Abschlussveröffentlichung

zum KMU-Innovativ Verbundprojekt:

Flexibel skalierbare Hochleistungs-UV-LED-Module mit Maximaler Leistungs-Dichte für die Produktion von organischer und gedruckter Elektronik“

(MLD-LED)"

der Verbundpartner:

IST METZ GmbH, Nürtingen (Verbund-Koordinator)

Micro-Hybrid Electronic GmbH, Hermsdorf

Novaled AG, Dresden

Optotransmitter-Umweltschutz-Technologie e.V. (OUT e.V.), Berlin,

Gefördert vom BMBF im Rahmenprogramm "Forschung für die Produktion von Morgen"

BETREUT VOM

PTKA Projektträger Karlsruhe im Karlsruher Institut für Technologie

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Inhalt

Seite

1. Einleitung und Aufgabenstellung 3

1.1 Einleitung 3

1.2 Aufgabenstellung 4

2. Stand der Wissenschaft und Technik sowie Lösungsansatz 5

2.1 Stand der Wissenschaft und Technik 5

2.2 Lösungsansatz 6

3. Erzielte Ergebnisse 8

3.1 Optotransmitter-Umweltschutz-Technologie e.V. (OUT e.V.): Optimale Entwärmungsperipherie 8

3.2 Micro-Hybrid Electronic GmbH: Aufbau- und Verbindungstechnik 20

3.3 IST METZ GmbH: Entwicklung DC-Elektronik, Skalierbarkeit, Steuerung 25

3.4 Novaled AG: OLED Verkapselung mit UV-LED-Modulen 30

4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse 37

5. Danksagung 37

1. Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Einleitung

Die mit etablierten Druckverfahren (z.B. Sieb-, Tief-, Flexo- oder Inkjet-Druckverfahren) aus leitfähigen Polymermaterialien produzierten elektronischen Schaltungen (Organische Elektronik) und Photovoltaik-Solarzellen (Organische Photovoltaik bzw. OPV) bieten großes Potential für neue, kostengünstige technische Lösungen bzw. Produkte zur umweltschonenden Energieerzeugung aus Sonnenstrahlung. Durch großflächige Massendruckverfahren, z.B. in Rolle-zu-Rolle-Technologie, und die Verwendung von PET-Folie als Substratmaterial können organische Schaltungen und OPV-Zellen im Vergleich zu konventionellen Technologien kostengünstig produziert werden. Weiter bietet die Flexibilität des Substratmaterials erhebliches Potential für die Erschließung von neuen Anwendungen und Produkten, die mit konventionellen starren Elektronikkomponenten bzw. –systemen und PV-Elementen nicht oder nur stark eingeschränkt bedient werden können. Typische Beispiele für die Erschließung von neuen Märkten und Produkten durch organische und gedruckte Elektronik sind auf Foliensubstrate aufgebrachte elektronische Schaltungen mit flexiblen Funktionselementen, wie z.B. organische Leuchtdioden (OLED) und OLED-Displays, organische Feldeffekttransistoren (OFET), Batterien, usw., sowie die Integration von flexibel konfektionierbaren OPV-Zellen in Bekleidungsstücke und Gebäudefassaden.

Zu Beginn des MLD-LED-Projektes existierten jedoch erhebliche technische Probleme, die eine flächendeckende Markteinführung und Verbreitung von organischer und gedruckter Elektronik sowie von OPV-Zellen bremsten bzw. zum Teil verhinderten. Ein wesentliches Problem von organischer und gedruckten Elektronik bzw. OPV-Zellen bestand in der für Praxisanwendungen unzureichenden Lebensdauer von zurzeit ca. 2-3 Jahren, die durch den Kontakt der organischen Substrate mit Feuchtigkeit und Sauerstoff zusätzlich drastisch verkürzt wurde. Weiter wurden aus organischen Materialien gefertigte Schaltungen, Bauteile (z.B. OLED) und OPV-Zellen mit nur stark begrenzt biegbaren anorganischen Vergussmassen bzw. dünnen Glasscheiben gekapselt und so vor dem Kontakt mit Feuchtigkeit bzw. Sauerstoff geschützt. Bei Versuchen der Firma Samsung zur Kapselung von folienbasierten organischen Elektronikschaltungen mit einem Flüssigglas konnte eine eingeschränkte Biegsamkeit, jedoch keine für den Praxiseinsatz ausreichende Flexibilität realisiert werden. Vor Beginn des MLD-LED-Projektes waren keine geeigneten Technologien oder Verfahren verfügbar, mit denen organische Elektronik bzw. OPV-Zellen zuverlässig vor dem zerstörenden Einfluss von Feuchtigkeit und Sauerstoff geschützt werden konnten, ohne dass die Flexibilität und Lebensdauer der Schaltungen bzw. Zellen massiv eingeschränkt wurde. An diesem Punkt setzte das von den KMU-Partnern Micro-Hybrid GmbH und NOVALED AG, dem Industriepartner IST METZ GmbH sowie der Forschungseinrichtung OUT e.V. geplante "MLD-LED" Projekt an.

1.2 Aufgabenstellung

Zentrale Aufgabe des "MLD-LED"-Verbundvorhabens war die Entwicklung von erstmals auf UV-LEDs basierenden, sowie in x- und y-Richtung skalierbaren, miniaturisierten Hochleistungs-UV-LED-Modulen für die Versieglung von organischer und gedruckter Elektronik bzw. organischen Photovoltaik (OPV) -Zellen mit flexiblen Schutzlacken. Zur Realisierung dieses Zieles sollte die Strahlungsleistungsdichte für luftgekühlte UV-LED-Module von zu Projektstart ≤ 2 W/cm^2 auf nach Projektende ≥ 6 W/cm^2, bzw. für flüssiggekühlte Module von zu Projektstart ≤ 8 W/cm^2 auf nach Projektende ≥ 25 W/cm^2 gesteigert werden. Für die angestrebte Steigerung der Strahlungsleistungsdichte war zwingend die Entwicklung von neuen Wärmepfad- und Strömungskonzepten, sowie Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) erforderlich. Zur Steigerung des Wärmeübergangs vom Kühlkörper auf das wärmeabführende, den Kühlkörper umströmende Fluid sollten im "MLD-LED"-Projekt die folgenden Lösungsansätze untersucht werden:

- Beim geplanten luftgekühlten Hochleistungs-UV-LED-Modul sollten neue Ansätze in Bezug auf die Steigerung der Wärmeabfuhr untersucht und realisiert werden.
- Beim geplanten flüssiggekühlten Hochleistungs-UV-LED-Modul sollten neue Mikrostrukturtechniken, die eine große Übergangsfläche bzw. einen hohen Wärmestrom zwischen Festkörper und Flüssigkeit mit idealen Strömungsverhältnissen kombinieren, für die Realisierung von höchsten Leitungsdichten entwickelt und untersucht werden.

Mit der im "MLD-LED"-Projekt angestrebten UV-LED basierten Versiegelung sollte, im Gegensatz zu den zu Projektstart z.B. für die Härtung von UV-Farben und Lacken eingesetzten Hg-UV-Mitteldruckstrahlern, ein absolut kalter UV-Härtungsprozess für Industrieanwendungen zur Verfügung gestellt werden, mit dem die langwellige UV-Strahlung für die Härtung der Schutzlacke gezielt schmalbandig selektiert und kurzwellige, die organischen Strukturen zerstörende UV-Strahlung eliminiert werden kann.

Der Funktionsnachweis für den UV-gestützten Versiegelungsprozess sollte im "MLD-LED"-Projekt konkret am Beispiel der Versiegelung von OLEDs beim Partner NOVALED erbracht werden.

2. Stand der Wissenschaft und Technik sowie Lösungsansatz

2.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft vor Beginn des MLD-LED-Projektes bestand in Untersuchungen zur Verkapselung von OPV-Zellen und OLED Displays mit flexiblen Folien. Für die Verklebung der Folien wurden, ähnlich wie bei der Härtung von UV-Lacken, Hg-UV-Mitteldruckstrahler eingesetzt. Von der Firma SCHOTT wurden Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Flachgläsern und flexiblen Dünngläsern für die UV-Blockung und hermetische Kapselung von OPV-Zellen bekannt. Zum Zeitpunkt der Antragstellung arbeitete die Firma Samsung an der Entwicklung von Flüssigglas für die Kapselung von OLED-Displays und OPV-Zellen. Sowohl Flachglas und Dünnglas, als auch Flüssigglas ermöglichten eine eng begrenzte Biegung, brachen jedoch bei größerer mechanischer Belastung oder Ausnutzung der vom organischen Foliensubstrat vorgegebenen Flexibilität.

Ebenso existierten mehrere Forschungsprojekte, die eine Steigerung des Wirkungsgrades und der Lebensdauer von OPV-Zellen zum Ziel hatten. Konkret hatte das von 07/2008 bis 06/2011 laufende Verbundprojekt "*Organische Photovoltaik zur integrierbaren Energieversorgung* (OPEG)" unter anderem die Optimierung von halbleitenden Absorber- und Ladungs-transportmaterialien für langlebige und leistungsstarke organische Solarzellen zum Ziel. An diesem FuE-Projekt war der in das "MLD-LED"-Projekt eingebundene Partner Novaled AG beteiligt. Weiter wurden in dem von 09/2008 bis 08/2011 durchgeführten Verbundvorhaben "*OPV-Stabilität*" langlebige funktionelle Polymermaterialien für die OPV entwickelt. In 06/2010 wurde das FuE-Projekt "*Verkapselungsmaterial auf Basis fluorhaltiger Blockcopolymere für die Organische Photovoltaik*" an der Hochschule Reutlingen gestartet.

Weiter standen die Projektpartner Novaled und IST METZ als Mitglieder der Organic and Printed Electronics Association (OE-A) Working Group "Encapsulation" in regelmäßigem Austausch mit vielen OLED Partnern (Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Institute) um die Weiterentwicklung von Kapselungs- bzw. Versiegelungstechnologien voranzutreiben. Ein Schwerpunkt der Arbeiten befasste sich mit der Etablierung eines standardisierten Messverfahrens sowie einer Messmethodik für die Charakterisierung und Bewertung der Verkapselungsqualität innerhalb der OLED Community. Die Ergebnisse der Arbeiten konnten bei Bedarf auch für die vergleichende Untersuchung und Charakterisierung von unter Verwendung der neu entwickelten MLD-LED-Technologie erzeugten OLED-Verkapselungen gegenüber mit konventionellen Verfahren hergestellten Verkapselungen herangezogen werden.

Der Stand der Technik war dadurch gekennzeichnet, dass die zu Projektstart verfügbaren OLEDs mit einer dünnen Glasscheibe vor dem Kontakt mit Feuchtigkeit und Sauerstoff geschützt wurden. Für die Verkapselung von organischen elektronischen Schaltungen und OPV-Zellen wurden anorganische Vergussmassen verwendet, die aufgrund der geringen Elastizität im ausgehärteten Zustand bei mechanischer Belastung bzw. Biegung brachen, wodurch die Schutzfunktion zerstört wurde. Zu Projektstart waren keine langzeitstabilen organischen gedruckten Schaltungen bzw. organischen elektronischen Elemente und OPV-Zellen in flexibler Ausführung bekannt.

Im Bereich der industriellen Druck- und Lackiertechnik wurden zu Projektstart ausnahmslos alle UV-Lacke und Farben mit konventionellen, mit Quecksilber (Hg-) Mitteldruck-Gasentladungslampen bestückten UV-Aggregaten gehärtet. In der Regel wurden Strahler mit einer spezifischen Leistung von bis zu 200 W/cm verwendet. Aufgrund der hohen Betriebstemperatur von ca. 200°C am Austrittsfenster und des hohen Anteils an organische Strukturen zerstörender kurzwelliger UV-Strahlung waren die verfügbaren Hg-UV-Mitteldruckstrahler nicht für die Versiegelung der temperatur- und UV-empfindlichen organischen Substrate geeignet. Die Leistungsbilanz der in Industrieanwendungen für die UV-Härtung eingesetzten Hg-UV-Mitteldruckstrahler (durchschnittlicher Leistungsbedarf ca. 14 kW) zeigte, dass nur ca. 28% der elektrischen Leistung in Form von UV-Strahlung emittiert wurde.

LEDs wurden zu Projektstart in vielen technischen Anwendungen, z.B. als Hintergrundbeleuchtung in Flachbild-Fernsehgeräten, in Handys oder als Kontrollleuchten in Schaltanlagen eingesetzt. Ebenfalls waren Hochleistungs-LEDs als Leuchten für den Hauptscheinwerfer in KFZ und für die Straßenbeleuchtung in Städten bekannt. In medizintechnischen Anwendungen wurden einzelne UV-LEDs als Punktquelle z.B. für das Härten von Kunststoff-Zahnfüllungen eingesetzt. Im Inkjet-Druckanwendungen wurden vereinzelt kleine Arrays mit jeweils einigen 10 nebeneinander angeordneten UV-LEDs für die UV-Härtung von Druckfarben verwendet. Alle zu Projektstart bekannten UV-LED Anwendungen verwendeten, im Gegensatz zum MLD-LED-FuE-Projekt, einzelne gehauste oder Cluster kleinerer Mengen UV-LEDs mit Leistungsdichten von ≤ 8 W/cm2 für flüssiggekühlte, bzw. ≤ 2 W/cm^2 für luftgekühlte Module. Aufgrund der Hausung der einzelnen UV-LED's / UV LED Cluster entstanden deutlich größere Abstände zwischen den einzelnen UV-LEDs sowie um mehr als 20 % geringere Packungsdichten. Die LED's hatten eine UV-Effizienz von ca. 15 - 20%, wobei als zentrales Unterscheidungsmerkmal zu den zuvor beschriebenen Mitteldruckstrahlern die Verlustleistung komplett über Wärmeleitung abgeführt werden kann.

2.2 Lösungsansatz

Im Projekt haben die Industriepartner Micro-Hybrid und IST METZ die Entwicklung der Aufbau- und Verbindungstechniken für die thermische und elektronische Kopplung der UV-LEDs sowie der Hard- und Software für die Hochleistungs-UV-LED-Module übernommen. Weiter Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten bei den Industrie-Projektpartnern war die Systemintegration sowie der Aufbau von Labormustern und Demonstratoren zur Verifizierung des UV-Härtungsverfahrens sowie der Hochleistungs-UV-LED-Module.

Schwerpunkte der Arbeiten beim Partner Micro-Hybrid war die Untersuchung, die Erprobung und das Design von geeigneten Trägersubstraten mit gedruckten Schichtstrukturen sowie die Entwicklung von Montagetechniken für die thermisch optimierte Montage der LED-Chips und Trägersubstrate auf Wärmesenken. Weiter wurden bei Micro-Hybrid Bond-Prozesse für die Kontaktierung der ungehäusten LED-Chips sowie für das stirnseitige Bonden von Flexband im "MLD-LED" Projekt realisiert. Ebenfalls Aufgabe von Micro-Hybrid war die Entwicklung

von optisch stabilen UV-transparenten Vergussmassen sowie von Sicherheits- und Ausfallkonzepten für die Sicherstellung der angestrebten Leistungsdichte.

Vom Partner IST METZ wurden, basierend auf dem umfangreich vorhandenen applikationsspezifischen Know-how, gemeinsam mit dem Partner NOVALED die grundsätzlichen Anforderungen an das Hochleistungs-UV-LED-Modul definiert und spezifiziert. Weiter Aufgabe von IST METZ war die Entwicklung einer kompakten DC-Elektronik sowie der Funktionalitäten für die Realisierung der Skalierbarkeit der im "MLD-LED" Projekt entwickelten Hochleistungs-UV-LED-Module. Der Aufbau von Testmustern und Demonstratoren sowie die Durchführung von Labor- und Feldversuchen zur Verifikation der im "MLD-LED" Projekt entwickelten Hochleistungs-UV-LED-Module waren weitere Arbeitspunkte beim Partner IST METZ.

Beim Projektpartner NOVALED wurden im "MLD-LED" vor allem Untersuchungen zur Ermittlung von für die flexible Beschichtung von OLEDs geeigneten UV-härtbaren Lacksystemen durchgeführt. Weiter wurden bei NOVALED gemeinsam mit dem Partner IST METZ die Anforderungen an das Hochleistungs-UV-LED-Modul sowie die für die Versiegelung der OLEDs eingesetzten UV-härtbaren Lacke definiert und spezifiziert. Parallel wurden von NOVALED die Entwicklungsarbeiten für die Elektronik, Steuerung, usw. des Hochleistungs-UV-LED-Moduls beratend begleitet. Der Aufbau und die Verifizierung von OLED Testmustern sowie die Durchführung von Labor- und Feldversuchen zur Versiegelung der OLED-Testmuster mit flexiblen Beschichtungssystemen waren ebenfalls Gegenstand der Arbeiten bei NOVALED. Hierzu verfügte NOVALED über einen Prozess zur Herstellung einer Dünnschichtverkapselung im eigenen Haus. Damit konnte der Funktionsnachweis für die im "MLD-LED“ Projekt entwickelten Hochleistungs-UV-LED-Module konkret an gebogenen bzw. flexiblen OLED-Substraten erbracht werden.

Die bei den Industriepartnern Micro-Hybrid und IST METZ durchgeführten Entwicklungsarbeiten wurden wissenschaftlich von der ebenfalls als Partner in das "MLD-LED" Projekt eingebundenen Forschungseinrichtung OUT e.V. begleitet. Im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten am OUT standen praktische und theoretische Grundlagenuntersuchungen sowie die Simulation und Entwicklung von Hochleistungs-Kühlkonzepten für die Luft- und Wasserkühlung der im Fokus des "MLD-LED" Projektes stehenden UV-LED-Module. Weiter wurden vom OUT geeignete AVT-Konzepte für die optimale thermische Kopplung der UV-LEDs entwickelt sowie die an die Labor- und Feldversuche anschließenden Optimierungsarbeiten der Partner Micro-Hybrid und IST METZ begleitet.

3. Erzielte Ergebnisse

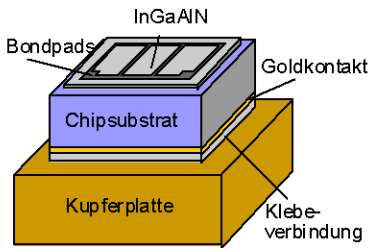
Nachfolgend werden die im MLD-LED-Projekt von den Projektpartnern erarbeiteten Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

3.1 Optotransmitter-Umweltschutz-Technologie e.V. (OUT e.V.): Optimale Entwärmungsperipherie

Schwerpunkte dieses Teilprojektes waren optische und elektrische Untersuchungen von UV-LED-Chips im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 365 nm, Betrachtungen des Wärmemanagements von unterschiedlichen Aufbau- und Verbindungstechniken für UV-LED-Arrays im Hinblick auf eine effiziente Strahlungsemission, Untersuchungen zu neuen Konzepten mit Luft- und Wasserkühlung sowie die Durchführung von Langzeittests an ersten Teststrukturen mit hoher Strahlungsleistungsdichte.

Optische und elektrische Untersuchungen von UV-LED-Chips

Effiziente UV-LED-Chips für die Strahlungsemission im oberen UVA-Bereich (<395 nm) bestehen aus InGaAlN-Epitaxieschichten (ca. 5 µm) auf dünnen Metall- oder Halbleiter-substraten. Für elektrische und optische Untersuchungen wurden diese UV-LED-Chips (1 mm²) auf kleinen Kupferkühlkörpern (10 x 10 x 1 mm³) aufgebaut und mittels Bonddrähten elektrisch kontaktiert. Abbildung 1 zeigt prinzipiell den Aufbau dieser Testmuster. Die Tabelle gibt typische Materialparameter für UV-LED-Chips, Klebeverbindung und Kühlkörper für solche Testmuster an.



Material	ρ (kg/m³)	c_p (J/(kg K))	λ (W/(m K)	d (µm)
InGaAlN	6300	753	~1,5	5,0
Chipsubstrat	8900	386	380,0	140
Goldkontakt	19300	133	301,0	2,5
Klebeverbindung	3800	1200	6,0-7,5	20-30
Kupferplatte	8933	385	300-400	1000

Abbildung 1: Testmuster zur elektrischen und optischen Untersuchung von Dünnschicht-UV-LED-Chips (links) und Angaben zu typischen Schichtdicken und Materialparametern (siehe Tabelle)

Zur Untersuchung der optischen und elektrischen Eigenschaften von verschiedenen UV-LED-Chips wurden ein UV-kalibriertes Multikanalspektrometer (OL770) und ein programmierbares Elektrometer (Keithley) verwendet. Für die Untersuchungen befinden sich die Testmuster auf einem temperaturgeregelten Halter vor der Öffnung einer Ulbrichtkugel (IS-670). Während der Variation des Flussstroms bis max. 1000 mA wurden jeweils optischer Strahlungsfluss (P_{opt} [W]), spektrale Strahlungsleistung (λ [nm]) und elektrische Parameter (Flussstrom I_f, Spannung U_f) gemessen und digital erfasst. Tabelle 1 stellt die Messergebnisse für vier verschiedene UV-LED-Chips für I_f = 350 mA zusammen. Die UV-

LED-Chips A/B und C/D stammen jeweils von unterschiedlichen Herstellern. UV-LED-Chips (A und B) mit einer Wellenlänge um 390 nm sind typischerweise effizienter als die mit kleinen Wellenlängen (C_365 nm und D_365 nm).

UV-LED Chip	Chip-material	$\lambda_{Zentrum}$ (nm)	P_{opt} (W)	P_{elek} (W)	U_f (V)	I_f (A)	$P_{wärme}$ (W)	η (%)
A_395 B_385	InGaAlN	393,4	0,32	1,16	3,3	0,35	0,84	27
	InGaAlN	387,5	0,46	1,19	3,4	0,35	0,73	39
C_365	InGaAlN	371,3	0,11	1,19	3,4	0,35	1,08	10
D_365	InGaAlN	369,4	0,25	1,37	3,9	0,35	1,12	18

Tabelle 1: Zentrumswellenlänge $\lambda_{zentrum}$, optischer Strahlungsfluss P_{opt}, elektrische Leistung P_{elek}, Flussspannung U_f, Flussstrom I_f, Verlustleistung $P_{wärme}$ und Wirkungsgrad η von vier UV-LEDs.

Die thermische Leistung pro UV-LED-Chip liegt beim Flussstrom von 350 mA je nach Effizienz der UV-LED-Chips zwischen 0,84 W und 1,12 W pro Chip. Das entspricht Wärmeleistungsdichten/Chip von 84 bis 112 W/cm². Abbildung 2 zeigt die elektrischen und optischen Eigenschaften exemplarisch für einen UV-LED-Chip des Typs A_395nm bei der Variation der Umgebungstemperatur. Der totale optische Strahlungsfluss nimmt mit zunehmender Temperatur linear ab (-2,0 mW/K). Bei schrittweiser Erhöhung der Umgebungstemperatur von 25 °C auf 85 °C verändern sich Zentrumswellenlängen der emittierten UV-Strahlung (+0,056 nm/K) und elektrischen Fluss-spannungen (-2,5 mV/K) des UV-LED-Chips.

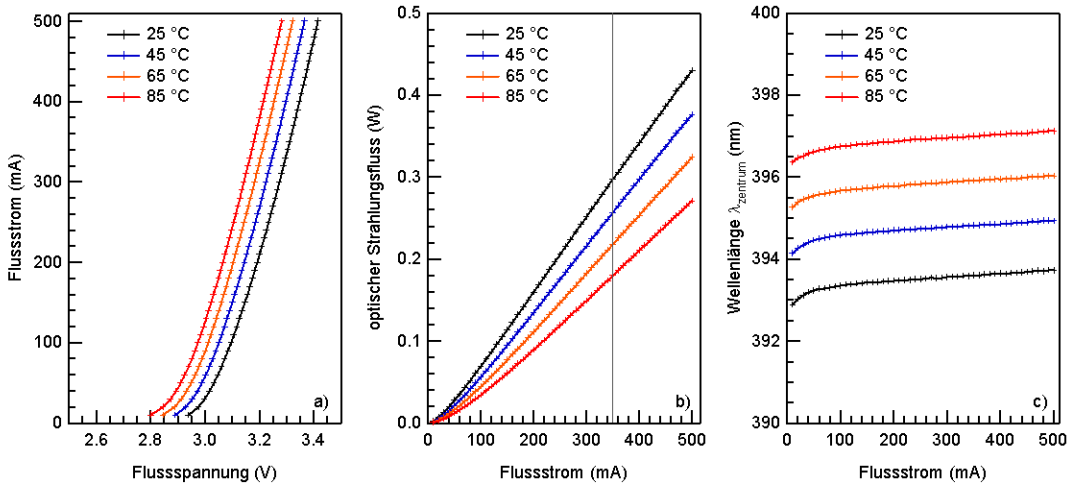


Abbildung 2: Elektrische und optische Untersuchung eines UV-LED-Chips (A_395) für vier verschiedene Umgebungstemperaturen. Strom-Spannungskurven (links), totaler optischer Strahlungsfluss (mitte), und Zentrumswellenlänge (rechts) in Abhängigkeit vom Flussstrom.

Die elektrischen und optischen Untersuchungen haben ergeben, dass die emittierte optische Strahlungsleistung von UV-LED-Chips von der elektrischen Bestromung und der Umgebungstemperatur abhängen. Eine schrittweise Erhöhung der Umgebungstemperatur um 20 K verringert den optischen Strahlungsfluss der UV-LED-Chips um ca. 14%. Bei der Entwicklung von UV-LED-Arrays mit maximaler Strahlungsleistungsdichte hat deshalb ein

gutes Wärmemanagement einen entscheidenden Einfluss auf die Realisierung der geplanten Ziele. Eine unzureichende Wärmeabfuhr über die Aufbau- und Verbindungstechnik führt zur Erhöhung der Chiptemperatur. Permanentes Überschreiten der maximal zulässigen Chiptemperatur (T_{max}=120 °C) kann Alterungs- und irreversible Schädigungsprozesse in UV-LED-Chips aktivieren und dadurch deren Lebensdauer erheblich reduzieren.

Parametrisierte 2D-Thermosimulationen

Im Rahmen des Projektes wurden erste Kühlkonzepte mit Hilfe von 2D-Thermosimulationen in einem parametrisierten Geometriemodell untersucht. Hierfür wurde ein parametrisiertes 2-dimensionales Modell unter Berücksichtigung von Spiegelsymmetrien und einer Skalierbarkeit in x- und y-Richtung in der Software COMSOL Multiphysik realisiert (siehe Abbildung 3). Das Modell betrachtet den zweidimensionalen Wärmefluss vom UV-LED-Chip über die Aufbau- und Verbindungs-technik bis hin zur Grenzfläche am Kühlkörper. Im physikalischen Modell wurden als Randbedingung für die thermischen Leistungsdichten im UV-LED-Chipmaterial Wärmequellen definiert. An der Grenzfläche zwischen unterem Lötkontakt und Kühlkörper bestimmen isotherme Randbedingungen den Wärmetransport. Material-parameter für thermische Simulationen, wie z.B. Dichte, spezifische Wärmekapazität und thermische Leitfähigkeit sowie Angaben zu typischen Materialdicken und Kostenfaktoren werden in den Tabellen 1 bis 3 angegeben.

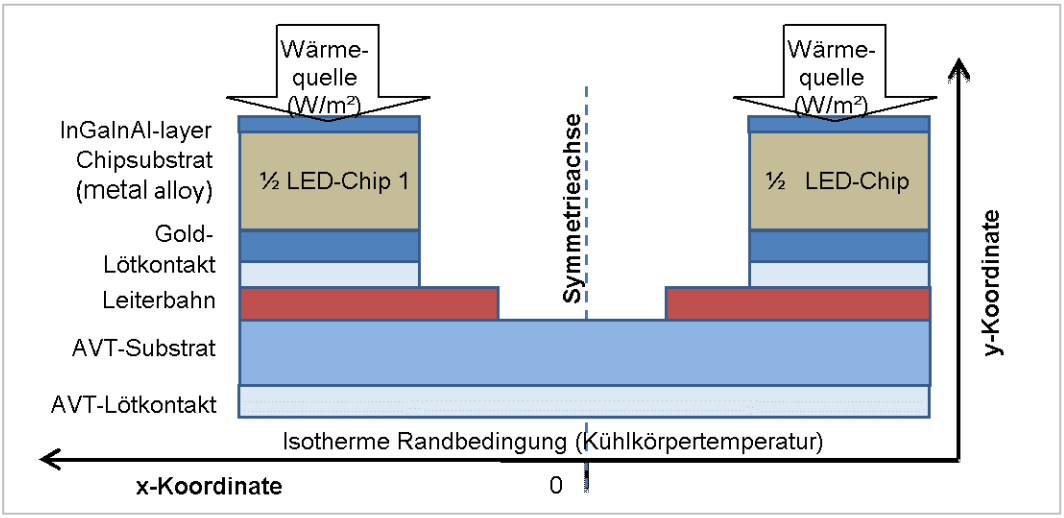


Abbildung 3: Symmetrisches 2D-Geometriemodell für Parameterstudien des Wärmetransports über den Querschnitt von zwei halben benachbarten UV-Chips im Array.

Die Berechnung des zweidimensionalen Wärmetransports erfolgte über die Methode der Finiten Elemente mittels der Multiphysik Software COMSOL 4.2a. In Parameterstudien konnte der Einfluss von unterschiedlichen Aufbau- und Verbindungskonzepte, wie z.B. Materialart, Schichtdicken und UV-LED-Chipabstand, auf die Chiptemperatur untersucht werden. Zur Validierung des 2D-Simulationsmodells wurden die Chiptemperaturen mittels einer Wärmebildkamera experimentell bestimmt. Abbildung 4 zeigt exemplarisch für den UV-LED-Chip (A_395nm) vier Thermographieaufnahmen jeweils in Falschfarbendar-stellung für die Variation des Flussstroms (350, 500, 750 und 1000 mA). Für diese Untersuchungen wurden UV-LED-Chips auf dünne Kupferkühlkörper aufgeklebt. Die Kühlkörpertemperatur

beträgt 25 °C (isotherme Randbedingung). Der experimentelle Aufbau wurde in einem 2D-Geometriemodell realisiert (siehe Abbildung 1) und die UV-LED-Chiptemperaturen für die Wärmeleistungen bei entsprechenden Flussströmen berechnet. Die berechneten Chiptemperaturen (rote Kurve) stimmen mit den experimentellen Ergebnissen (blaue Kurve) im Rahmen einer Fehlertoleranz von 5% überein (siehe Graphik in Abbildung 4).

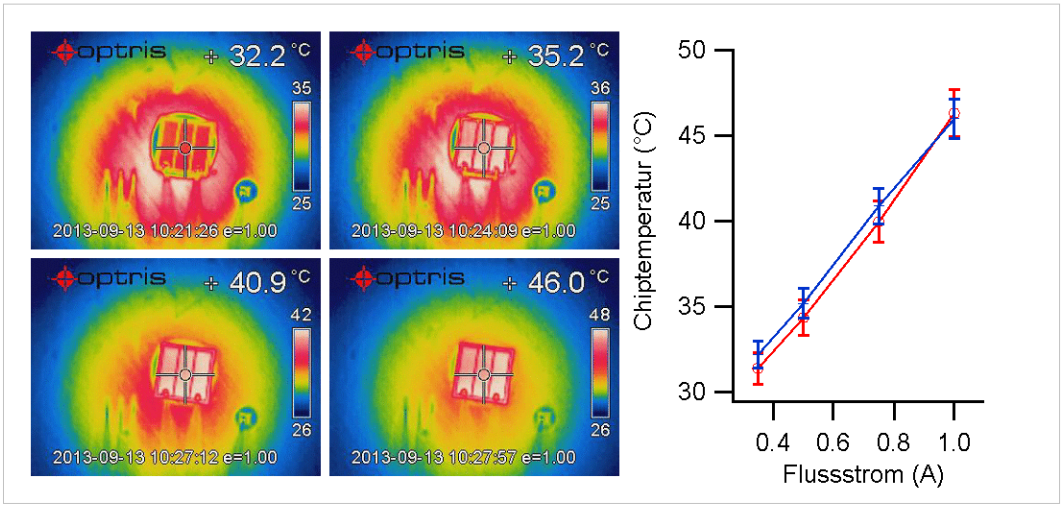


Abbildung 4: Thermographieaufnahmen vom UV-LED-Chip (A_395nm) für vier Flussströme (350, 500, 750 und 1000 mA) auf einem Kupferkühlkörper (T = 25 °C) (links). Vergleich von gemessenen Chiptemperaturen (blaue Kurve) mit den berechneten Chiptemperaturen (rote Kurve) (rechts).

Tabelle 2: Materialparameter für verschiedene Substrate

Material	Dichte (kg/m³)	λ (W/m·K)	cp (J/kg·K)	Dicke (µm)	Kosten-faktor	Literatur
Al_2O_3	3700	20,0	880	250-1200	1	[2]
AlN	3300	170,0	738	ab 500	3	[5]
Kupfer	8933	401,0	385	---	---	[2]
Diamant	3500	1800,0	510	500	100	[5]

Tabelle 3:Materialparameter für zwei verschiedene Lotpads

Material	Dichte (kg/m³)	λ (W/m·K)	cp (J/kg·K)	Dicke (µm)	Kosten-faktor	Literatur
Au-Dickschicht	3500	5,7	800	10	1 (Al_2O_3) 3 (AlN)	[4]
Au-Dünnschicht	9300	380,0	130	ab 500	3 (Al_2O_3) 1 (AlN)	[2]

Tabelle 4: Materialparameter für verschiedene Verbindungsarten

Material	Dichte (kg/m³)	λ (W/m·K)	cp (J/kg·K)	Dicke (µm)	Kosten-faktor	Literatur
Standard-kleber	3800	7,5	1000	10-20	1	[2]
Spezial-kleber	10000	25,0	1320	10-50	3	[5]
AuSn-Lot	15000	57,0	150	< 1	10	[5]
SAC-Lot	7400	57,3	220	10-30	0,5	[3]
Bleilot (Sn60/Pb40)	8525	56,6	172	10-30	0,5	[1]

Auswahl der Konzepte für die Aufbau-und Verbindungstechnik

Voruntersuchungen zum thermischen Management der Aufbau- und Verbindungstechnik zur Entwicklung von UV-LED-Arrays mit maximaler Strahlungsleistungsdichte haben ergeben, dass keramische Substratmaterialien für das geplante Submodulkonzept mit Strukturgröße von (10 x 10 x 0,5) mm³ am besten geeignet sind. Die elektrische Verschaltung von UV-LED-Chips auf den Submodulen soll mittels einer Reihenschaltung von 4 bzw. 9 Chips auf einem Submodul erfolgen. Die hierfür erforderlichen elektrischen Schaltungselemente wie z.B. Bondpads, Leiterbahnstrukturen und Lötpads für UV-LED Chips und Schutzdioden, lassen sich auf keramischen Substraten mittels Dünn- und Dickschichttechnologie herstellen. Bei der Technologieauswahl wurden neben Aspekten zur Anwendbarkeit der jeweiligen Verfahren auch deren Kostenfaktoren beachtet. Auf Substraten aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) ist der Einsatz von Gold-Dickschichtsinterpasten in der Fertigung kostengünstiger. Auf Aluminiumnitrid (AlN) hingegen lassen sich elektrische Schaltungen wirtschaftlich mittels Dünnschichttechnologie herstellen.

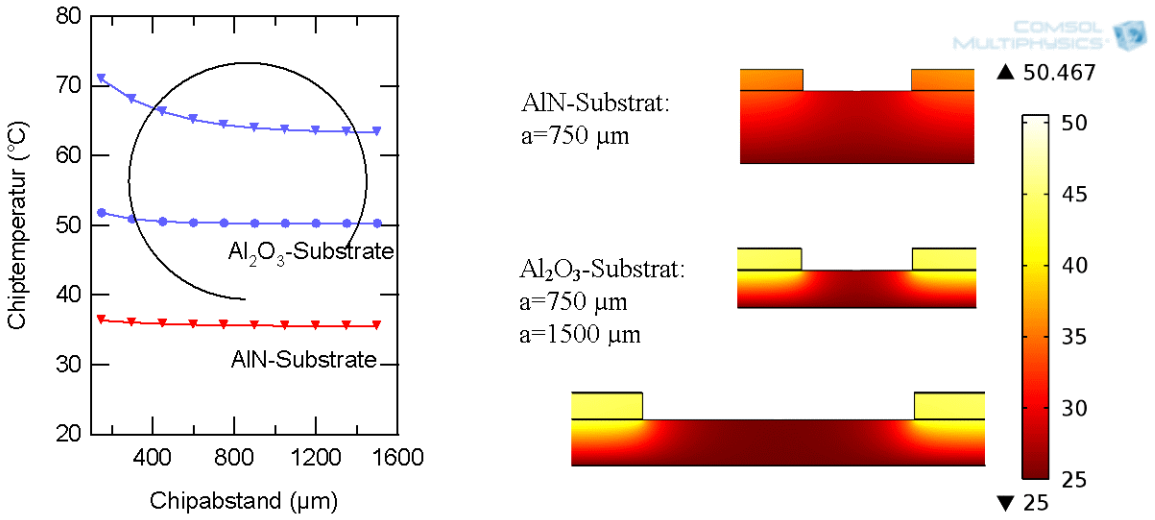


Abbildung 5: Berechnete Chiptemperaturen für Substrate aus Al2O3 (250 und 500 µm) und AlN (500 µm). Wärmeleistung: 2 W/Chip. Variation des Chipabstands von 150 bis 1500 µm (links). Temperaturverteilungen über den Querschnitt (rechts).

Auf Grund der höheren Wärmeleitfähigkeit von Aluminiumnitrid (~170 W/(m K)) gegenüber Aluminiumoxid (~20 W/ (m K)) ergeben die Berechnungen für gleiche Wärmeleistungen (1 W pro Chip) und gleicher Verbindungstechnik deutlich niedrigere Chiptemperaturen auf einem AlN-Substrat (38 °C) als auf einem Al_2O_3-Substrat (70 °C). Auf 500 µm dicken Al_2O_3-Substraten sind die berechneten Chiptemperaturen außerdem bei kleinem Chipabstand höher, als auf dünnen Substraten (250 µm) (siehe Graphik in Abbildung 10). In Falschfarbenstellung der Temperaturverteilung über den Querschnitt (siehe Abbildung 10) ist zu erkennen, dass der Wärmefluss hauptsachlich vertikal unterhalb der UV-LED-Chips in den Kühlkörper abgeführt wird. Materialien mit hoher thermischer Wärmeleitfähigkeit wie z.B. AlN gewährleisten einen hohen vertikalen Wärmefluss und dadurch eine optimale Kühlung von UV-LED-Chips.

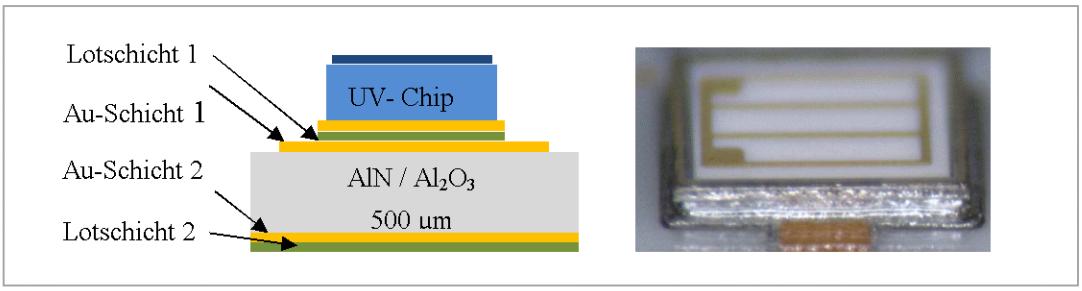


Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung UV-LED Submoduls im Querschnitt und (links) eine Makroaufnahme eines UV-LED-Chips auf einem Al_2O_3-Submodul.

Die Auswirkung von Variationen für Lötpad- und Lötschichtdicken auf die Chiptemperatur wurden für zwei AVT-Konzepte in Parameterstudien mittels des 2D-Simualtionsmodells untersucht. Hierfür wurde die entsprechende Aufbau- und Verbindungstechnik für die Submodule (siehe Abbildung 6) vereinfacht im parametrisierten 2D-Geomtriemodell realisiert. Abbildung 7 zeigt berechnete Chiptemperaturen für die Variation von Leiterbahndicke für Au-Dünnfilmtechnik (links) und Au-Dickfilmtechnik (rechts) jeweils auf AlN -und Al_2O_3-Substraten. Für die Berechnungen wurde eine Wärmeleistung von 2 W/Chip und isotherme Randbedingung (25 °C) angesetzt. Der Abstand zwischen zwei UV-Chips auf den Keramiksubstraten beträgt jeweils 150 µm. Die Parameterstudien haben ergeben, dass die Auswahl des Keramikmaterials, AlN oder Al_2O_3, einen größeren Einfluss auf die Chiptemperatur hat als die Dickenvariationen von Lötpads und Lötschichten. Die Zunahme der Schichtdicke von Au-Dickschichten von 3 µm auf 11 µm bewirkt in der Simulation eine Erhöhung der Chiptemperatur um ca. 4 K. Im Projekt wurden nur erste prinzipielle Funktionsmuster auf Al_2O_2-Substraten aufgebaut. Für den Aufbau von Hochleistungs-UV-LED-Modulen werden Submodule aus AlN verwendet.

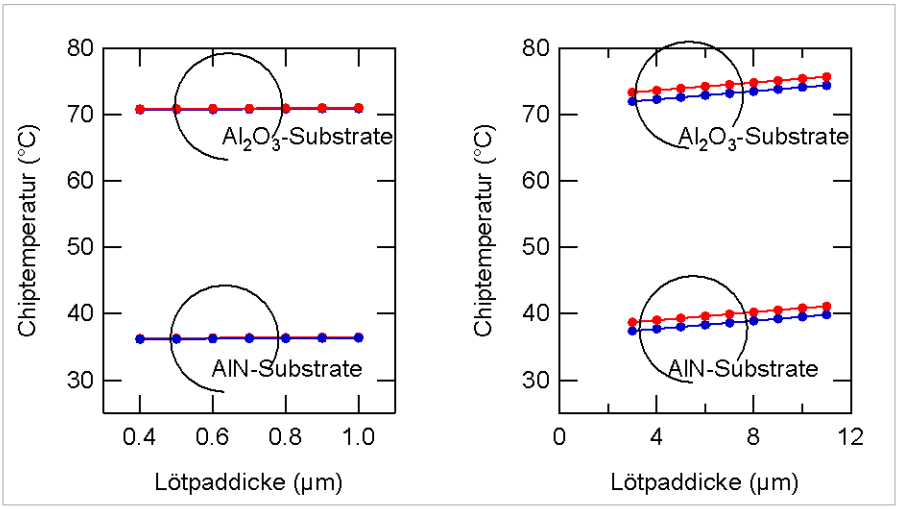


Abbildung 7: Berechnete Chiptemperaturen für unterschiedliche Leiterbahndicken: Au-Dünnschicht und AuSn-Lot (3 und 5 µm) (links) und der Au- Dickschicht und PbSn-Lot (10 und 30 µm) (rechts). Der gesamte Wärmeenergieeintrag beträgt 2 W /Chip. Chipabstand 150 µm. Isotherme Randbedingung T = 25 °C am Kühlkörper.

Entwicklung von Hochleistungskühlkonzepten

Luftkühlkonzepte

Offenporige Metallschäume aus Kupfer oder Aluminium zeichnen sich durch ihre gute thermische Leitfähigkeit und großen Oberflächen aus und sind deshalb für den Einsatz als Kühlkörper prädestiniert. Abbildung 8 zeigt die Computertomographieaufnahme eines offenporigen Metallschaums (links). Durchgängige große Hohlräume bieten strömenden gasförmigen oder flüssigen Medien geringen Widerstand und ermöglichen eine effiziente Wärmeübertragung. Basierend auf der realen Schaumstruktur wurde im Rahmen des Projektes ein vereinfachtes dreidimensionales CAD-Modell für die thermische Simulation von Metallschäumen aufgestellt (siehe Abbildung 8 rechts). Es war geplant, UV-LED-Module auf der Basis einer solchen Luftkühlung zur Verkapselung von OLEDS in einer Glovebox einzusetzen. Die Fragestellung war, ob die in einer Glovebox vorhandene laminare Gasströmung (V_{in}< 0,5 m/s) als Kühlmedium für Kühlkörper aus offenporigen Metallschaum verwendet werden kann.

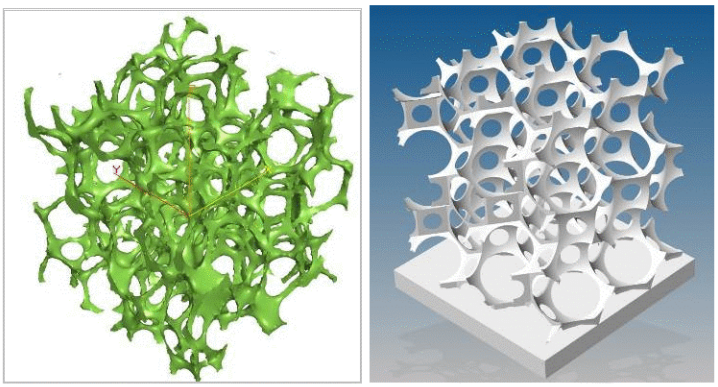


Abbildung 8: Computertomographieaufnahme eines realen offenporigen Metallschaums (10 x 10 x 10 mm³) (links) und CAD-Modell eines offenporigen Metallschaum mit Kühlplatte (rechts).

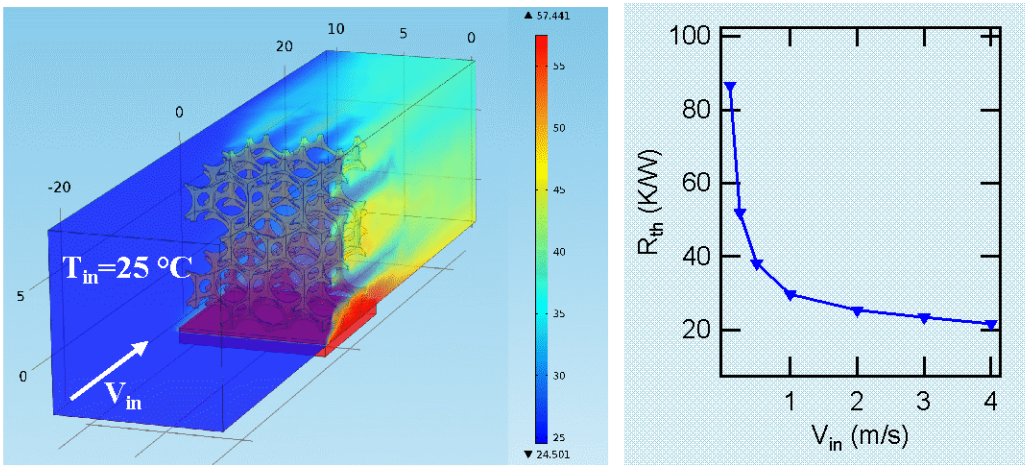


Abbildung 9: 3D-Simulation zur Berechnung der Wärmeübertragung im CAD-Modell mit Kühlplatte (rechts). Berechneter Wärmewiderstand in Abhängigkeit von der laminaren Strömungsgeschwindigkeit (V_{in}) (links). Wärmeleistung 0,85 W und Umgebungstemperatur T = 25 °C.

Im CAD-Modell besteht aus der Modellierung des offenporige Metallschaumstruktur (10 x 10 x 10 mm³) und einer angesetzten flachen Kühlplatte (10 x 10 x 1 mm³). Für die 3D-Simulationsrechnung wurde auf der Fläche der Kühlplatte eine Wärmeleistung von 0,85 W/cm² (siehe

***Tabelle** 2*) definiert. Der simulierte Strömungskanal hat einen Querschnitt von (10 x 10) mm². Die Geschwindigkeit der laminaren Strömung wurde schrittweise von 0,1 bis 4,0 m/s variiert und der dreidimensionale Wärmetransport über die Methode der Finiten Elemente berechnet. Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten v_{in} <0,5 m/s wurde für diese offenporige Kühlkörperstruktur ein Wärmewiderstand R_{th} größer als 50 K/W berechnet. Diese Studie hat ergeben, dass dieses Luftkühlkonzept für die geplanten Hochleistungs UV-LED-Arrays ungeeignet ist.

Wasserkühlkonzepte

Die Parameterstudien zur Aufbau -und Verbindungstechnik mittels 2D-Thermo-simulationen haben gezeigt, dass bei hoher thermischer Leitfähigkeit der Materialien und hinreichend dünnen Schichtdicken, der Wärmefluss hauptsächlich unter den UV-Chips bis zur gekühlten

Fläche verläuft und die Chiptemperatur nahezu unabhängig vom Abstand zwischen den UV-Chips ist. Für wassergekühlte UV-Module war eine optische Strahlungsleistungsdichte von 24 W/cm² geplant. Hohe optische Leistungsdichten erfordern sehr kleine Chipabstände im UV-LED-Array. Im Rahmen des Projektes wurde ein Diamantsubstrat mit den Abmessungen (10 x 10 x 0,5) mm³ und beidseitiger Metallisierung (Goldschicht) beschafft. Das Diamantsubstrat hat eine spezifische Wärmeleitfähigkeit von ca. 1800 W/ (m K) und liegt damit weit höher als die von AlN - oder Al_2O_3-Keramiken. Auf das Diamantsubstrat wurden insgesamt 16 Stück UV-LED-Chips (B_385nm) mit einen Chipabstand von ca. 100 µm aufgeklebt. Der verwendete Silberleitkleber ist thermisch und elektrisch leitfähig. Alle Chips befinden sich auf einer gemeinsamen Anode. Die Kontaktierung der Kathode erfolgte über Bonddrähte zum Kontaktpad an 16 separate Konstantstromquellen (siehe Foto in Abbildung 10).

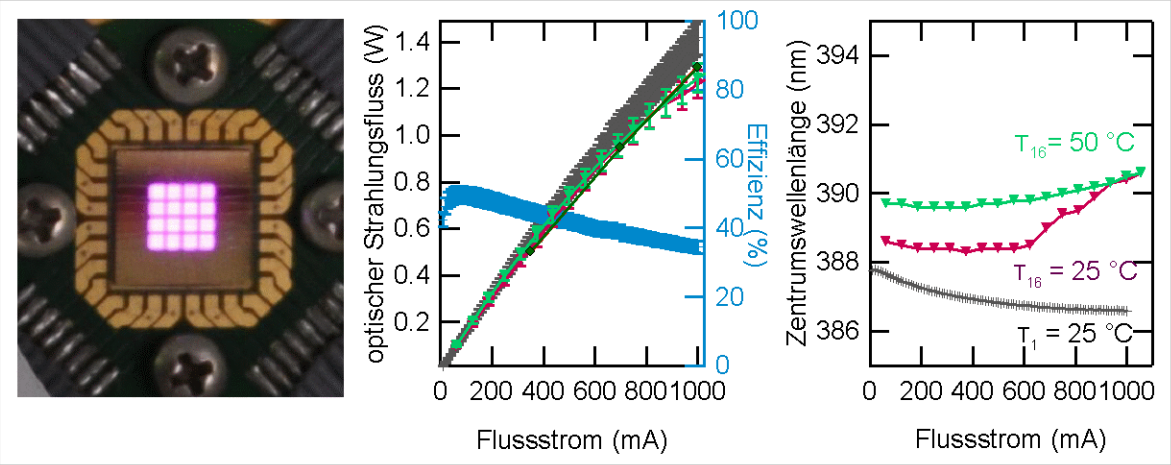


Abbildung 10: Foto des 16 fach UV-Chip-Arrays auf einer 500 µm dünnen Diamantschicht (links). Optischer Strahlungsfluss pro UV-Chip und Effizienz (mittlere Graphik) und Zentrumswellenlänge in Abhängigkeit vom Flussstrom (20 mA bis 1000 mA) und Temperatur (25 °C, 50 °C)(rechts).T_1: Kühlkörpertemperatur bei Messung eines UV-LED-Chips und T_{16} bei 16fach-UV-LED-Array.

Die elektrische Verschaltung der 16 UV-Chips ist auf einen maximalen Flussstrom von 1000 mA ausgelegt. Abbildung 10 zeigt den optischen Strahlungsflusses für einen UV-LED-Chip des 16fach-UV-Chip-Arrays in Anhängigkeit von Flussstrom (graue Kurve im mittleren Graph). Beim Flussstrom von 1000 mA und der Kühlkörpertemperatur von 25 °C ergibt die Messung der optischen Strahlungsleistung eines UV-LED-Chips P_{opt}= 1,4 W und die Effizienz liegt bei 34,5 %. Die Zentrumswellenlänge der emittierten UV-Strahlung beträgt λ=387 nm bei 25 °C Kühlkörpertemperatur.

Für die optische Untersuchung des 16fach-Arrays wurden alle UV-LED-Chips jeweils an eine separate Konstantstromquelle (max. 1,04 A) angeschlossen. Die Kühltemperatur wurde über ein wassergekühltes Peltierelement geregelt und kontrolliert. Die Messung der optischen Strahlungsleistung des 16fach-Arrays bei maximalem Flussstrom ergibt P_{opt}= 20,5 W und die Zentrumswellenlänge der emittierten UV-Strahlung liegt bei 390 nm. Die Wärme-leistungsdichte des 16fach-Arrays beträgt insgesamt 180 W/cm² bei maximalem Flussstrom von 1,04 A pro UV-LED-Chip. Die optische Strahlungs-leistungsdichte des 16fach-Moduls beträgt 81 W/cm² bei 50°C Kühlkörpertemperatur. Das 16fach-UV-Chip-Array hat eine abstrahlende Fläche von ca. 0,25 cm². Die Wellenlänge der emittierten UV-Strahlung verschiebt sich von 386,6 nm bei der Messung eines einzelnen UV-LED-Chips im Array (T = 25 °C, I_f = 1,0 A) auf 390,6 nm bei der Messung des 16fach UV-Chip-Moduls (50 °C, 1,04 A). Die Wellenlängenverschiebung korrespondiert mit dem Anstieg der Kühlkörper-temperatur (siehe Abbildung 10).

Langzeittests an 4fach-UV-ChipTeststruktur auf Al_20_3-Substraten

UV-LED-Chips vom Typ A_395nm und B_385nm sind vom Projektpartner Micro-Hybrid Electronic GmbH zum Aufbau der ersten prinzipiellen Teststrukturen auf Al_2O_3-Substraten aufgebaut worden. Auf diesen Teststrukturen wurden vier UV-LED-Chips elektrisch in Reihe verschaltet. Der Chipabstand beträgt je nach Chipgröße zwischen 200 und 300 µm. Die elektrischen Kontaktbahnen und Lötpads bestehen aus Silber-Dickschichten. Die Bondkontakte wurden aus Gold-Dickschichten hergestellt. Zur Kontrolle der Substrattemperatur wurde unmittelbar neben den UV-Chips ein Ni1000-Temperaturfühler aufgesetzt. Um die UV-Chips und die Bondkontakte während der Langzeitmessung vor Luftfeuchtigkeit zu schützen, wurde der UV-Chipbereich mi UV-transparentem Silikon überzogen. Abbildung 11 zeigt zwei Teststrukturen mit jeweils vier UV-LED-Chips: rechtes Foto nach einem Langzeitbetrieb (4500 Stunden) und linkes Foto ohne Langzeitbetrieb. Die Langzeittests wurden unter Laborbedingungen bei nahezu konstanter Substrattemperatur von ca. 50 °C und bei konstantem Flussstrom (500 mA) durchgeführt. Nach der Betriebszeit von 4.500 Stunden weist die Teststruktur deutliche Alterungseffekte (Korrosion) an den Stellen von Silber-Leiterbahnen auf die nicht durch Silikon abgedeckt waren. Unter dem Silikonverguss liegende Leiterbahnen, Bondpads, Chipoberflächen und Bonddrähte zeigen kaum Korrosionsschäden. Dagegen sind neben den Lötpads ebenfalls schwarze Korrosionsränder zu erkennen. Während der 4.500 Stunden wurden die Testmodule viermal aus dem Langzeitversuch genommen und optisch und elektrisch vermessen.

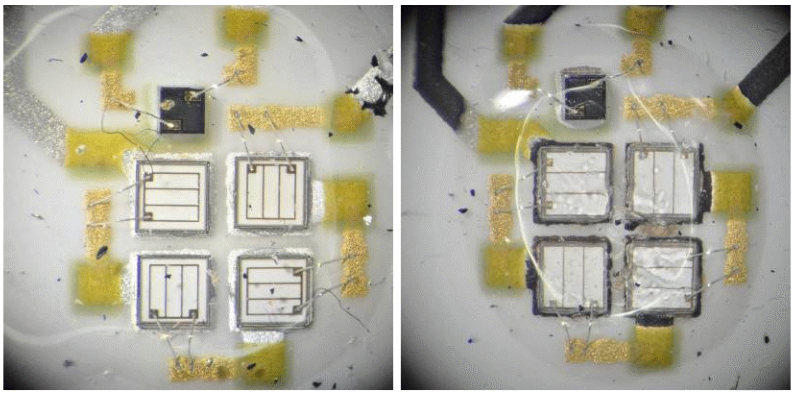


Abbildung 11: Zwei unterschiedliche Teststrukturen mit 4fach-UV-LED Submodule auf Al_2O_3-Substrat nicht gealtert (links) und nach 4.500 Stunden Testbetrieb im Labor (50 °C, 500 mA) (rechts).

Die Ergebnisse der elektrischen und optischen Untersuchungen zeigt Abbildung 12 exemplarisch für den Chiptyp B_385nm. Totaler optischer Strahlungsfluss, Strom-Spannungscharakteristik (I-V) und Wellenlänge verhalten sich bis zum Flussstrom von 500 mA selbst nach einer Betriebszeit von 4.500 Stunden unauffällig.

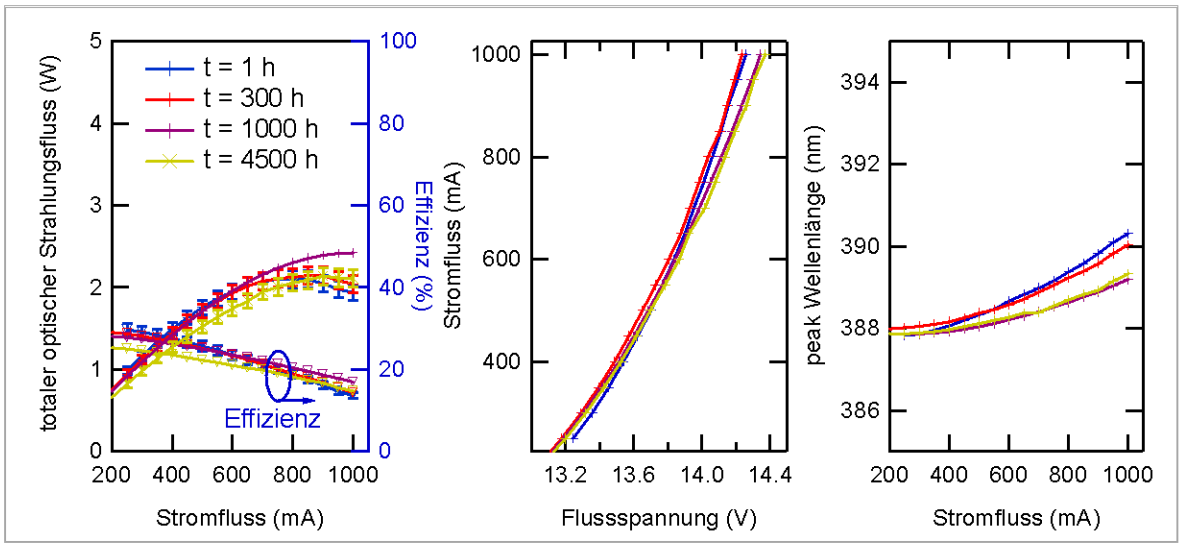


Abbildung 12: Elektrische und optische Charakterisierung der 4fach UV-LED Teststrukturen nach der Betriebszeit von 1 Stunde, 300 Stunden, 1.000 Stunden und 4.500 Stunden. Flussstrom 500 mA und Temperatur 25 °C (B_385nm).

Bei Flussströmen größer als 700 mA wird eine Reduzierung der totalen optischen Strahlungsleistung und Verschiebungen der Wellenlänge beobachtet. Die Teststrukturen aus Al_2O_3-Keramik sind für diese Wärmeleistungsdichten (~140 W/cm²) nicht geeignet. Die Messung eines baren Einzelchips ergab bei einem Flussstrom von 350 mA einen optischen Strahlungsfluss von 0,46 W (siehe Tabelle 1). Im Vergleich hierzu liefert die Teststruktur mit den vier UV-LEDs auf einem Al_2O_3-Substrat nur 4 x 0,322 W (1,288 W). Die Verkapslung der UV-LED-Chips mit transparentem Silikon bewirkte eine Abnahme der optischen Strahlungsleistung um ca. 30 % gegenüber den optischen Messungen an baren UV-LED-Chips. Dieser Befund konnte nach Rücksprache mit UV-LED- Chipherstellern bestätigt werden.

Zur Bewertung der Lebensdauer der UV-LED-Chips wurden die optischen Strahlungsflüsse beim Flussstrom von 500 mA jeweils auf den Startwert (1 Stunde) normiert und über die kumulierte Betriebszeit aufgetragen. In Abbildung 13 sind die zeitlichen Verläufe des normierten Strahlungsflusses für zwei UV-LED-Chiptypen (A_395nm) und (B_395nm) logarithmisch dargestellt. Nach 4.500 Betriebsstunden bei 500 mA Flussstrom fällt der normierte Strahlungsfluss der beiden UV-LED-Chiptypen auf 90 % ab. Die lineare Extrapolation des normierten Strahlungsflusses auf 10.000 Stunden Betriebsdauer lässt eine gesamte Reduzierung des Strahlungsflusses um ca. 20% erwarten.

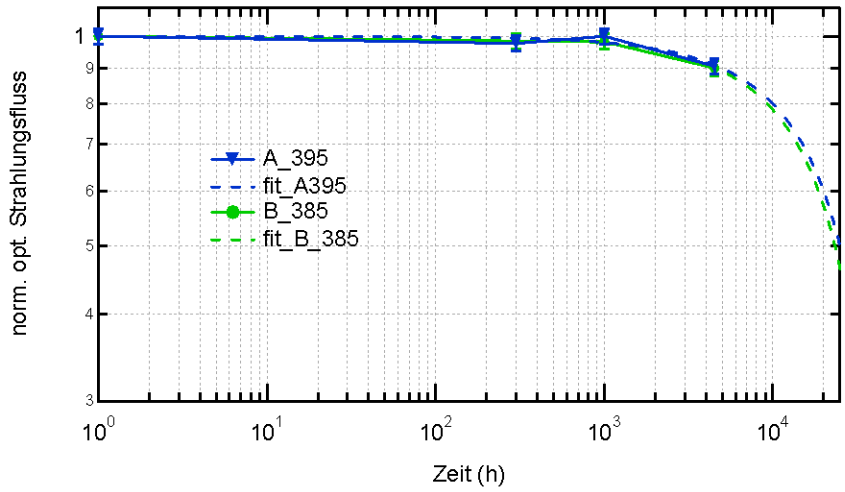


Abbildung 13: Lebensdaueruntersuchung von zwei UV-LED-Chiptypen auf einem Testmuster aus Al_2O_3-Substrat (siehe Text). Normierter optischer Strahlungsfluss beim Flussstrom von 500 mA über der kumulierten Betriebszeit von 1 Stunde, 300 Stunden, 1.000 Stunden und 4.500 Stunden.

Kurzfassung

Der emittierte Strahlungsfluss von UV-LED-Chips hängt von Flussstrom, Chipabstand und von der Umgebungstemperatur ab. Effiziente Hochleistungs-UV-LED-Module mit hoher Strahlungsleistungsdichte sind bei gutem thermischem Management von Aufbau –und Verbindungstechnik des gesamten Moduls realisierbar. Im Projekt wurde für einen extrem kleinen Chipabstand (~100 µm) ein 16fach-UV-LED-Array auf einem Diamantsubstrat realisiert und untersucht. Der optische Strahlungsfluss beträgt 20,5 W auf einer 0,25 cm² Abstrahlungsfläche, bei maximalem Flussstrom (1,04 A) und 50°C Umgebungs-temperatur. Mit diesem 16fach-UV-LED-Array wurde eine Strahlungsleistungsdichte von P_{opt} = 81 W/cm² erreicht.

Literatur

[1] J. Bilek, J. Atkinson, et al. (2004). Europ. Microelectr. and Packaging Symp. Praque.

[2] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, et al. (2007). Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons.

[3] www.alphametals.com.

[4] www.LTCC-Consulting.com/LTCC_technology_materials.

[5] www.matweb.com.

3.2 Micro Hybrid Electronic GmbH: Aufbau- und Verbindungstechnik

Innerhalb des Projektteams zeichnete die Micro-Hybrid Electronic GmbH (MHE) für die Entwicklung einer der Applikation entsprechenden Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) verantwortlich. Grundlagen dafür bildeten die vorhandene technisch technologische Basis und die langjährigen Erfahrungen in der Serienproduktion von Hybridschaltungen.

In unmittelbarem Zusammenhang mit der Entwicklung und Abstimmung des gemeinsamen Integrationskonzeptes mit IST METZ standen die Schwerpunkte:

- Entwicklung einer bzgl. des thermischen Übergangswiderstandes optimierten Montagetechnologie für Einzelkomponenten und LED,
- Entwicklung von Technologien zur elektrischen Kontaktierung von ungehausten Einzelkomponenten und kompletter Module,
- Entwicklung von Passivierungstechnologien zur Sicherung der finalen Systemzuverlässigkeit durch Stabilisierung und Schutz der Einzelkomponenten gegenüber Umwelteinflüssen bei minimaler Beeinträchtigung der optischen Eigenschaften,
- Entwicklung und Qualifizierung von Schaltungskonzepten zur weiteren Erhöhung der Systemzuverlässigkeit

im Vordergrund der Projektarbeit. Dabei wurden die entwickelten Integrationstechnologien einerseits durch Modellierungen und Simulationen des OUT e.V. begleitet und andererseits in diversen Teststrukturen und Prototypen praktisch umgesetzt und durch IST METZ auf ihr Anwendungspotenzial geprüft und qualifiziert. So konnte frühzeitig die zu erwartende Effektivität des finalen Konzeptes der Aufbau- und Verbindungstechnik bewertet und nachgewiesen werden.

Integrationskonzept

Unter dem Aspekt einer möglichst breiten Anwendbarkeit der zu entwickelnden Strahlerlösungen ermöglicht die Aufteilung der möglichen, direkt flächenorientierten Konstruktionen in einzelne, nahezu beliebig kaskadierbare Untereinheiten den größten Grad an Kombinierbarkeit und Flexibilität. In direkter Anpassung an die Erfordernisse des Systemkonzeptes können dabei Umfang und Komplexität der einzelnen Untereinheiten variieren. Aus Sicht der AVT sollten lediglich möglichst einheitliche Technologieerfordernisse bzgl. Montage und elektrischer Kontaktierung bestehen.

Konstruktive Integrationsplattform bildet eine thermisch hochleitende Wärmesenke, die einerseits als Montageträger für die Untereinheiten und alle AVT Prozesse dient und andererseits als Interface zu entsprechenden Kühlsystemen wirkt. Die Aufteilung in Untereinheiten unterstützt den Ausgleich unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten der zu integrierenden Komponenten.

In den Untereinheiten selbst sind die eigentlichen LED, ggf. erforderliche Komponenten zur Strahlformung und Elemente zur elektrischen Kontaktierung integriert. Ein Keramiksubstrat dient als eigentlicher Isolations- und Verdrahtungsträger. So wird die Prozessierung im Fertigungsprozess der MHE erleichtert. Die elektrische Verschaltung der Untereinheiten zu

beliebig komplexen Modulen und deren finale Kontaktierung erfordern möglichst einheitliche konstruktive und werkstofftechnische Schnittstellen.

Es wurden parallel verschiedene Layoutvarianten der Untereinheiten mit optischen Spot- und Flächencharakteristiken entwickelt, realisiert und qualifiziert.

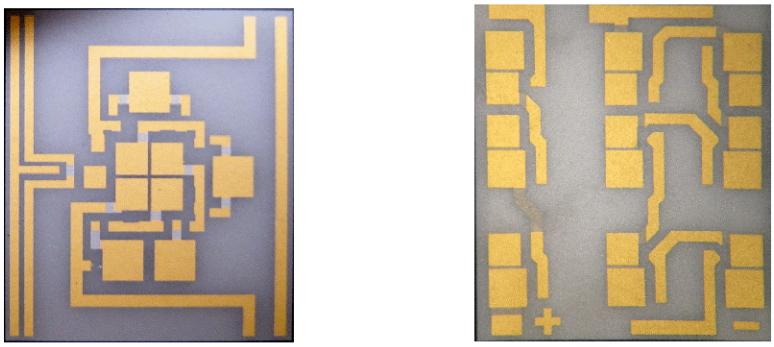


Abbildung 14: Layoutvarianten „2x2“ und „3x3“

Optimierter thermischer Übergangswiderstand

Allen Leistungsapplikationen ist das Erfordernis nach Montagetechnologien mit minimalen thermischen Übergangswiderständen gemeinsam. Deren Effektivität ergibt sich stets aus der Gesamtheit der Komponenten- und Materialeigenschaften und der angewendeten Fügetechnologien. Für die Untereinheiten der UV-Strahler sind somit die Teilkomponenten LED, Trägersubstrat und Kühlkörper und deren Interfaces untereinander in ihrer Gesamtheit zu betrachten. Zur Auswahl und Verfügbarkeit der LED wird auf die Ausführungen der Projektpartner verwiesen. Als Trägermaterial wurde AlN-Keramik gewählt, da sie bei vergleichbaren Isolationseigenschaften gegenüber Al_2O_3-Keramik eine ca. 20fach bessere Wärmeleitung besitzt. Metallisierungen der AlN-Keramik sind sowohl in Dünnfilm- als auch in Dickschichttechnologie möglich. Zur Realisierung der Fügeverbindungen der LED auf das Trägersubstrat und deren Montage auf die Wärmesenken wurden unterschiedlichste Materialien, wie Kleber und Lote untersucht. Neben den Lotmaterialien konnten auch Klebematerialien mit thermischen Leitfähigkeiten von ca. 45W/m*K prozesstechnisch und anwendungsseitig qualifiziert werden. Die Anwendung spezieller Dispens- und Druckverfahren diente der Sicherung einer entsprechenden Reproduzierbarkeit.

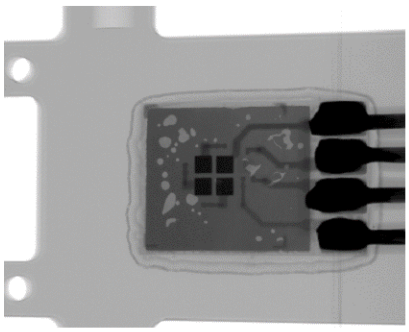


Abbildung 15: Mikro-CT Aufnahme eines gefügten Testträgers

Kontaktierverfahren LED, Untereinheiten und Komplettmodul

Das wedge-wedge-Drahtbonden bildete das bevorzugte Kontaktierverfahren sowohl für die Kontaktierung der bestückten LED als auch zur Kontaktierung der Untereinheiten auf der Wärmesenke untereinander. Dafür erfolgten umfangreiche Untersuchungen zur erreichbaren Nettostrombelastbarkeit, besonders unter dem Einfluss der anzuwendenden Passivierungsmaterialien. Final geeignete Lösungen wurden durch Begrenzung der Bonddrahtlänge und der Orientierung auf die Ausführung als Mehrfachbondungen gleicher Bondlänge gefunden. Durch entsprechende Anpassung des Drahtmaterials in der Technologiefolge konnte die einzuhaltende Stufung der Prozesstemperaturen gesichert und so das Drahtbondverfahren für die Anwendung qualifiziert werden.

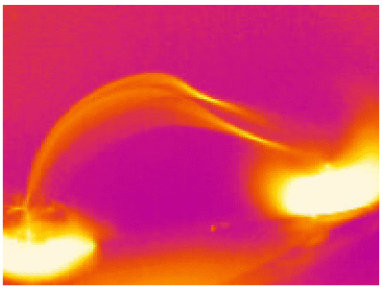


Abbildung 16: Temperaturanalyse bestromter Bondrähte

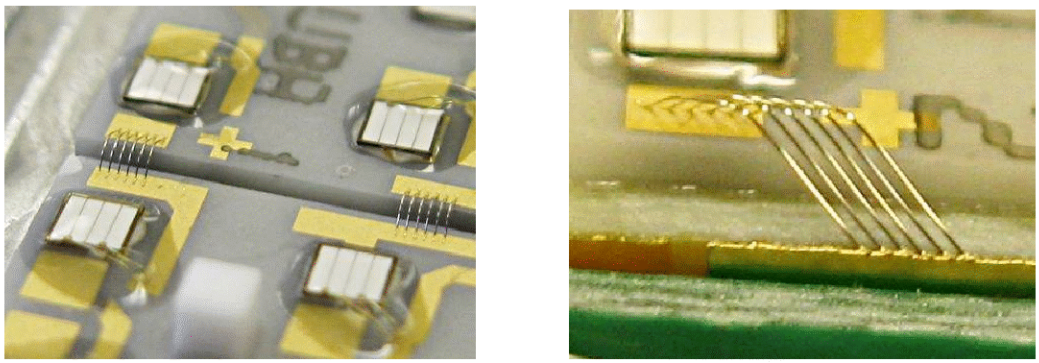


Abbildung 17: Mehrfachbondungen

Alternative Schaltungskonzepte

Die auf das Modul bezogene hohe Integrationsdichte der LED - in Verbindung mit den nur begrenzten Möglichkeiten zur elektrischen Verschaltung (Parallel- oder Serienschaltung der LED innerhalb der Untereinheiten) und der Untereinheiten untereinander - veranlassten Untersuchungen zur Erhöhung der Systemzuverlässigkeit, besonders für den Fall des LED-Bauelementeausfalls. Die Integration von jeweils den LED parallel geschalteten Shunt-Elementen wurde geprüft und anhand aufgebauter Prototypen anwendungsseitig bewertet. Der gefundene Lösungsansatz erscheint einerseits als sehr interessant, konnte aber andererseits die Erwartungen bislang noch nicht erfüllen. Hier besteht ein weiterer Entwicklungs- und Untersuchungsbedarf.

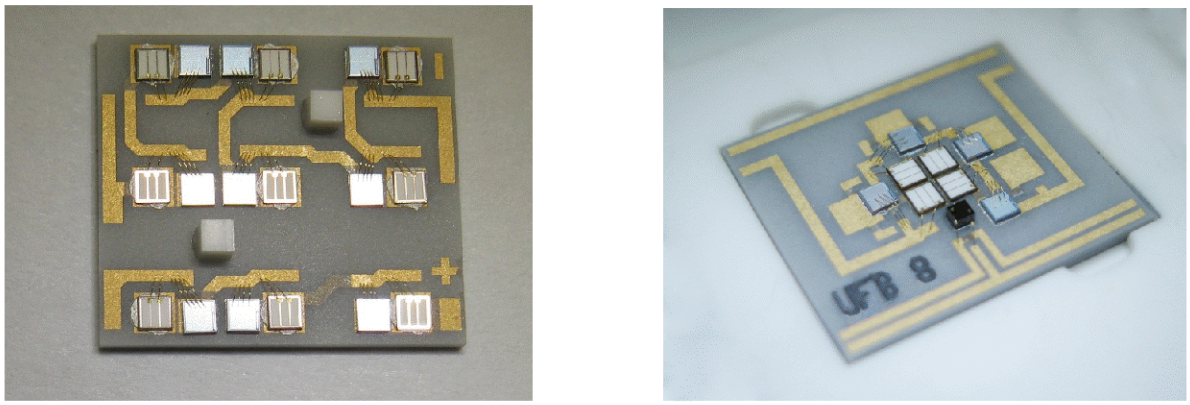


Abbildung 18: Parallelgeschaltete Shunt - Elemente

Passivierung

Einen wesentlichen Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten bildete die Qualifikation geeigneter Passivierungsmaterialien für die ungehausten LED und der modulbezogenen Bondverbindungen. Die Anwendung dieser Materialien dient unmittelbar der Sicherung der Systemzuverlässigkeit. Dafür müssen sie aus Sicht der reinen AVT hinsichtlich ihrer thermischen Ausdehnung, der Elastizität, den Haftungseigenschaften und der Prozessierbarkeit bewertet werden. Im speziellen Fall der UV-Strahlermodule galt es zusätzliche, unmittelbar optische Eigenschaften wie die Transparenz und aber auch das Alterungsverhalten unter den erwartenden hohen UV-Strahlungsintensitäten zu untersuchen und zu qualifizieren. Aus einem breit gefächerten Portfolio wurden schließlich zwei Materialien für die weitere Anwendung selektiert.

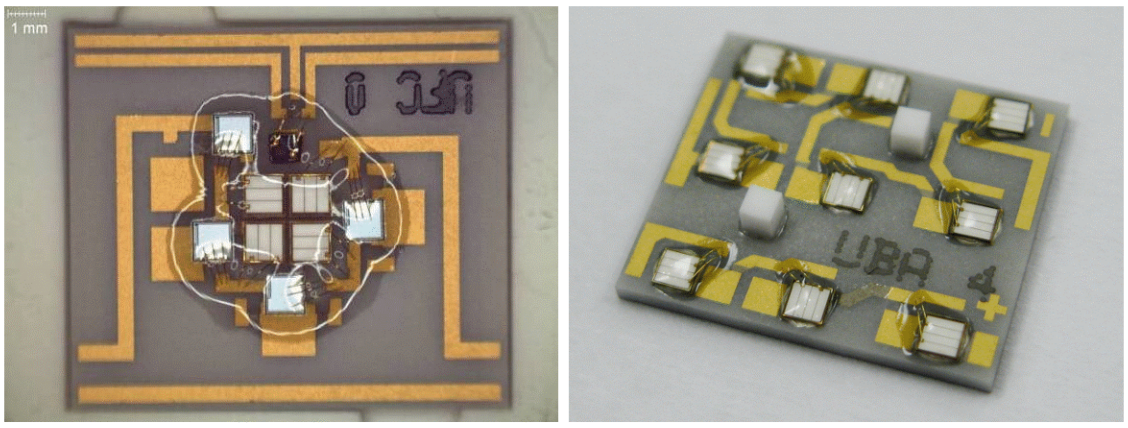


Abbildung 19: passivierte Untereinheiten

Montage Optikkomponenten

Die Integration optischer Elemente zur Strahlformung stellte eine weitere Herausforderung für die Entwicklungsarbeit dar. So müssen die Montage- und Fügeprozesse die für das optische Design geforderten Positioniergenauigkeiten von LED und optischem Element erfüllen. Andererseits müssen die Füge- und Klebermaterialien im Fertigungsprozess der MHE reproduzierbar prozessierbar und bzgl. der Prozesserfordernisse in die Technologiefolge

integrierbar sein. Nach einer anfänglichen Orientierung auf thermisch härtende Kleber erwiesen sich UV-härtende Materialien als optimal.

Abbildung 23 unter Punkt 3.3 zeigt eine auf einen Testträger montierte Linse.

Prototypen

Wie bereits ausgeführt wurden im Rahmen der Entwicklungsarbeiten Prototypen der UV-Strahlermodule aufgebaut und den Projektpartnern für Untersuchungen und Praxis-erprobungen zur Verfügung gestellt.

3.3 IST METZ GmbH: Entwicklung DC-Elektronik, Skalierbarkeit, Steuerung

Zu Projektstart wurden umfangreiche Vorversuche zur Auswahl von geeigneten Kühlkonzepten und UV-LED-Chips durchgeführt. Hierzu wurde ein Versuchsstand bei IST METZ aufgebaut und verschiedene wasserbasierte Kühlkonzepte untersucht. Im Vordergrund stand dabei zum einen die Integration von Kapillaren für die Realisierung einer großen Kühloberfläche. Zum anderen wurde ein Konzept für die Optimierung des Wärmetransports durch die Erzeugung und Erhöhung von Turbulenzen im kühlenden Fluid geprüft. Einen weiteren Schwerpunkt bildeten Versuchsreihen zur Eignung von UV-LED-Chips mit unterschiedlichen UV-Wellenlängen für das MLD-LED-Projekt.

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Vorversuchen wurden gemeinsam mit den Projektpartnern geeignete Konzepte für das Hochleistungs-UV-LED-Modul untersucht. Als wichtiges Ergebnis wurde ein Konzept ausgewählt, bei dem die Zahl der UV-LEDs reduziert und die optische Leistung durch die Bündelung der von den verbleibenden LEDs emittierten UV-Strahlung mit einer geeigneten Optik gesteigert werden konnte. Als weiteren Vorteil ermöglichte dieses Konzept im Vergleich zu konventionellen LED-Modulen eine größere Flexibilität bei der Wahl des Abstandes zwischen UV-LED-Modul und Objektebene. Zur Verifikation des Konzeptes wurde in Zusammenarbeit mit dem Partner Novaled AG ein Versuchsstand aufgebaut und Machbarkeitsstudien mit modifizierten Standard-UV-LED-Modulen durchgeführt. In Abbildung 20 wird der für die Machbarkeitsstudie im MLD-LED-Projekt von IST METZ konzipierte und realisierte sowie anschließend beim Partner Novaled AG installierte Versuchsaufbau gezeigt.

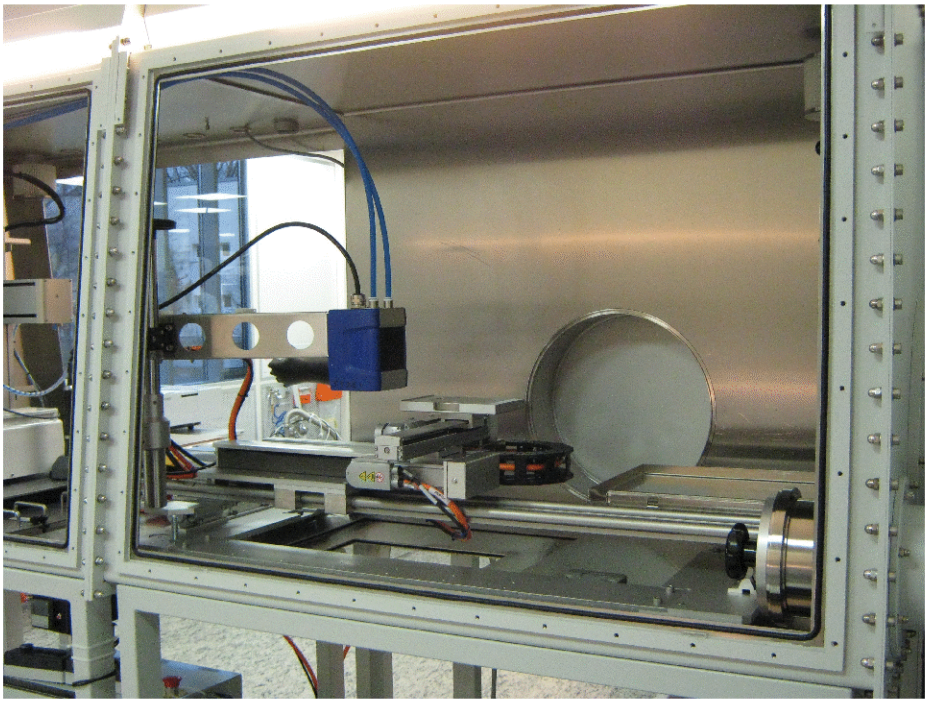


Abbildung 20: Versuchsaufbau mit modifiziertem Standard-UV-LED-Modul zur Durchführung von Machbarkeitsstudien

Im nächsten Arbeitsschritt wurden Versuchsreihen zur Ermittlung von Informationen über die elektronische und geometrische Gestaltung der MLD-LED-Module für die Entwicklung und Realisierung der kompakten DC-Elektronik gemeinsam mit dem Partner Novaled AG durchgeführt und die Anforderungen an das Netzteil definiert. Darauf aufbauend wurde das Layout für die DC-Elektronik und die Peripherie für den Betrieb der LED-Chips entwickelt sowie Elektronik-Testmuster realisiert und in Funktionstests erprobt. Um einen möglichst universellen Einsatz sicherstellen zu können wurde das Netzteil so realisiert, dass wichtige Funktionen wie z.B. Peak-/Dosis-Parameter, Pulsbetrieb, Stromstärke, usw. flexibel eingestellt werden können. Weiter wurde eine Schnittstelle zur Einbindung in übergeordnete Industriesteuerungen in das Netzteil integriert.

Im nächsten Arbeitsschritt folgte die Entwicklung und Integration der Hard- und Software sowie der Steuerungsfunktion in das MLD-LED-Modul. Hierzu wurden bei IST METZ Softwaremodule für die Bus-Kommunikation und die Steuerung der Zonenschaltung, für die Maschinen- und Bedienerschnittstelle sowie Module für die Messdatenaufnahme und das Daten- bzw. Fehlerlogin entwickelt, programmiert, integriert und in Funktionstests erprobt.

Aufgrund des technischen Fortschritts und immer kürzeren Zyklen für neu auf dem Markt vorgestellte UV-Chip-Technologien gestaltete sich der Aufbau von Testmustern für LED-Platinen aufwändiger als geplant. Vor allem die Untersuchung und Bewertung der kontinuierlich neu auf dem Markt präsentierten UV Chip-Technologien in Bezug auf die Einsatzmöglichkeiten im MLD-LED-Projekt erforderte einen hohen Zeitaufwand. In Abbildung 21 wird ein im MLD-LED-Projekt realisierter Testaufbau, bestehend aus einem Chipträger mit montierten UV-LED-Chips, gezeigt.

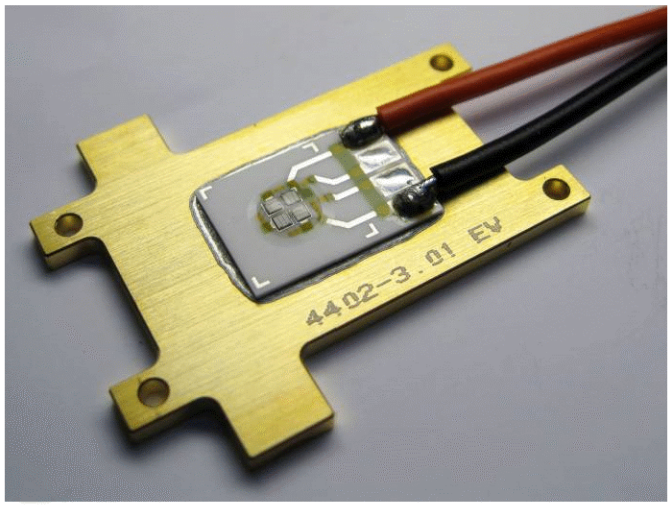


Abbildung 21: Chipträger mit UV-LED-Chips

Im Anschluss an die Entwicklungsarbeiten erfolgten umfangreiche Laborversuche. Konkret Untersuchungen zur Ermittlung der charakteristischen Eigenschaften sowie der prinzipiellen Eignung von Wasser- und Luft-basierten Kühlkonzepten für das flexibel skalierbare MLD-LED-UV-Modul im Hause IST METZ durchgeführt. Für den Bereich Wasserkühlung wurden hierzu unterschiedliche Konzepte, unter anderem ein „Düsen-Prinzip“ zur Vergrößerung der

Kühloberfläche sowie alternativ ein Heat-Pipe Konzept in Bezug auf ihre spezifischen thermodynamischen- und Materialeigenschaften sowie die Skalierbarkeit, usw., untersucht. Parallel erfolgten Untersuchungen zur Luft-Kühlung der MLD-LED-Module. Im Focus standen dabei vor allem die mit dem Projektpartner OUT durchgeführten Simulationen zur Luftkühlung von mit einem Metallschaum-Kühlkörper versehenen MLD-LED-Modulen. Als wichtiges Ergebnis hat die Auswertung der Versuchsreihen gezeigt, dass die Wasserkühlung eine deutlich höhere Kühlleistung als die Luftkühlung ermöglicht und entsprechend wesentlich kompakter realisiert werden konnte. Weiter konnte das Modul mit Luftkühlung nicht in eine Glovebox integriert werden, da die dortigen Prozessbedingungen (z.B. keine bewegte Luft) dies nicht zuließen.

Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Entwicklung eines Verfahrens zur zuverlässigen und reproduzierbaren Ermittlung der Junction-Temperatur für die neu auf dem Markt vorgestellten UV-LED-Typen. Mit der Junction-Temperatur wird die höchste, im Inneren eines UV-LED-Chips auftretende Temperatur bezeichnet. Entsprechend ist die Junction-Temperatur eine wichtige Kenngröße für den optimalen Betrieb und die Lebensdauer von UV-LEDs. Normalerweise kann die Junction-Temperatur einer UV-LED nur indirekt ermittelt werden. Entsprechend wurde im FuE-Projekt bei IST METZ ein Verfahren zur Ermittlung der Junction-Temperatur auf Basis von auf der Oberfläche des UV-LED-Chips gemessenen Temperaturen entwickelt und in Versuchsreihen verifiziert. Mithilfe dieses indirekten Verfahrens wurden die für den Einsatz im MLD-LED-Projekt interessanten UV-LED-Chips thermisch vermessen und daraus sowohl Hersteller- als auch typenspezifische Parameter für den optimalen Betrieb der UV-LEDs ermittelt und in einer Datenbank hinterlegt. In Abb. 3 wird beispielhaft eine Wärmebildaufnahme von 7 LEDs mit einer Stromaufnahme von 880 mA ohne Silikonverguss gezeigt.

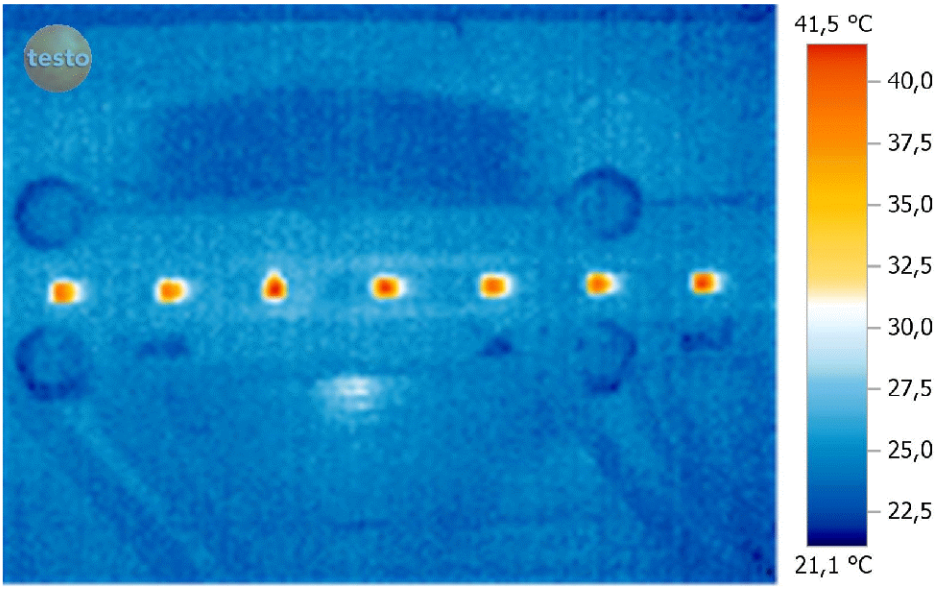


Abbildung 22: Wärmebildaufnahme von UV-LEDs bei 880 mA Strom ohne Silikonverguss

Einen weiteren Schwerpunkt bildeten die mit dem Partner Micro-Hybrid Electronic GmbH durchgeführten Versuchsreihen zur Entwicklung geeigneter Klebe- bzw. Löttechniken für die

Montage von UV-LEDs auf winklig angeordneten Flächen. Weiter wurden Linsen dimensioniert und bei IST METZ auf UV-LED-Chips montiert. In Abbildung 23 wird beispielhaft eine Trägerplatte mit auf UV-LED-Chips montierter Linse sowie schematisch die durch die Linse geänderte Abstrahlcharakteristik der UV-LED Chips gezeigt.

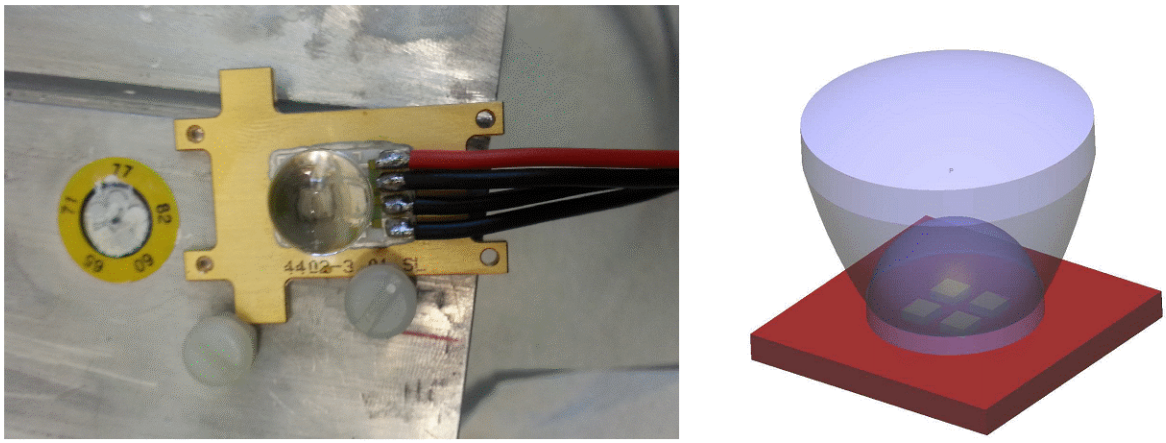


Abbildung 23: Trägerplatte mit auf die UV-LED Chips montierter (Beispiel)

In Abbildung 24 wird die Abstrahl-Charakteristik von ohne und mit Mikrolinsen-Arrays ausgestatteten UV-LED-Arrays gezeigt. Der Vergleich zeigt, dass durch den Einsatz des Mikrolinsen-Arrays ein deutlich homogeneres Bestrahlungsfeld sowie ein schmalerer Randbereich erzielt werden.

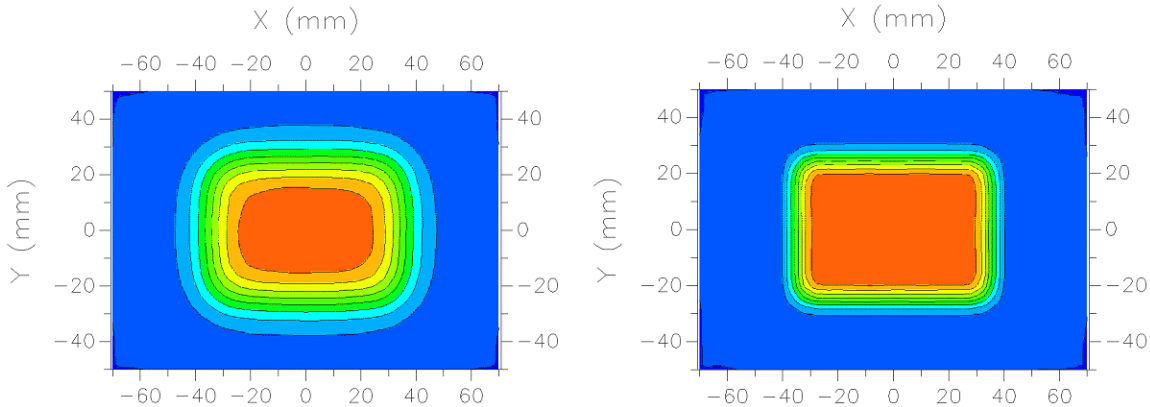


Abbildung 24: UV-LED-Array ohne und mit Optik

Im Anschluss an die Laborversuche wurde ein Demonstrator für das MLD-LED-Modul bei IST METZ aufgebaut und in Feldversuchen verifiziert. Als wichtiges Ergebnis konnten beim Partner Novaled AG mit einem auf 50 % Leistung reduzieren MLD-LED-Demonstrator OLEDs im

Vergleich zu Standard LED-Modulen mit doppelter Geschwindigkeit verkapselt werden. In Abbildung 25 wird der MLD-LED-Demonstrator in einer beim Partner Novaled AG zur Verfügung gestellten Glovebox beim Verkapseln von OLEDs gezeigt

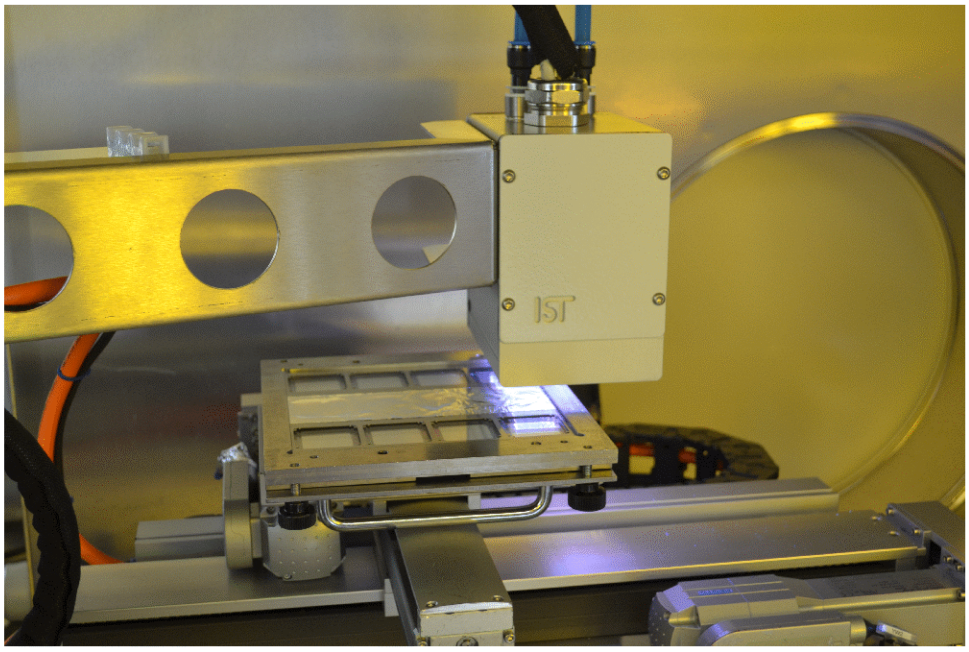


Abbildung 25: MLD-LED-Demonstrator in Novaled Glovebox beim Verkapseln von OLEDs

3.4 Novaled AG: OLED Verkapselung mit UV-LED-Modulen

Zu Beginn des Berichtszeitraums wurden zunächst intensive Abstimmungsgespräche mit allen Projektpartnern geführt, um die wesentlichen technischen und reinraumrelevanten Voraussetzungen für den Einsatz des UV-LED-Testmoduls im OLED-Verkapselungsprozess zu gewährleisten.

Anschließend entstand in enger Zusammenarbeit mit dem Partner IST METZ ein Konzept für die Planung und Konstruktion des UV-LED-Testmoduls. Parallel dazu wurde eine passende x-/y-Verschiebeeinheit konzipiert und realisiert, welche in ihrer Dimension an die Platzbedingungen in der Verkapselungs-Glovebox bei Novaled angepasst wurde.

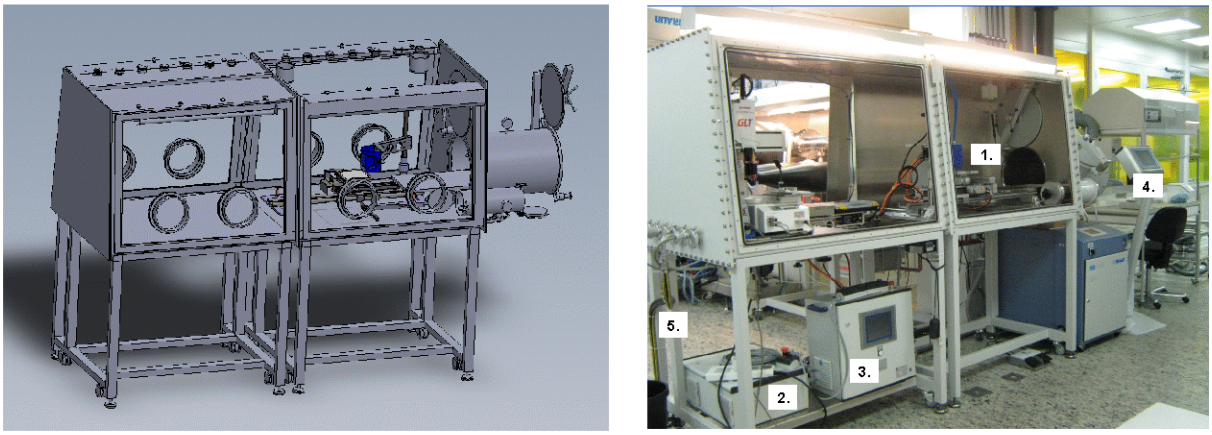


Abbildung 26: Konzept für das Layout des UV-LED-Moduls inkl. des x-/y- Verschiebetisches innerhalb der Verkapselungs-Glovebox (Bild links) sowie die finale Installation des UV-LED Testmoduls (Bild rechts) mit x-/y- Verschiebetisch (1), Strom-Spannungsversorgung für das UV-LED-Modul (2), Schrittmotorsteuerung (3), Bedienkonsole (4) und Kühlwasserversorgung (5).

Das UV-LED Test-Modul wurde schließlich von IST METZ am 12./13. Dezember 2011 an Novaled geliefert und installiert. Es erfolgte eine kurze Einweisung bzgl. der Funktionsweise und des Betriebs des neuen Belichtungssystems durch IST METZ. Anschließend wurde seitens Novaled ein erster Verkapselungstest durchgeführt, welcher die prinzipielle Funktionsfähigkeit des UV-LED-Moduls demonstrierte.

In einem ersten Versuchspaket wurden umfangreiche Tests mittels Calcium-Spiegel-Messungen durchgeführt, um den Novaled-Referenzkleber bei Standardbelichtung (Quecksilberdampflampe) mit der Belichtung mit dem MLD-LED-Testmodul zu vergleichen.

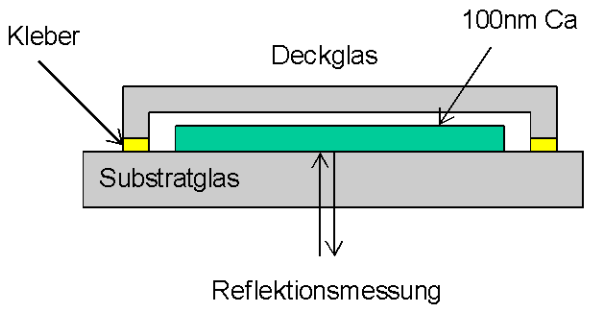


Abbildung 27: Schematischer Aufbau eines Ca-Spiegels zur Bestimmung der Verkapselungsqualität des in Test befindlichen Klebers. Dazu wird die Reflektivitätsabnahme der aufgedampften Ca-Schicht über die Zeit gemessen.

Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Vergleichbar gute Verkapselungsqualität mit beiden Aushärtemethoden erzielbar.
- Starke Wellenlängenabhängigkeit der Kleberaushärtung: im Testmodul standen die Wellenlängen 375nm, 385nm und 395nm zur Verfügung, lediglich mit der Wellenlänge 375nm konnte eine vollständige Aushärtung des Standardklebers erreicht werden (Datenblattangabe: 365nm).
- Der Einsatz einer (vom Hersteller empfohlenen) thermischen Nachhärtung erwies sich für beide Aushärtemethoden als nachteilig.
- Statt einer thermischen Nachhärtung wurde eine verlängerte Lagerzeit in der Glovebox untersucht und für beide Aushärtemethoden ein positiver Einfluss auf die Lebensdauer der Testobjekte (Ca-Spiegel) festgestellt.

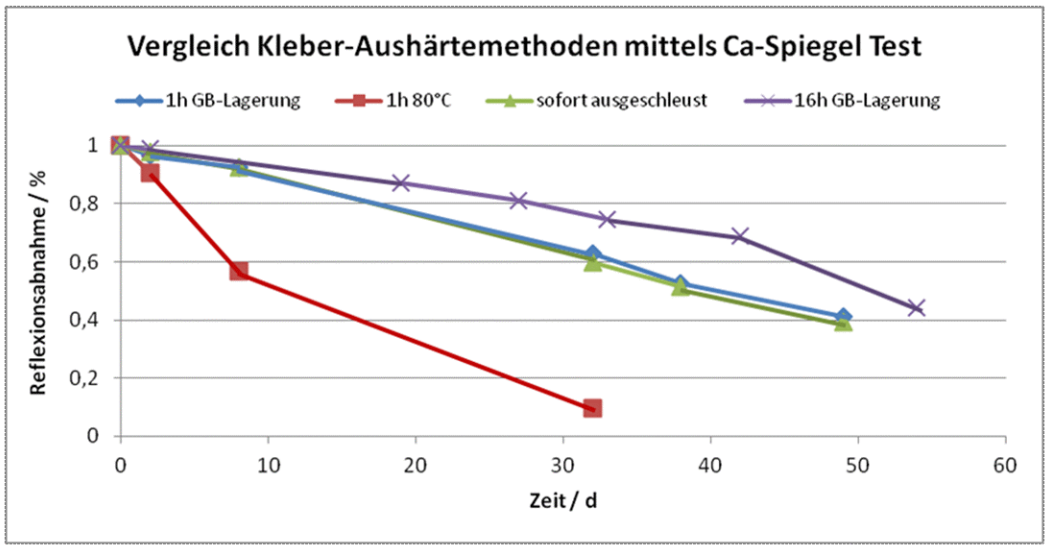


Abbildung 28: Vergleich verschiedener Aushärtemethoden mit dem MLD-LED-Modul mittels der Methode des Ca-Spiegeltests am Beispiel des Referenzklebers. Es wird deutlich, dass sich eine thermische Nachhärtung negativ auf die Verkapselungsqualität auswirkt. Zudem zeigt sich, dass eine längere Lagerung in der GB (>> 1h) zu einer längeren Ca-Lebensdauer führt.

Für die weiteren Untersuchungen wurden insgesamt acht Kleber von vier verschiedenen Herstellern ausgewählt. Folgende Festlegungen wurden auf der Grundlage der Ergebnisse der Vorversuche sowie der Datenblattangaben dafür getroffen:

- Verzicht auf thermische Nachhärtung, auch wenn sie vom Hersteller empfohlen wird
- Festlegung auf eine einheitliche Lagerzeit nach der Verkapselung von 24h in der Glovebox für alle Kleber
- Alle weiteren Arbeiten nur noch mit der Wellenlänge 375nm des MLD-LED-Testmodul
- Jedes Testobjekt (Ca-Spiegel bzw. OLED-Substrat) enthält neben dem zu untersuchenden Kleber auch eine Referenz, um ggf. Schwankungen zu erkennen und diese nicht fälschlicherweise dem betreffenden Kleber bzw. der Aushärtebedingung zuzuschreiben.

Eigen schaften	Kleber A	Kleber B	Kleber C	Kleber D	Kleber E	Kleber F	Kleber G	Kleber H	Referenz
Viskosität (Pa•s)	21	0,8	520	150	15-25	115	0,5	1,5	120
empfohlene Aushärtebe-dingungen	6J/cm² (365nm) + 1h 80°C	100mW/cm² >3min + 30min 80°C	6J/cm² (365nm) + 1h 100°C	60mW/cm² >30s + 24h Wartezeit	6J/cm² + 24h Wartezeit	6J/cm² + 24h Wartezeit	6J/cm² + 24h Wartezeit	6J/cm² + 24h Wartezeit	6J/cm² (365nm) + 1h 80°C
WVTR (g/(m²•d))	38 (60°C, 90%RH, 0,1mm Dicke)	k.A.	8 (60°C, 90%RH, 0,1mm Dicke)	1,7 (60°C, 90%RH, 1mm Dicke)	7,5	7,5	k.A.	k.A.	18 (60°C, 90%RH, 0,1mm Dicke)
Besonder-heiten	-	Nicht luftstabil!	-	Bei max. 25°C zu verarbeiten	-	-	-	-	-

Tabelle 5: Übersicht ausgewählter Materialeigenschaften der verschiedenen, im Test verwendeten, UV-Klebertypen.

Die untersuchten Kleber wurden hinsichtlich ihrer Eigenschaften bei der Verarbeitung und der Ca-Lebensdauer, jeweils im Vergleich zum Novaled-Standardkleber (= Referenz), bewertet. Die wichtigsten Ergebnisse waren:

- Nur ein Kleber (B) ließ sich nicht vollständig mit dem MLD-LED-Testmodul aushärten.
- Alle anderen Kleber ließen sich mit beiden Methoden komplett aushärten, die erzielten Ca-Lebensdauern variierten dabei im erwarteten Rahmen.

Die Untersuchungen mit dem Testmodul mit 375nm Wellenlänge wurden in einem nächsten Schritt dann auf OLED-Demonstratoren ausgeweitet. Neben der optischen Bewertung der OLED-Bauteile (Auftreten von sog. Dark Spots) wurde auch deren Strom-Spannungskennlinie aufgenommen und bzgl. ihrer zeitlichen Veränderung charakterisiert. Zur Beschleunigung des Degradationsvorgangs wurden die Proben dabei zwischen den

einzelnen Messschritten in einem Klimaschrank unter extremen Bedingungen gelagert (60°C und 90% rel. Luftfeuchte).

In der nachfolgenden Tabelle sind die wesentlichen Resultate zusammengefasst:

Untersuchung	Kleber A	Kleber B	Kleber C	Kleber D	Kleber E	Kleber F	Kleber G	Kleber H	Referenz
Ca-Lebensdauer (Std.-Lampe)	0	-	+	0	0	+	-	-	0
Ca-Lebensdauer (MLD-LED 375nm)	0	–	+	0	0	+	-	-	0
OLED-Test - optisch (Std.-Lampe)	0	keine OLED-Tests	0	-	-	+	keine OLED-Tests		0
OLED-Test - optisch (MLD-LED 375nm)	0		-	-	-	+			0
Handling / Dispensen	0	0	-	–	0	0	-	-	0
Handling / Lagerung	0	-	0	0	0	0	0	0	0
Kleberfarbe	Farblos	Weiß	Weiß	Weiß	Weiß	Weiß	Farblos	Farblos	Farblos

Tabelle 6: Übersicht zu den Ergebnissen der Kleber-Untersuchungen. Es wurden die Klebertypen A bis H jeweils mit dem Referenzkleber verglichen (0: vergleichbar, -: schlechter, –: deutlich schlechter, +: besser als die Referenz).

Es zeigte sich, dass insbesondere die beiden Klebertypen C und F Vorteile gegenüber dem Referenzkleber aufweisen. Beispielhaft ist dies in der folgenden Abbildung für die Bewertung des Dark-Spot-Wachstums des Klebers F gezeigt.

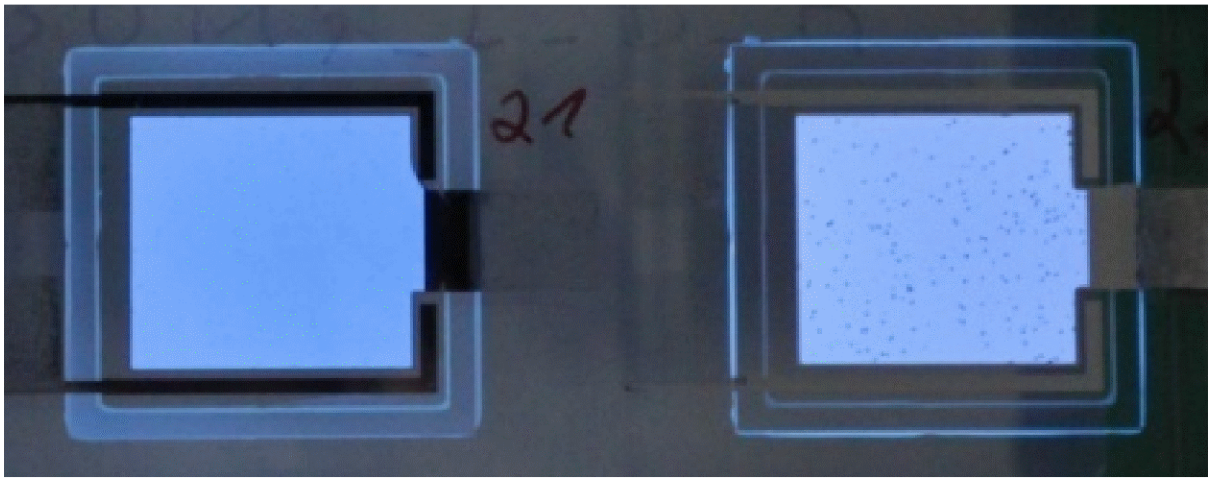


Abbildung 29: Vergleich des Dark-Spot-Wachstums an zwei OLED-Proben der Größe 2x2cm². Die OLED-Probe, welche mit dem Klebertyp F verkapselt wurde zeigt keine Dark Spots (Bild links), während die Referenzprobe eine deutliche Anzahl an Dark Spots aufweist.

Aus der Abbildung 29 wird deutlich, dass bei Belichtung mit dem MLD-LED-Testmodul die Alterung des Klebers F deutlich langsamer verläuft als für den Standardkleber (vgl. Anzahl an Dark Spots). Dasselbe Ergebnis ist ebenso bei Belichtung mit der Standardlampe zu beobachten.

Neben dieser optischen Begutachtung der prozessierten OLED-Bauteile wurde auch eine Bewertung der Strom-Spannungskennlinien vorgenommen. Hierbei konnte man feststellen, dass im Verlauf der Alterung eine Verschiebung der Kennlinien hin zu höheren Spannungen stattfindet, welcher vergleichbar zwischen den Klebern ist. Jedoch zeigten sich in den ersten Ergebnissen starke Streuungen in den Ergebnissen, so dass eine finale Bewertung zunächst nicht möglich war.

Zum Ende des Projektes (April 2013) wurde das Labormuster-Modul mit 365nm Wellenlänge fertiggestellt und konnte, nach Beantragung einer zweimonatigen, kostenneutralen Projektverlängerung, in den beiden Folgemonaten für ergänzende Untersuchungen verwendet werden. Dabei wurde auch die oben geschilderte Problematik der Verschiebung der Strom-Spannungskennlinie bzw. deren Streuung nochmals adressiert.

Neben der angepassten Wellenlänge, welche nun den empfohlenen Datenblattangaben der Kleberhersteller entspricht, weist das Labormodul als wesentliche Neuerung gegenüber dem Testmodul mit 375nm Wellenlänge die Möglichkeit auf, im Pulsbetrieb arbeiten zu können. Damit lassen sich prinzipiell deutlich höhere Energieeinträge realisieren, als dies mit dem alten Modul möglich war.

Aufgrund der eingeschränkten Zeit wurden mit dem Labormodul lediglich die vielversprechendsten Klebertypen aus den Versuchen mit 375nm nochmals mittels Ca-Spiegel sowie OLED-Bauteilen getestet. Die Grundeinstellung des neuen LED-Moduls wurde so ausgerichtet, dass der Energieeintrag vergleichbar zu dem Wert des 375nm Moduls war (~ 6J/cm²). Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 7 aufgeführt.

Dabei zeigte sich bei den elektrischen Tests, dass für alle drei Testkleber A, C und F gegenüber der Referenz eine deutlich größere Verschiebung der Strom-Spannungskennlinie über die Lagerzeit zu beobachten ist. Diese Beobachtung ist unabhängig von der verwendeten Lichtquelle und trifft sowohl bei Nutzung der Standardlampe als auch bei Verwendung des MLD-LED-Moduls auf. Diese Resultate stehen insbesondere für den Kleber F in krassem Widerspruch zu den Ergebnissen der optischen Begutachtung. Eine schlüssige Erklärung hierfür konnte aber bis jetzt nicht gefunden werden.

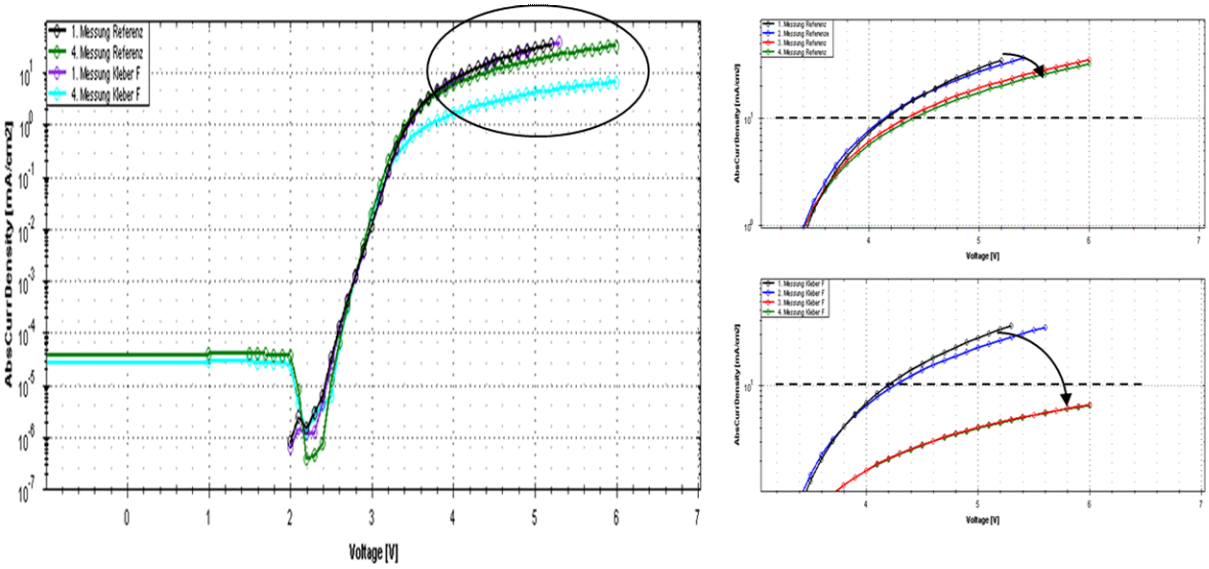


Abbildung 30: Vergleich der Strom-Spannungskennlinien für zwei OLED-Proben, welche beide mit dem Testmodul 365nm verkapselt wurden. Das Bild links zeigt die Veränderung der Kennlinien - initial und nach vier Wochen Lagerzeit im Klimaschrank. Es zeigt sich eine deutlich größere Verschiebung für den Testkleber F (hellblau) gegenüber der Referenz (grün). Der eingekreiste Ausschnitt im linken Bild ist rechts noch einmal in vergrößerter Form dargestellt (oben: Referenz; unten: Kleber F). Die farblich verschiedenen Strom-Spannungs-kurven stehen für Messungen nach unterschiedlichen Lagerzeiten. Initial (schwarz), eine Woche (blau); zwei Wochen (rot); 3 Wochen (grün).

Untersuchung	Kleber A	Kleber B	Kleber C	Kleber D	Kleber E	Kleber F	Kleber G	Kleber H	Referenz
Ca-Lebensdauer (MLD-LED 365nm)	0	/	+	/	/	+	/	/	0
OLED-Test - optisch (MLD-LED 365nm)	0	/	0	/	/	+	/	/	0
OLED-Test - elektrisch (MLD-LED 365nm)	-	/	–	/	/	-	/	/	0

Tabelle 7: Ergebnisse der Kleber-Untersuchungen mit dem Labormodul 365nm Wellenlänge. Es wurden lediglich die Klebertypen A, C, und F mit der Referenz verglichen (0: vergleichbar, - : schlechter, –: deutlich schlechter, +: besser als die Referenz).

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Der Funktionsnachweis für den UV-LED-gestützten Verkapselungsprozess am Beispiel von OLED-Bauteilen konnte erfolgreich erbracht werden.
- Es ließen sich keine wesentlichen Unterschiede in der Verkapselungs-qualität der OLED-Proben bzgl. der beiden unterschiedlichen Belichtungsmethoden – Quecksilberdampf-lampe vs. UV-LED-Modul – feststellen.

- Demgegenüber zeigen sich deutliche Unterschiede in der Verkapselungs-qualität zwischen den untersuchten Klebertypen – das ließ sich sowohl an Ca-Spiegeln als auch an OLED-Bauteilen nachweisen.
- Diese qualitativen Unterschiede zwischen den Klebertypen ergeben sich sowohl mit den UV-LED-Modulen (365nm und 375nm), als auch mit der Quecksilberdampflampe.
- Die Messdaten der optischen und elektrischen Untersuchungen zu den Versuchen an OLED-Bauteilen weisen teilweise gegensätzliche Ergebnisse auf, welche bisher nicht erklärt werden konnten (siehe Tabelle 7).
- Es konnte eine Abhängigkeit der Kleberaushärtung zwischen den Wellenlängen 375nm, 385nm und 395nm festgestellt werden. Erstere führt zu guten Verkapselungs-ergebnissen, während für die beiden anderen Wellenlängen kein zufriedenstellendes Resultat erzielt werden konnte.
- Dagegen zeigen sich im Rahmen dieser Studie keine wesentlichen Unterschiede in der Verkapselungsqualität zwischen 375nm (Testmodul) und 365nm (Labormodul). Ein Direktvergleich der beiden Module war aufgrund der nicht gleichzeitigen Verfügbarkeit nicht möglich.
- Die Verwendung des UV-LED-Moduls für den OLED-Verkapselungsprozess gestattet ein problemloses Handling in der Glovebox – insbesondere kann ein Aufheizen der GB-Atmosphäre vermieden werden, was in punkto Prozess-Stabilität in einem Massen-produktionsumfeld Vorteile bieten könnte.

Ob sich darüber hinaus, durch weitere Variation der Einstellungen am UV-LED Labormodul (etwa Pulsbetrieb, höherer Energieeintrag in die OLED-Klebenaht ohne erhöhten Temperatureintrag …) ein zusätzlicher, qualitativer Vorteil gegenüber der Standardlampe erzielen ließe, wäre eine Fragestellung für nachfolgende Untersuchungen.

4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die vorliegende Abschlussveröffentlichung ist ein wichtiger Beitrag zur Veröffentlichung der im MLD-LED-Projekt erarbeiteten Ergebnisse.

Weiter wurde der in das MLD-LED-Projekt aufgenommenen assoziierte Industriepartner bereits im Projektverlauf eng in die Entwicklungsarbeiten eingebunden und über die Entwicklungs- und Versuchsergebnisse informiert.

Nach Abschluss des MLD-LED-Projektes planen IST METZ wie auch die Projektpartner Novaled AG, Micro-Hybrid Electronic GmbH und OUT die Veröffentlichung von Ergebnissen und Erkenntnissen aus dem MLD-LED-Projekt in führenden nationalen und internationalen Fachzeitschriften sowie auf Fachkongressen.

5. Danksagung

Mit diesem Abschlussbericht bedanken sich die Projektpartner IST METZ GmbH, Micro Hybrid Electronic GmbH, Novaled AG und Optotransmitter-Umweltschutz-Technologie e.V. (OUT e.V.) beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die anteilige Unterstützung, ohne die die mit erheblichen technischen Risiken verbundenen Entwicklungsarbeiten im MLD-LED-Projekt nicht in dem realisierten Umfang und Zeitrahmen hätten durchgeführt werden können.

Weiter bedanken wir uns beim Projektträger KIT, insbesondere bei unserem Projektbetreuer Herrn Ulf Zanger für die kompetente Betreuung unseres Projektes.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.