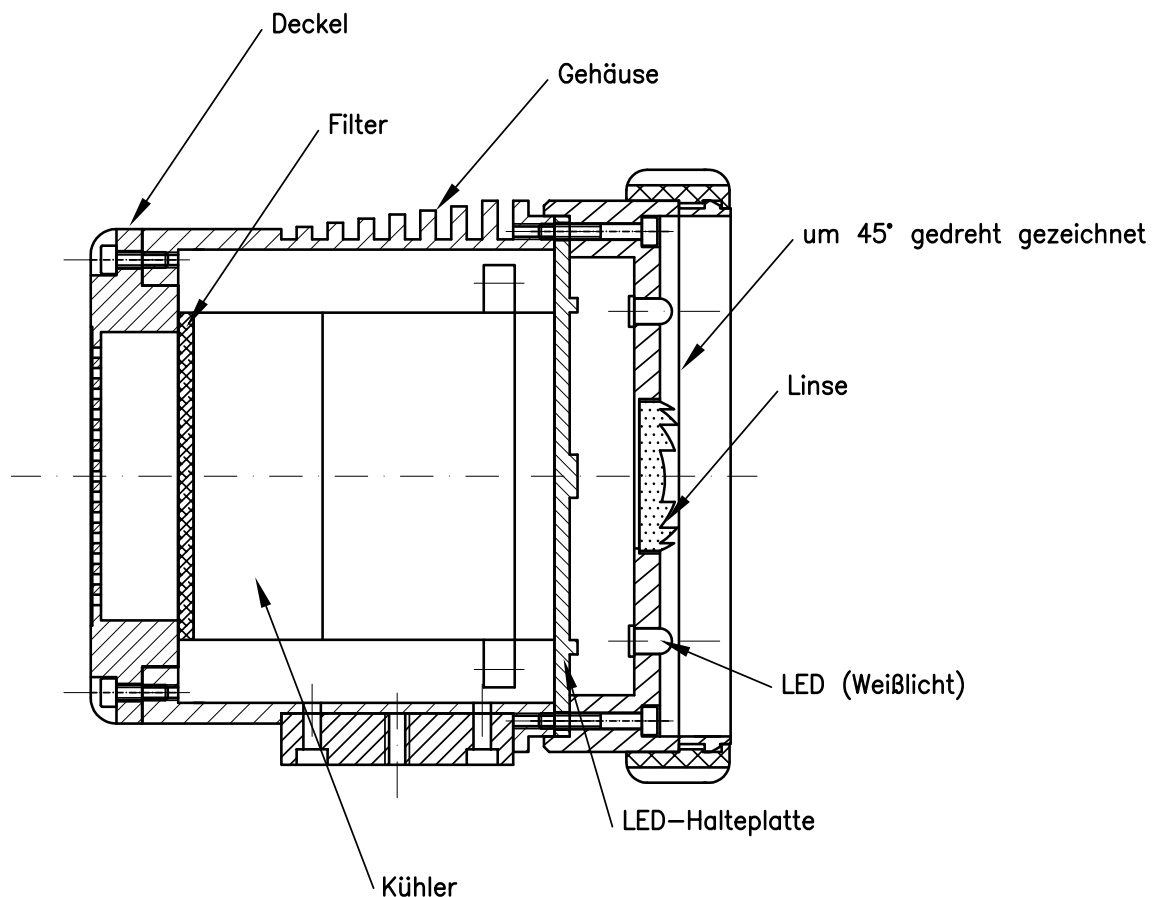


Abbildung 22: Zusammenbauskitze des Lampengehäuses

gelangt der Wärmestrom durch Wärmeleitung auf die Aussenseite und muss über natürliche Konvektion und Strahlung von dort abgeführt werden. Dies erfordert eine zusätzliche Beschichtung mit einem hohen Emissionsgrad (Eloxieren, Lackieren) der Gehäuse-Aussenseite.

Obwohl absolut leichter als das Vorgängermodell mit Entladungslampe, wurde das neue Handstrahler-Gehäuse vom Anwender als subjektiv schwer empfunden. Entsprechende Reduktion der Wandstärke und Ersatz der ursprünglichen Kupfer-Trägerplatte (Abb. 23) durch eine aus Aluminium, lies das Gesamtgewicht auf unter 1 kg sinken. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass sich die Gehäuseteile aus Halbzeugen mit geringem Materialabtrag herstellen lassen. Die standardmäßig verfügbaren Abmessungen haben dazu geführt, dass das freie Volumen im Lampeninnern sehr knapp für die Elemente zur Luftführung und Steuerelektronik bemessen ist.

3.8 Feldversuche und Redesign

Die erste Ausführung der Handlampe, mit der Feldversuche durchgeführt wurden, enthielt 5 UV-Led, die auf einer Kupferplatte fest, also nicht verschiebbar montiert waren (Abbildung 23). Bei diesem Aufbau waren die UV-LED sowohl über die elektrischen Anschlüsse starr mit der Platine, als auch mit dem Kontakt der Wärmesenke starr mit dem Kupferträger verbunden.

Im Feldeinsatz entstanden teilweise hohe Beschleunigungswerte der Lampe durch Stöße. Diese bewirkten eine Verschiebung der LED-Trägerplatine relativ zum Kupferträger und damit mechanische

Spannungen in den UV-LED als Verbindungsglieder zwischen beiden Komponenten. Die UV-LED besitzen keine Anschlussdrähte um etwaige mechanische Kräfte durch Verformung aufnehmen zu können und rissen dadurch. In späteren Varianten wurden die UV-LED deshalb elektrisch über dünne Kupferbänder (Abb. 14) kontaktiert.

Die Lampe wurde in der ursprünglichen Version mit fixierter Optik ausgeführt. Diese wurde für einen Prüfabstand von 400 mm optimiert, bei dem entsprechend der Norm die Werte für die Bestrahlungsstärke zu bestimmen sind. In der Praxis wurde der Prüfabstand von den Anwendern in der Regel mit bis zu 200 mm deutlich kürzer gewählt. Bei diesem geringen Prüfabstand verfügte die Lampe jedoch nicht mehr über ein homogenes Strahlprofil. Aus diesem Grund wurde die Befestigung der UV-LED bei nachfolgenden Versionen variabel ausgeführt. Die UV-LED ließ sich sowohl in zwei Achsen gegenüber der Optik verschieben, als auch im Objektabstand verändern. Mit der Ausrichtung der LED zur Optik lassen sich die Strahlungspots der einzelnen LED passend zueinander anordnen. So kann ein weitgehend homogenes Strahlprofil in einem weiten Bereich für die Prüfabstände erzeugt werden. Durch Veränderung des Objektabstands kann der Strahlungspot mehr oder weniger defokussiert und damit diffus eingestellt werden. Entsprechende Strahlprofile an den Bereichsgrenzen für den Messabstand sind in Abhängigkeit des Fokus in Abbildung 7 gezeigt.

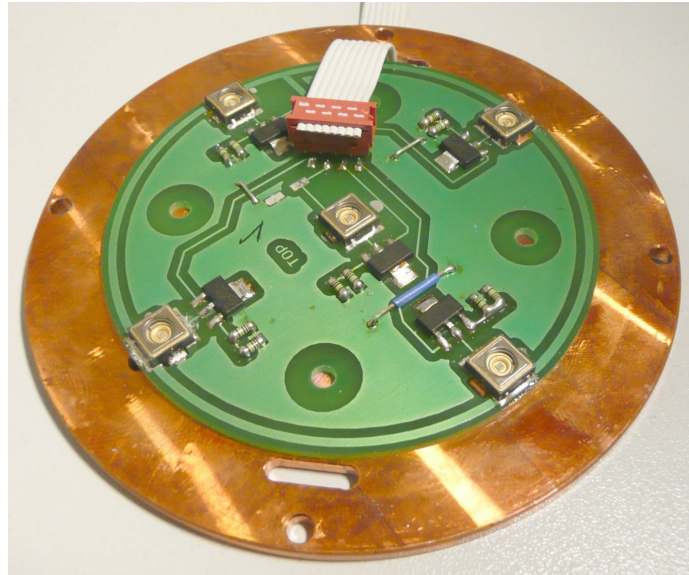


Abbildung 23: Kupferträger mit UV-LED mit starrer Verbindung

4 Fazit

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine sehr energieeffiziente, einfach zu handhabende UV-Handlampe geschaffen. Die wesentlichen, im Lastenheft festgelegten Anforderungen konnten erfüllt werden. Die Bestrahlungsstärke wird auf den maximalen Wert für die Risikogruppe 2 der Richtlinie EM6 nach DGzFP von $10.000 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ elektronisch abgeregelt. Eine umfangreiche Diagnostik der UV-LED ermittelt deren aktuellen Zustand. Durch die Fortschritte beim Wirkungsgrad von UV-LED benötigen Geräte mit neueren LED immer weniger Betriebsleistung. Dadurch ist der abzuführende Wärmestrom sehr gering. Dennoch wurde eine Entwärmung mit kleinem thermischen Widerstand entwickelt, was der Lebensdauer der UV-LED zugute kommt. Aussagekräftige Daten zur Lebensdauer sind derzeit noch nicht verfügbar. Aus den vorhandenen Information wird die Lebensdauer der UV-LED aus neuerer Produktion abhängig von den entworfenen Gehäusevarianten (offen oder geschlossen) auf ca. 20.000 bis 50.000 Betriebsstunden geschätzt.

Insbesondere bei den Feldversuchen entstanden teilweise neue Vorgaben, die bei der ursprünglichen Konzeption der Handlampe noch nicht berücksichtigt worden waren. Für den Einsatz in verschmutzter Umgebung wurde ein geschlossenes Gehäuse gewünscht. Bewegte Teile, wie der Lüfter und die Elektro-nikeinheit verschmutzten zu schnell. Mit künftig steigenden Wirkungsgraden bei UV-LED muss immer

weniger Wärme abgeführt werden. Die geschlossene Gehäusevariante wird dann vermutlich keine gravierenden Nachteile bezüglich der Lebensdauer der UV-LED zeigen und das offene Gehäuse generell ersetzen.

Obwohl der im Sichtbaren emittierte Strahlungsanteil unterhalb der zulässigen Grenze lag, wurde dieser von einigen Anwendern nicht akzeptiert. Wurden spiegelnde Oberflächen geprüft, so erzeugten diese ein entsprechend verzerrtes Spiegelbild der Handlampe. Dieses überlagerte sich dem Fluoreszenzbild auf dem Prüfling und wurde als sehr störend empfunden. Zwar konnte dieser Effekt durch die Position der Handlampe zum Objekt minimiert werden. Dies wurde aber als Nachteil in der Handhabung gesehen. Hinzu kommt, dass bei der entworfenen Handlampe die Strahlung aus einer kleineren Fläche als bei der ursprünglichen Entladungslampe, nämlich aus den Linsenöffnungen emittiert wird. Die spezifische Ausstrahlung der LED-Lampe steigt dadurch lokal gegenüber der Entladungslampe an. Das Spiegelbild erscheint dann deutlich heller. Hier wird auch beim Einsatz von UV-LED weiterhin ein zusätzliches optisches Bandpassfilter notwendig sein.

Für künftige Anwendungen sollte eine Variante mit LED-Array als Strahlungsquelle in Verbindung mit einem Parabolspiegel geprüft werden. Eine Diagnostik einzelner LED des Arrays ist dann allerdings nicht mehr möglich. Wenn sich die Zuverlässigkeiten von UV-LED denen von LED im Sichtbaren annähern, kann sicherlich auf eine umfangreiche Diagnostik verzichtet werden. Leider ist die Datenbasis dieses relativ neuen Bauteils, mit im Vergleich mit LED im Sichtbaren deutlich geringeren Stückzahlen noch sehr dünn. Erst die Erfahrung mit den UV-LED-Handlampen im Einsatz wird diese Information im Laufe der Zeit liefern. Die Sorge um die Lieferbarkeit von UV-LED mit hohem Wirkungsgrad hat sich im Verlauf des Vorhabens teilweise begründet. So waren zumindest LED mit den zwei höchsten Gruppierungen bezüglich des Wirkungsgrads für uns nicht mehr verfügbar. So sollte auch bei künftigen Entwicklungen eine hohe Flexibilität bei den einsetzbaren LED berücksichtigt werden.

Das Potenzial der guten Steuerbarkeit von LED wurde noch nicht ausgeschöpft. Es sollte künftig geprüft werden, ob die erforderlichen Bestrahlungsstärken und die Exposition von Personen der UV-Strahlung mit Verfahren des Maschinensehens in Verbindung mit Bildverarbeitung vermindert werden können. Fest installierte Prüfstrahler hoher Leistung können von diesem Ansatz besonders profitieren. Dies würde eine weitere Verminderung des Bedarfs an elektrischer Betriebsleitung in Aussicht stellen.

Literaturverzeichnis

- [Lem10] Lemme, Helmut: Optomeßtechnik: LED-Detektive auf Fehlersuche, Elektronik, 12/2010, S.38 ff., Weka Fachmedien
- [BGI5006] Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (Hrsg.): Expositionsgrenzwerte für künstliche optische Strahlung, Oktober 2004
- [Schott] Schott: Glass Filters, 2009
- [Nichia] Nichia Corporation: SPECIFICATIONS FOR NICHIA CHIP TYPE UV LED MODEL : NC-SU033A(T)
- [Philips] Philips: Understanding power LED lifetime analysis, Technology White Paper

K+D Flux-Technic GmbH + Co. KG

Mechanische und elektronische Entwicklung einer energieeffizienten
UV-LED-Handlampe zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung

UV-LED-Handlampe

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt

gefördert unter AZ 27098 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Rupert Dangelmayr und Peter Zipfl

Mögglingen, 11. August 2010