

ADLED (Advanced LED Modules and Light-Engines for Professional Lighting)

1. Einleitung

Zwischen 15% und 20% des österreichischen Stromverbrauches entfallen auf die Beleuchtung; vier Fünftel davon werden für öffentliche und gewerbliche Beleuchtung verbraucht, ein Fünftel davon wird in privaten Haushalten verbraucht.

LEDs werden heutzutage aufgrund eines rasanten Fortschritts in ihrer Performance (Effizienz) und der Qualität des Lichtes große Chancen eingeräumt, eine Revolution im Beleuchtungsbereich zu bewirken. Im Vergleich zu den im professionellen Bereich etablierten Leuchtmitteln, wie etwa Kompakt-Fluoreszenzlampen oder Leuchtstoffröhren, hat die LED im Hinblick auf Ihre Effizienz in den letzten Jahren stark aufgeholt und wird in wenigen Jahren überhaupt das weitaus effizienteste Leuchtmittel am Markt sein.

Ausgehend vom *State-of-the-art* war es das Ziel des Projektes ADLED, neue Meilensteine in der Performance von LED-Modulen und *Light-Engines* insbesondere für die öffentliche und gewerbliche Beleuchtung zu setzen. Anwendungen wie etwa *Downlights*, *Spotlights* oder Vitrinen-Beleuchtung erfordern höchste Lichtströme, spezialisierte Optiken mit höchster Effizienz, effizientes Thermomanagement, und optimierte Leiterplattentechnologien. Durch ein optimiertes Thermomanagement und eine optimierte Lichtausbeute sollten innovative Module entwickelt werden, die neue Maßstäbe in der Beleuchtungstechnologie setzen, zu signifikanten Energieeinsparungen führen und damit zu einer wesentlichen Reduktion der Treibhausgasemission beitragen.

Um die oben angeführten, unterschiedlichen technologischen Aspekte zur Optimierung von LED-Modulen und *Light-Engines* in ihrer Gesamtheit bearbeiten zu können, bildeten im Rahmen des Projektes ADLED die Firmen Tridonic Jennersdorf GmbH und AT&S AG sowie das Institut für Sensor- und Aktuatorssysteme der TU Wien und das Institut für Oberflächentechnologien und Photonik der JOANNEUM RESEARCH Forschungsges.mBh ein Konsortium, in welches sie ihr jeweiliges Spezialwissen zu Themengebieten wie dem Thermomanagement, der Leiterplattenfertigung, der Verbindungstechnik, der LED-Modulfertigung und der optischen Systemintegration einbrachten.

Gemeinsam wurden in diesem Projekt vollkommen neue Ansätze zur funktionalen Integration aller erforderlichen Komponenten, neuartigen Leiterplatten- und Verbindungstechnologien bis hin zur Optimierung der Lichtauskopplung und der Lichtqualität von LED-Modulen und *Light-Engines* verfolgt, welche schlussendlich in erste Ausführungen in Form von Demonstratoren integriert worden sind. Zudem sollte durch eine optimierte Lichtqualität (homogene Abstrahlung über den Raumwinkel, höchste Weißlichtqualität), höchste Lichtausbeute, hohe Lebensdauer bei hoher Umweltverträglichkeit und eine flexible Anwendbarkeit in einer Reihe von Beleuchtungs- und Anzeigesystemen in Kombination mit der Berücksichtigung der Kundenbedürfnisse dafür gesorgt werden, dass diese Technologien auch eine breite Akzeptanz am Markt erreichen. Unterstützung dafür kam insbesondere auch von den Verkaufsabteilungen der beiden Firmenpartner, die laufend die neuesten Trends und Entwicklungen am Markt in die laufende Projektplanung einbrachten.

Aufgabenstellung

Die wesentliche Aufgabenstellung des Projekts ADLED war die Bereitstellung von Technologien und Demonstratoren auf der Basis neuartiger Leiterplattentechnik,

energieeffizienter LED-Module und LED *Light-Engines*, die in verschiedene Produkte der professionellen Beleuchtung umgesetzt werden können, und die im Beleuchtungsbereich über verbessertes Thermomanagement, Lichtausbeute, Energieeffizienz sowie einer erhöhten Marktakzeptanz zu signifikanten Energieeinsparungen und Treibhausgasreduktion führen.

Dazu wurden in diesem Projekt vollkommen neue Ansätze zur funktionalen Integration aller erforderlichen Komponenten, neuartigen Leiterplatten- und Verbindungstechnologien bis hin zur Optimierung der Lichtauskopplung und der Lichtqualität von LED-Modulen und *Light-Engines* verfolgt, welche schlussendlich in erste Ausführungen in Form von Prototypen auf der Basis von 2 Demonstratoren integriert wurden.

Konkret wurden durch die Arbeiten zwei wesentliche Treiber für eine breite Akzeptanz am Markt adressiert. Zum einen wurde Augenmerk auf eine optimierte Lichtqualität (möglichst homogene Farbtemperatur über den Raumwinkel, höchste Weißlichtqualität), hohe Lichtausbeute und hohe Lebensdauer bei hoher Umweltverträglichkeit sowie eine flexible Anwendbarkeit in einer Reihe von Beleuchtungs- und Anzeigesystemen in Kombination mit der Berücksichtigung von Kundenbedürfnissen gelegt. Zum anderen sollte durch das Auffinden neuartiger kostengünstigerer Leiterplattentechnologien mit optimiertem Thermomanagement ein nennenswerter Beitrag zur Preisreduktion von LED-Modulen und LED-Leuchten erzielt werden, um auch im Hinblick auf die Anschaffungskosten die Marktdurchdringung der LED-Technologie voranzutreiben.

Schwerpunkte des Projektes

Entsprechend den beiden oben angeführten Treibern bestanden die Schwerpunkte des Projekts zum einen in der Erforschung von neuartigen, kostengünstigeren und thermisch optimierten Leiterplattenaufbauten- und -technologien und zum anderen in der Optimierung der *Chip-on-Board*-Integration der LED-Bauelemente sowie des Farbkonversionsprozesses, bei denen im Sinne des gesamtheitlichen Ansatzes neben den optischen Aspekten insbesondere auch die thermischen Aspekte berücksichtigt wurden. Auf der Basis der erforschten Technologie und unter Berücksichtigung der Anforderungen des Markts wurden schlussendlich zwei Demonstratoren, deren Einsatzgebiet insbesondere auf die Bereiche Industrie und Gewerbe abzielt, (Flächenleuchte, *Spot-Light*) entworfen und gefertigt.

Einordnung in das Programm

Der im Rahmen dieses Projekts adressierte Aspekt zur Reduktion der CO₂-Emissionen kann primär dem Schwerpunkt der Energieeffizienz zugeordnet werden. Die Senkung der Nachfrage nach Energie durch ihre sinnvollere Nutzung und durch die Verbesserung der Effizienz ihres Einsatzes ist neben der Forcierung erneuerbarer Energieträger eine der beiden Hauptstrategien der österreichischen Energiepolitik. Gerade dem Segment der Beleuchtung kommt im Hinblick auf Energieeinsparungspotentiale durch einen effizienteren Betrieb eine entscheidende Bedeutung zu. Wie in einer Studie der IEA aus dem Jahre 2006 festgestellt wurde, werden weltweit 19% des elektrischen Stroms für Beleuchtung verwendet. Dieses entspricht der Emission von 1.9 Milliarden Tonnen CO₂. Entsprechend eines in dieser Studie aufgestellten Szenarios würde, auf der Basis einer jährlichen Zunahme des weltweiten Bedarfs an künstlich erzeugtem Licht von 2.4% (1.8% in den OECD-Ländern) sowie einer damit einhergehenden Erhöhung des Energieverbrauchs von jährlich 1.9%, ohne Gegenmaßnahmen und technologische Fortschritte zur Effizienzsteigerung der weltweite Energieverbrauch bis 2030 um 80%

höher liegen. Demgegenüber zeigt ein weiteres Szenario, dass es möglich sein sollte, durch eine Kombination von energiepolitischen Akzenten und essentiellen technologischen Fortschritten diesen zusätzlichen Bedarf an künstlicher Beleuchtung abzudecken, ohne dass sich der Energieverbrauch gegenüber dem Jahr 2006 nennenswert erhöhen würde. Auch wenn die Steigerungsraten für den Bedarf an künstlichem Licht in Österreich nicht ganz so hoch sind wie im weltweiten Durchschnitt, ergibt sich daraus eigentlich ein enormes Potential, den Energieverbrauch für Beleuchtung national sogar zu reduzieren.

Ziel des Projekts ADLED war es dazu, neben der grundsätzlichen Verfügbarkeit verbesserter Technologien, insbesondere auch durch Anreize für eine stärkere Marktdurchdringung auf der Basis von qualitativ hochwertigeren und gleichzeitig kostengünstigeren LED-Lichtlösungen essentielle Beiträge zu liefern.

Verwendete Methoden

Das Projekt bestand aus insgesamt 11 Arbeitspaketen, welche sich im Rahmen industrieller Forschungs- und experimenteller Entwicklungsaktivitäten mit der Bereitstellung der Grundlagen und der Prozesstechnik von neuartigen Leiterplattenaufbauten mit optimierten thermischen und optischen Eigenschaften der Integration der LED-Bauelemente sowie neuartigen Ansätzen und Technologien für die Farbkonversion und die Weißlichterzeugung beschäftigten. Darauf basierend wurden neue Ansätze für optimierte Weißlicht-LED-Module erarbeitet, wobei neben der Effizienzsteigerung an sich insbesondere auch Strategien für die Reduktion von Farbabweichungen in der Produktion sowie während des Betriebs der LED-Module im Mittelpunkt standen.

Durch die enge Verknüpfung der einzelnen Arbeitspakete musste jeder dieser Ansätze und jedes dieser Arbeitspakete auf die jeweils anderen abgestimmt werden. Um die Effizienz der LEDs steigern zu können bedarf es z.B. eines umfassenden Thermomanagements, welches den Leiterplattenaufbau und die optimale Integration der LED in die Leiterplatte berücksichtigt, während der Leiterplattenaufbau selbst von seinen thermischen und optischen Eigenschaften her so gestaltet sein muss, dass eine bestmögliche Effizienz und Farbqualität der LED-Module gewährleistet werden kann.

Durch Einbringen der jeweiligen Kompetenzen der einzelnen Projektpartner wurden damit alle Komponenten eines LED-Modulaufbaus, von der Leiterplatten- und der Verbindungstechnologie, dem Thermomanagement, der Modulfertigung und der Farbkonversionstechnologie bis hin zur optischen Systemintegration in einer gesamtheitlichen Betrachtungsweise optimiert und aufeinander abgestimmt. Die auf diese Weise entwickelten Ansätze für optimierte Leiterplattenaufbauten und für optimierte Weißlicht-Technologien wurden schließlich in Form von Labormustern und Demonstratoren zu neuartigen LED-Modulen und -Lichtlösungen zusammengeführt.

Aufbau der Arbeit

Wie bereits oben angeführt, wurden die einzelnen Aspekte in einer gesamtheitlichen Betrachtungsweise unter Berücksichtigung des jeweiligen Spezialwissens der Projektpartner erarbeitet.

Insbesondere hat sich auch die Kooperation aus Industrie- und Wissenschafts-Partnern als sehr effektiv und erfolgreich herausgestellt. In einer solchen Konstellation können sowohl die markttechnischen und kundenspezifischen Aspekte, als auch neue innovative Ansätze, die aus dem wissenschaftlichen Bereich stammen, betrachtet werden. Somit können Konzepte entwickelt werden, die einerseits auf ganz neuen Ansätzen basieren,

andererseits jedoch auch darauf abzielen, prozesstechnisch und kosteneffizient realisierbar zu sein.

Die einzelnen Arbeitspakete stellten eine Kombination aus industrieller Forschung und experimenteller Entwicklung dar. Damit konnte sichergestellt werden, dass die erforschten Grundlagen innerhalb des Projekts bereits direkt in Labormuster übergeführt werden, die schon zahlreiche Aspekte und Anforderungen einer möglichen weiterführenden Fertigung berücksichtigen konnten.

2. Inhaltliche Darstellung

Im Folgenden sind einige der verfolgten Ansätze und Konzepte exemplarisch dargestellt. Die Abbildung 1 zeigt eines der Konzepte, das im Rahmen der Erforschung neuer Leiterplattentechnologien verfolgt wurde. Dabei wird in der Leiterplatte (z.B. FR4) eine Kavität erzeugt (siehe Abbildung 2). Der LED-Chip wird in weiterer Folge in der Kavität direkt auf der unteren Kupferlage platziert. Damit ist eine ausgezeichnete thermische Anbindung des LED-Chips an einen Kühlkörper möglich, indem er auf der Oberseite der unteren Kupferlage montiert wird. Die Abbildung 3 zeigt Mikroskopie-Aufnahmen eines derartigen Aufbaus bestückt mit einem LED-Chip bzw. von einem Schliff durch den Aufbau. Die Aufbauten wurden auf der Basis thermischer Simulationen optimiert bzw. charakterisiert, siehe Abbildungen 4 und 5. Wie aus der Abbildung 4 ersichtlich hat dieser Aufbau einen deutlich geringeren thermischen Widerstand als z.B. Leiterplattenaufbauten aus FR4 (LED-Chip sitzt auf FR4-Oberfläche) oder IMS-Substraten. Wie aus dieser Abbildung 5 ersichtlich, ist bei optimierter Wärmeableitung aus dem LED-Chip aus thermischer Sicht nun nicht mehr die Ableitung der Wärme von der Rekombinationsschicht der LED das große Problem, zum höchsten Temperatureintrag kommt es nun im Bereich der Farbkonversionsschicht.

Dies liegt daran, dass diese Farbkonversionsschichten üblicherweise aus Phosphorpartikeln bestehen, die in einer Silikonmatrix eingelagert sind. Aufgrund der geringen thermischen Leitfähigkeit der Silikonmatrix (ca. 0.2 W/mK) und den im Rahmen des Farbkonversionsprozesses im Bereich der Phosphore erzeugten Temperatureintrag (Stokes-Shift, Quantenausbeute kleiner 100%) kommt es daher zu einer starken Erwärmung der Farbkonversionsschicht.

Dies hat zweierlei Nachteile: Zum einen stellt die hohe Temperatur eine große Belastung für die Materialien dar und kann zu frühzeitiger Degradation führen (LED-Leuchten werden auf Betriebsdauern von 25.000 Stunden und mehr ausgelegt). Zum anderen ist die Quantenausbeute des Phosphors temperaturabhängig. Mit zunehmender Temperatur nimmt sie ab, das heißt der generierte Anteil an gelbem Licht wird mit zunehmender Temperatur immer geringer. Dadurch kann es während des Betriebs zu einer Änderung des Farborts des von der LED emittierten Lichts kommen.

Diese Phänomene wurden im Rahmen der Erforschung von Farbkonversionstechnologien genau untersucht und Konzepte zur Reduktion dieses Wärmeeintrags evaluiert. So zeigt sich, dass durch eine höhere Konzentration des Phosphors in der Silikonmatrix (durch gleichzeitige Reduktion der Schichtdicke der Farbkonversionsschicht) der Wärmeeintrag deutlich reduziert werden kann.

Die linke Seite von Abbildung 6 zeigt in diesem Zusammenhang die Oberflächentemperatur der Farbkonversionsschicht eines LED-Aufbaus, bei dem die Farbkonversionsschicht eine Dicke von 400 µm hat und die Phosphorkonzentration in der Silikonmatrix 10 vol. % beträgt. Durch Reduktion der Schichtdicke (200 µm) und Erhöhung der Phosphorkonzentration (16 vol. %) können die Oberflächentemperaturen deutlich reduziert werden (siehe rechte Seite der Abbildung 6). Die Dicke und die

Phosphorkonzentration der Farbkonversionsschicht wurden in letzterem Fall so gewählt, dass wiederum der gleiche Farbort des abgestrahlten weißen Licht erreicht wird wie im Fall, der in der linken Seite dargestellt ist. Erhöhung der Phosphorkonzentration und insbesondere Anreicherung des Phosphors in der Nähe der LED-Chipoberfläche (diese dient als Wärmesenke) sind daher einige der Strategien, um die Erwärmung der Farbkonversionsschicht möglichst gering zu halten.

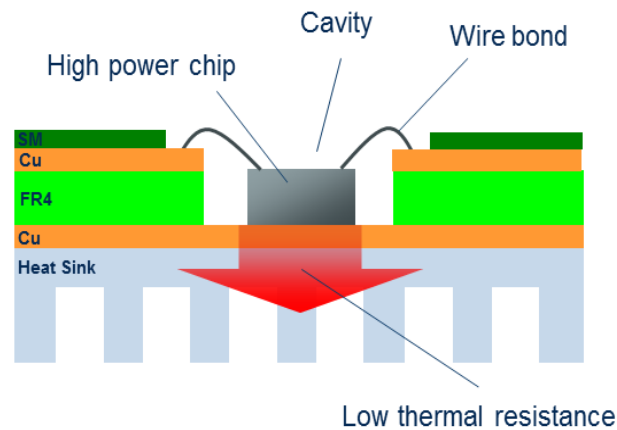


Abbildung 1: Leiterplattenaufbau, bei dem in das Leiterplattenmaterial eine Kavität eingebracht wird. Der LED-Chip wird in der Kavität direkt auf der unteren Kupferlage montiert. Damit ist eine optimale Wärmeabfuhr vom LED-Chip auf einen rückseitigen Kühlkörper möglich.

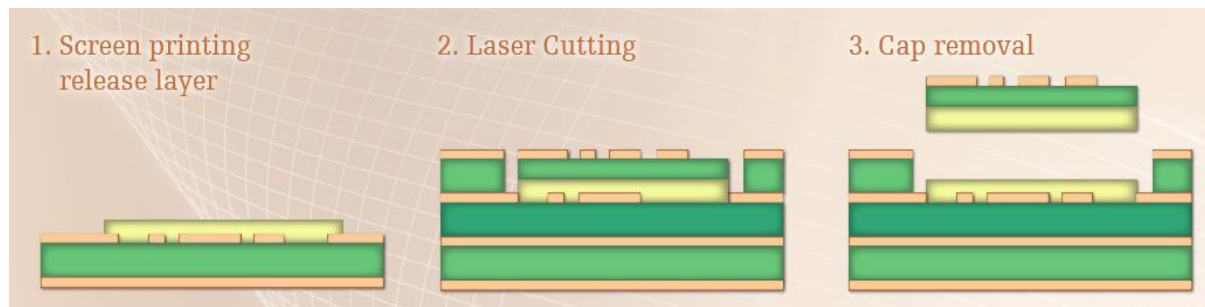


Abbildung 2: Grundsätzliches Verfahren zur Fertigung der Kavitäten im Leiterplattenmaterial.

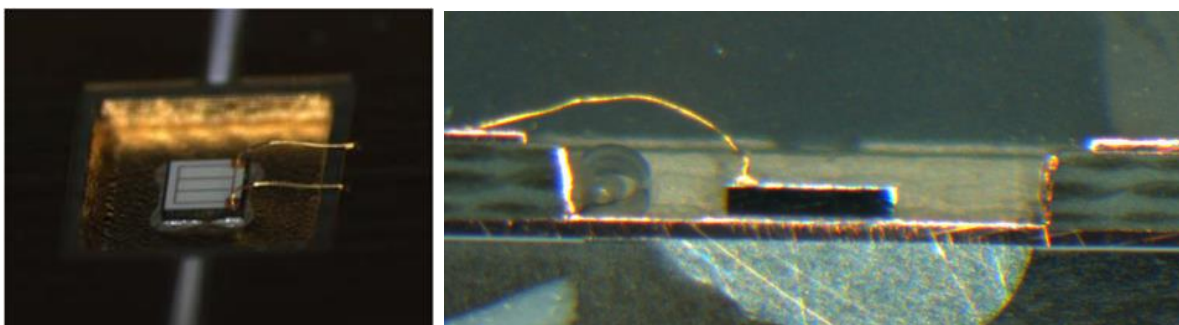


Abbildung 3: Links: Mikroskopaufnahme einer Kavität in einer FR4-Leiterplatte, wobei die Kavität mit einem LED-Chip bestückt ist, rechts: Mikroskopaufnahme eines Schliffbilds durch eine derartige Kavität.

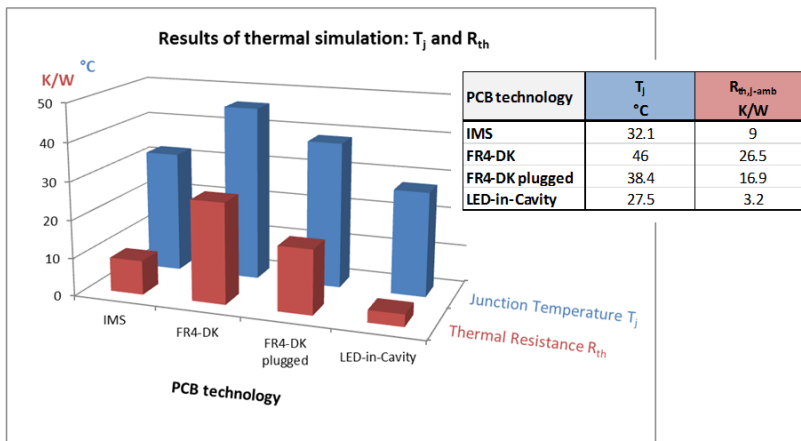


Abbildung 4: Vergleich der thermischen Widerstände verschiedener Leiterplattenaufbauten. Wie ersichtlich weißt der Aufbau mit der Kavität (als *LED-in-Cavity*) bezeichnet einen deutlich geringeren thermischen Widerstand auf als andere Leiterplattenaufbauten (LED-Chip wird auf der Oberfläche des FR4 Materials oder auf einem IMS-Substrat aufgebracht).

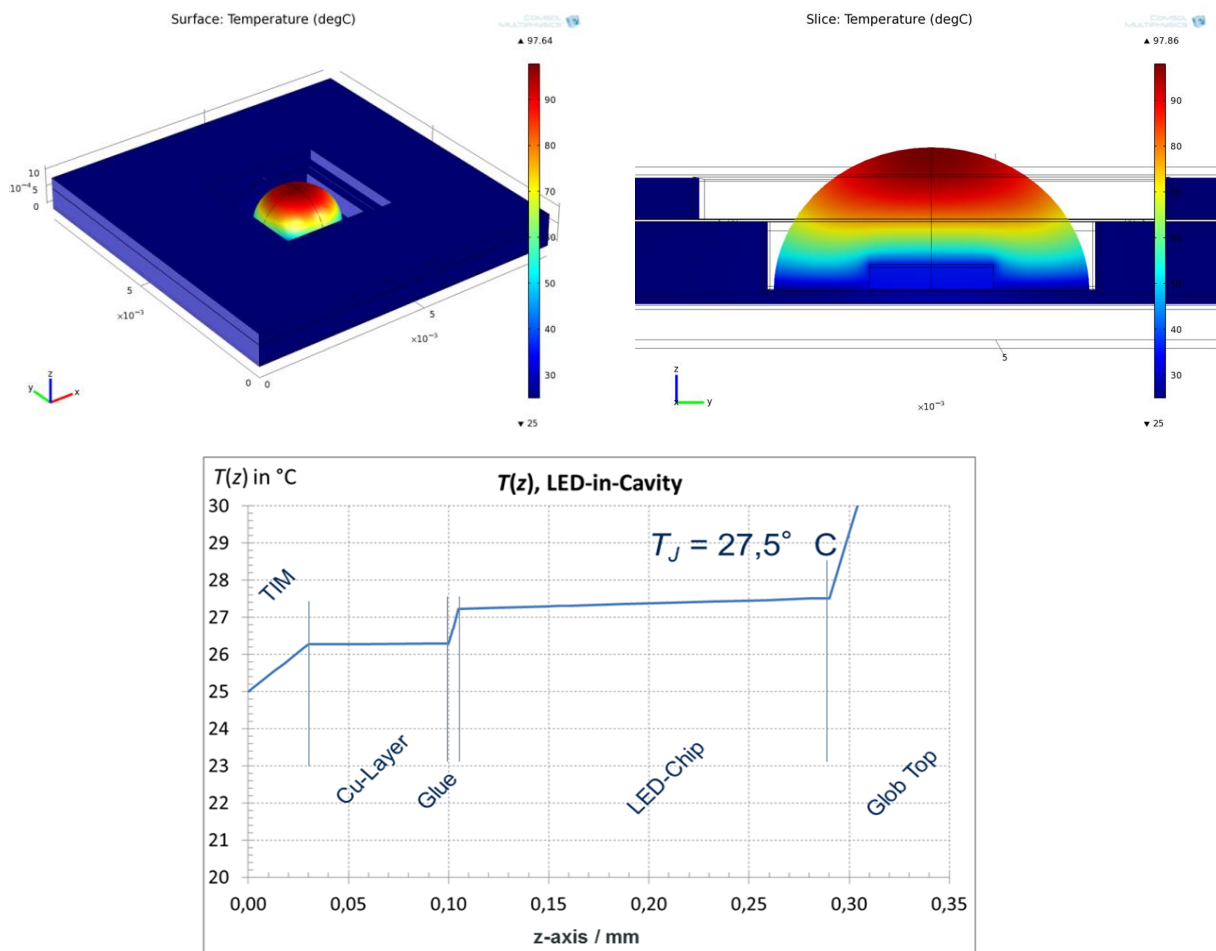


Abbildung 5: Der größte Temperatureintrag tritt nicht mehr im Bereich der Rekombinationszone des LED-Chips sondern im Bereich der Farbkonversionschicht (hier in Glob-Top Ausführung) auf.

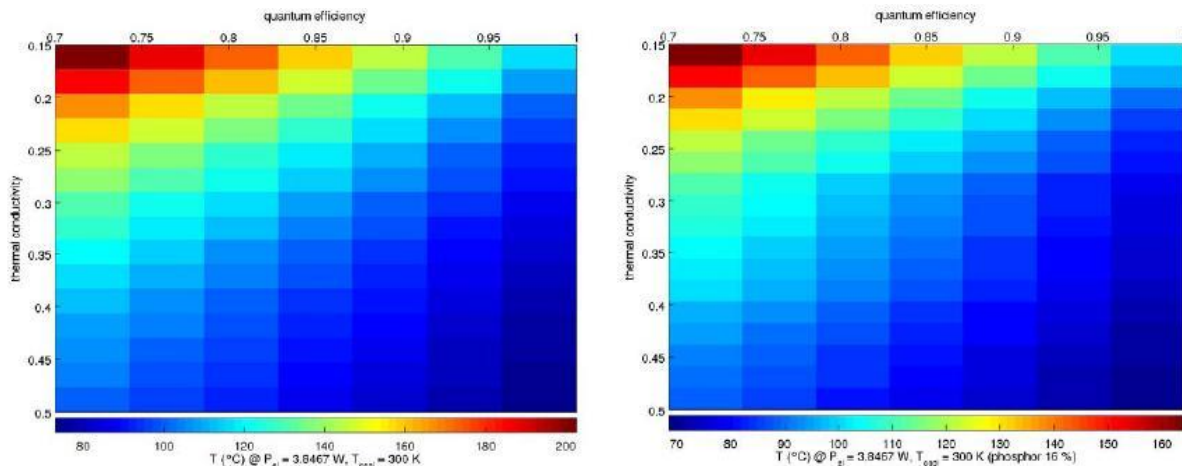


Abbildung 6: Oberflächentemperaturen auf der Farbkonversionsschicht während des Betriebs. Die linke Seite zeigt die Oberflächentemperatur für eine Farbkonversionsschicht eine Dicke von 400 μm und eine Phosphorkonzentration in der Silikonmatrix von 10 vol. % Durch Reduktion der Schichtdicke (200 μm) und Erhöhung der Phosphorkonzentration (16 vol. %) können die Oberflächentemperaturen deutlich reduziert werden (rechte Seite der Abbildung). Die Dicke und die Phosphorkonzentration der Farbkonversionsschicht wurden in letzterem Fall so gewählt, dass wiederum der gleiche Farbort des abgestrahlten weißen Lichts erreicht wird, wie im Fall der in der linken Seite dargestellt ist.

Als ein Beispiel für einen neuartigen *Chip-on-Board*-Modul-Ansatz auf der Basis der *LED-in-Cavity* Leiterplattentechnologie zeigt Abbildung 7 einen *LED-in-Cavity*-Strip bestehend aus mehreren in einer Reihe angeordneten Kavitäten, die mit LEDs bestückt und mit Farbkonversionsmaterial aufgefüllt wurden. Die Kavitäten wurden in unterschiedlichen Größen gefertigt, über die Größe kann die Farbtemperatur und die Farbhomogenität eingestellt werden.

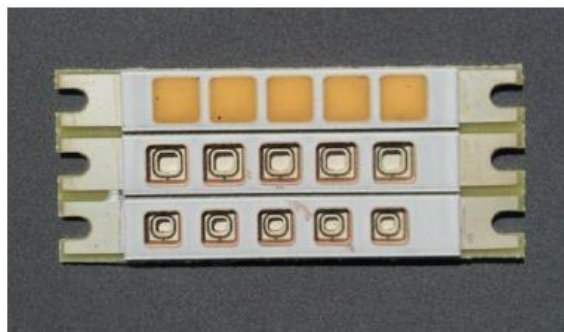


Abbildung 7: *LED-in-Cavity*-Strip. Die Kavitäten werden mit LEDs bestückt und mit Farbkonversionsmaterial aufgefüllt (siehe obere Reihe). Die Kavitäten können in unterschiedlichen Größen gefertigt werden, über die Größe kann die Farbtemperatur und die Farbhomogenität eingestellt werden.

Auf der Basis der Erkenntnisse zu den Temperatureffekten bei der Farbkonversion, weiteren Ansätzen für (thermisch und optisch) optimierte Leiterplattentechnologien und Erkenntnisse zur Optimierung der Lichtauskopplung aus den Aufbauten wurden weitere *Chip-on-Board*-Modul-Aufbauten erarbeitet bzw. bestehende Systeme optimiert, sowohl für *Glob-Top*-Ausführungen der Farbkonversionsschicht als auch für sogenannte *Damm&Fill*-Aufbauten (letztere ist in Abbildung 8 dargestellt). Dabei wird um die auf der

Leiterplatte aufgebracht LEDs ein Damm gezogen, das innere des Damms wird in weiterer Folge mit dem Farbkonversionsmaterial aufgefüllt. Im Rahmen des Projekts wurde dieser Aufbau in mehreren Generationen weiter optimiert. Wichtig für eine Effizienzerhöhung ist auch in diesem Fall, dass die Phosphorpartikel möglichst dicht gepackt sind und möglichst nahe an der Chip-Oberfläche angebracht sind.

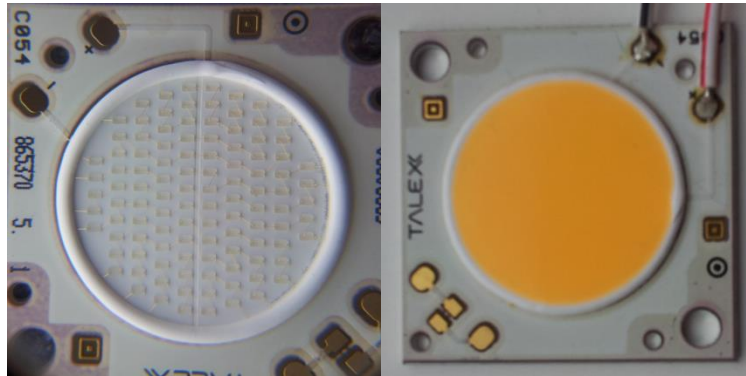


Abbildung 8: Weiteres Beispiel für ein optimiertes *Chip-on-Board*-Modul: *Damm&Fill* Aufbau mit optimierter Farbkonversionsschicht. Um die auf der Leiterplatte angeordneten LED – Chips wird ein Damm gezogen. Der Damm besteht aus einem hochreflektierenden Material. Dieser Damm wird im Anschluss mit dem Farbkonversionsmaterial aufgefüllt.

Demonstratoren

Im Rahmen des Projekts wurden letztlich 2 Demonstratoren auf der Basis der neuartigen Leiterplatten- und *Chip-on-Board*-Modul-Technologien gefertigt. Beim ersten Aufbau handelt es sich um eine Flächenleuchte, wie sie in Abbildung 9 dargestellt ist.

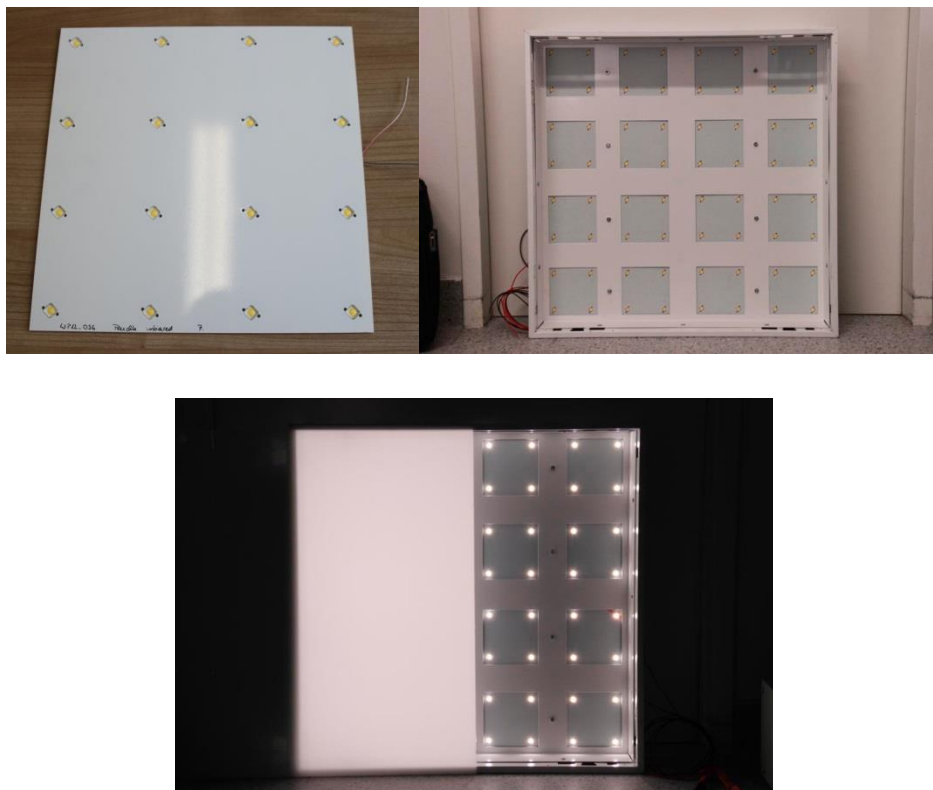


Abbildung 9: Demonstrator 1 in Form einer Flächenleuchte.

Um eine möglichst gute Homogenisierung des Lichts in einem derartigen Aufbau, der aus mehreren LED-Lichtpunkten besteht, zu erzielen und gleichzeitig die Bauhöhe der Leuchte möglichst niedrig zu halten, wurde auch die Möglichkeiten zur Verwendung von dünnen Folienoptiken evaluiert. Die Abbildung 10 zeigt den zugehörigen Ansatz, bei dem das LED-Licht zunächst durch einen Kollimator gebündelt und im Anschluss durch eine aufgesetzte Folienoptik aufgeweitet wird. Die dafür erforderlichen Strukturen der Folienoptik wurden mittels optischer Simulationen ermittelt, die Fertigung erfolgte über UV-Nanoimprintlithographie.

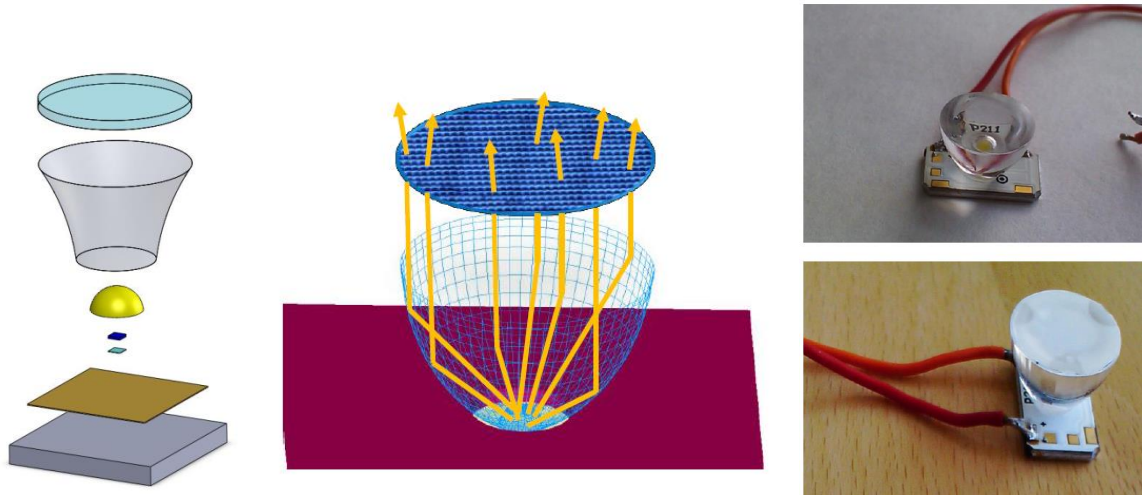


Abbildung 10: *Optik-in-Foil-Ansatz:* Auf die mit dem LED-Chip bestückte Leiterplatte wird ein Kollimator aufgebracht, auf den Kollimator wiederum die Folienoptik. Die rechten Abbildungen zeigen Labormuster des Aufbaus (mit und ohne Folienoptik auf dem Kollimator).

Die Abbildung 11 zeigt die Abstrahlcharakteristika der einzelnen Aufbauten, die Abbildung 12 die zugehörige Variation der Farbtemperatur unter verschiedenen Beobachtungswinkeln. Die Abbildung 13 zeigt die mittels optischer Simulationen ermittelte Bestrahlungsstärkeverteilung eines darauf basierten Leuchtaufbaus in einem Abstand von 80 cm.

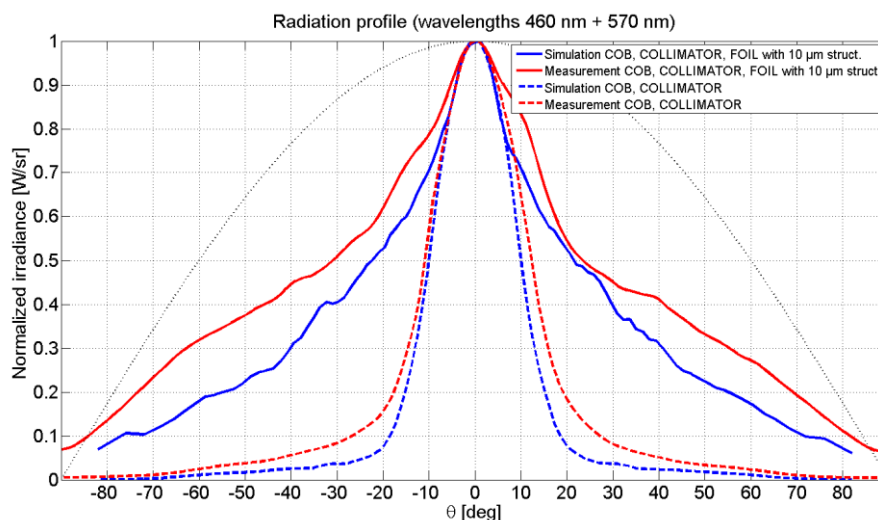


Abbildung 11: Simulierte und experimentell gemessene Abstrahlcharakteristika der Modul-Aufbauten (Kollimator mit und ohne Folienoptik).

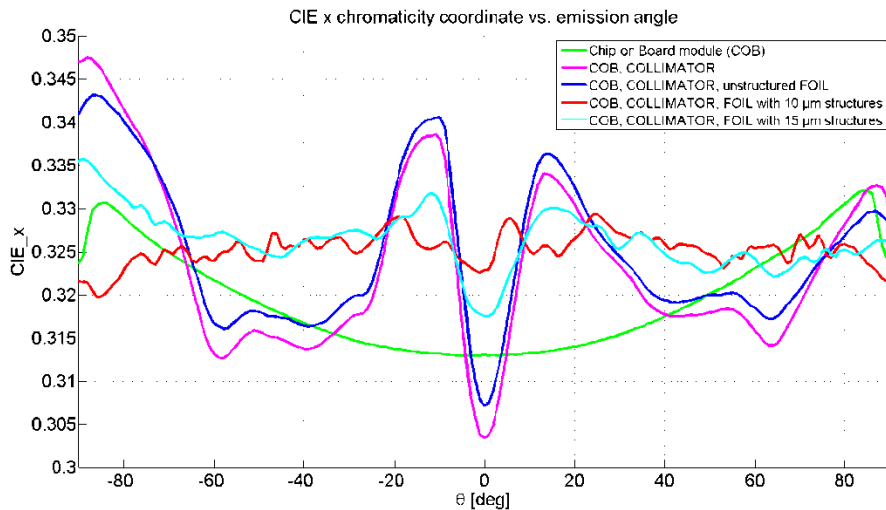


Abbildung 12: Variation der CIE x Koordinate in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel für das Chip-on-Board-Modul ohne Kollimator, mit Kollimator, Kollimator mit nicht strukturierter Folie, und Kollimator mit Folienoptik (strukturiert). Für den letzteren Fall sind zwei Ausführungsformen (10 μm Strukturen und 15 μm Strukturen dargestellt).

Wie aus der Abbildung 12 ersichtlich, ist einer der wesentlichen Vorteile der Folienoptik die Reduktion der Variation der Farbtemperatur unter verschiedenen Beobachtungswinkeln, die bei Verwendung eines Kollimators ohne Folienoptik sehr ausgeprägt auftritt.

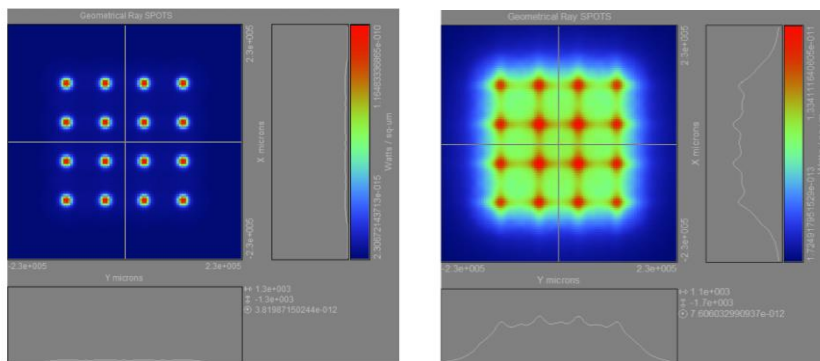


Abbildung 13: Bestrahlungsstärkeverteilung von ein LED-Array auf der Basis der Flächenleuchte in einem Abstand von 80 cm. Links Kollimator ohne und rechts mit Folienoptik.

Für den zweiten Demonstrator wurde ein Spot-Light gewählt, die Abbildung 14 zeigt den dafür entwickelten Modulaufbau.

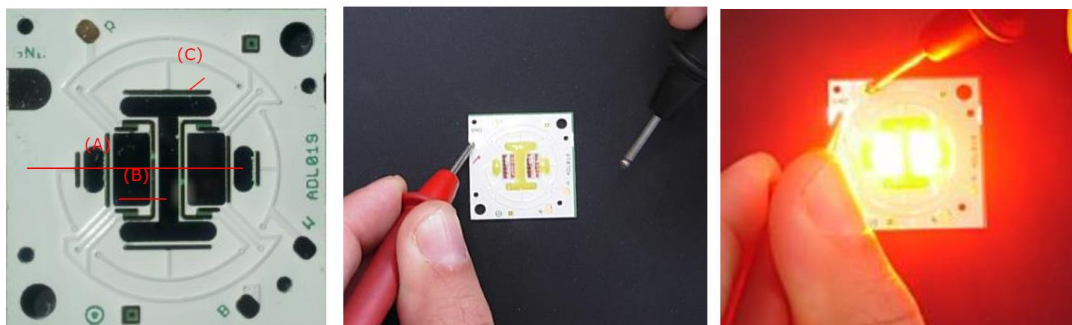


Abbildung 14: Modulaufbau für Demonstrator 2

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Zu den wesentlichen Ergebnissen des Projektes zählen von Seiten der Firmen Tridonic Jennersdorf GmbH und AT&S AG neben den grundsätzlichen Erkenntnissen des bearbeiteten Themenportfolios mit Sicherheit die Demonstratoren I und II, die durch in diesem Projekt entwickelte und sehr erfolgsversprechende Leiterplattenkonzepte (sehr gute Wärmeableitung, hohe Lichtreflexion der Oberfläche) realisiert werden konnten. Für die beiden Forschungspartner zählen sicherlich die Charakterisierung des thermischen Verhaltens des Modulaufbaus und der Temperaturverteilung innerhalb der Farbkonversionsschicht zu den Highlights des Projekts, die sich auch in zahlreichen Vorträgen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen widerspiegeln. Die TU Wien konnte dazu ein neues Verfahren zur Bestimmung der *Junction*-Temperatur erarbeiten und einen entsprechenden Messplatz aufbauen. Die Temperatur im Bereich der *Junction*, die selbst bei High-Power-LEDs ein Volumen von einem tausendstel Kubikmillimeter kaum übersteigt, lässt sich nicht mit berührungslosen Verfahren von außen wie etwa der Thermographie hinreichend genau bestimmen. Ein Durchbruch ist mit einer extrem dynamischen Messmethode mit Pulsen mit einer Dauer von nur wenigen Mikrosekunden gelungen, die es erlaubt, die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit der LED ohne Verfälschung durch Eigenerwärmung zu kalibrieren und damit in der Folge die *Junction* der LED selbst als Temperatursensor einsetzen zu können. Für den Forschungspartner Joanneum Research gehören insbesondere auch die gefertigten Folienoptiken zu den wesentlichen Erkenntnissen des Projekts.

4. Ausblick und Empfehlungen

Auch wenn die Beleuchtung nur einen (kleineren) Teil der in Österreich insgesamt verbrauchten Energie ausmacht, sollte dem Themenschwerpunkt „energieeffiziente Beleuchtung“ sicherlich verstärkt Aufmerksamkeit gewidmet werden. Eine kürzlich veröffentlichte Studie (Bezugsjahr 2012), die von der Statistik Austria im Auftrag des Umweltministeriums und der E-Control durchgeführt wurde, zeigte, dass im Vergleich zu 2008 in den österreichischen Haushalten der Stromverbrauch in einigen Bereichen (Warmwasser, Heizung, Kühl- und Gefriergeräte) abgenommen, in anderen Bereichen, wie auch der Beleuchtung aber zugenommen hat. Auch wenn heutzutage durch das Glühbirnenverbot energieeffiziente Lichtlösungen in aller Munde sind, scheitert eine effiziente Marktdurchdringung, z.B. durch Energiesparlampen, an deren sehr schlechten Image. Dieses gilt es im Falle der LED-Beleuchtung unbedingt zu vermeiden. Auch wenn dieses Forschungsprojekt nicht direkt auf das Segment der Haushaltbeleuchtung ausgerichtet war, so machen die Ergebnisse doch das enorme Verbesserungspotential und damit weitere substantielle Möglichkeiten zur Energieeinsparung deutlich, dass durch innovative Ansätze im Bereich der LED-Technologie realisiert werden kann. Dieses sollte durch Berücksichtigung des Aspekts der „energieeffizienten Beleuchtung“ in zukünftigen Ausschreibungen unbedingt weiter unterstützt werden.

5. Literaturverzeichnis

Teile der Ergebnisse des Projekts ADLED wurden bisher in folgenden Konferenzbeiträgen präsentiert und folgenden wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht, einige Präsentationen und Veröffentlichungen werden noch folgen. Insbesondere die wissenschaftlichen Veröffentlichungen können bei Interesse genutzt werden um sich ein detailliertes Bild von den Ergebnissen zu machen.

Mündliche Vorträge

- C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, F. P. Wenzl, **The phosphor's optical properties - white light quality relationship of white LEDs**, *11th International Conference on Simulation of Optoelectronic Devices, NUSOD 11, 05. - 08. September 2011, Rome, Italy*, (Poster)
- C. Sommer, F. P. Wenzl, F. Reil, P. Pachler, H. Hoschopf, P. Hartmann, **The impact of the phosphor material properties on the white light quality of phosphor converted white LED sources**, *LED professional Symposium, LpS 2011, 27. - 29. September 2011, Bregenz, Austria* (mündlich)
- F. P. Wenzl, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, P. Fulmek, J. Nicolics, **White light-quality of phosphor converted light-emitting diodes: A study from a materials perspective of view**, *2nd European Energy Conference, E2C, 17. - 20. April 2012, Maastricht, Netherlands*, (Poster)
- P. Krivic, F. P. Wenzl, C. Sommer, G. Langer, P. Pachler, H. Hoschopf, P. Fulmek, J. Nicolics, **Investigation of thermal properties of power LED illumination assemblies**, *35th International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2012, 09. - 13. May 2012, Bad Aussee, Austria*, (Poster)
- 35th International Spring Seminar on Electronics Technology, Bad Aussee, Austria, 9. bis 13. Mai 2012: Eingeladene Vorträge (Keynote talks):
 - Hannes Stahr, AT&S AG: **"New Advanced Packaging Technology at AT&S"**
 - Franz Zerobin, Tridonic Jennersdorf GmbH: **"LED - Status and Challenges for Lighting Application"**.
- F. P. Wenzl, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, P. Fulmek, J. Nicolics, **White light quality of phosphor converted LEDs from a phosphor materials perspective of view: an evaluation based on combined thermal and optical simulations**, *SPIE Optics and Photonics 2012, 12. - 16. August 2012, San Diego, California, USA*, (invited)
- S. Schweitzer, C. Sommer, W. Nemitz, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, P. Fulmek, J. Nicolics, F. P. Wenzl, **The impact of the silicone encapsulation layers on the white light quality of phosphor converted LEDs**, *SPIE Optics and Photonics 2012, 12. - 16. August 2012, San Diego, California, USA* (mündlich)
- J. Nicolics, P. Krivic, P. Fulmek, F. P. Wenzl, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, **Thermal issues of phosphor converted LEDs**, *LED professional Symposium, LpS 2012, 25. - 27. September 2012, Bregenz, Austria* (mündlich)
- F. P. Wenzl, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, P. Fulmek, J. Nicolics, **Thermal and optical aspects of color conversion in phosphor based white LED light sources**, *OSA Optics & Photonics Congresses: Renewable Energy and the Environment, Solid State and Organic Lighting (SOLED), 11. - 14. November 2012, Eindhoven, Netherlands* (mündlich)
- F. P. Wenzl, Paul Fulmek, Christian Sommer, S. Schweitzer, W. Nemitz, Paul Hartmann, Peter Pachler, Hans Hoschopf, Franz Schrank, Gregor Langer, and Johann Nicolics, **Requirements on the phosphors for correlated color temperature constancy of white LED sources**, *3rd International Conference on Rare Earth Materials (REMAT 2013), 26. - 28. April 2013, Wroclaw, Poland*

- C. Sommer, P. Fulmek, J. Nicolics, S. Schweitzer, W. Nemitz, P. Hartmann, P. Pachler, Hans Hoschopf, Franz Schrank, Gregor Langer, F. P. Wenzl, **Thermal and optical aspects of glob-top design for phosphor converted white LED light sources**, *SPIE Optics and Photonics 2013*, 25. – 29. August 2013, San Diego, California, USA (mündlich)
- F. P. Wenzl, P. Fulmek, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, Hans Hoschopf, Franz Schrank, Gregor Langer, J. Nicolics, **The impact of the color conversion element configuration on its thermal response in phosphor converted LEDs**, *SPIE Optics and Photonics 2013*, 25. – 29. August 2013, San Diego, California, USA (mündlich)
- H. Hoschopf, **Optimized high power linear and area lighting stated on behalf of practical prototypes**, *LED professional Symposium, LpS 2013*, 24. – 26. September 2013, Bregenz, Austria (mündlich)
- G. Langer, M. Leitgeb, J. Nicolics, M. Unger, H. Hoschopf, F. P. Wenzl, **Advanced Thermal Management Solutions on PCBs for High Power Applications**, *IPC APEX und Expo 2014*, März 2014, Las Vegas, Nevada, USA (Poster)
- F. Schrank, **„Optics in Foil“ integrated LED packages for the optimization of beam shaping and color homogeneity**, *Smart System Integration 2014*, März 2014, Wien, Österreich (mündlich)

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- C. Sommer, F. Reil, J.R. Krenn, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, F.P. Wenzl, **The impact of light-scattering on the radiant flux of phosphor-converted high power white light-emitting diodes**, *J. Lightwave Technol.* 29, 2285 – 2291
- C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, F. P. Wenzl, **White light quality of phosphor converted light-emitting diodes: a phosphor materials perspective of view**, *J. Alloys Compd.* 520, 146 – 152, (2012)
- C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, F. P. Wenzl, **The phosphor's optical properties – chromaticity coordinate relationship of phosphor converted white LEDs**, *Opt. Quantum Electron.* 44, 111 – 117, (2012)
- P. Krivic, F. P. Wenzl, C. Sommer, G. Langer, P. Pachler, H. Hoschopf, P. Fulmek, J. Nicolics, **Investigation of thermal properties of power LED illumination assemblies**, *Proc. of the 35th Int. Spring Seminar on Electronics Technology (IEEE)*, 76 – 83, (2012)
- F. P. Wenzl, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, P. Fulmek, J. Nicolics, **White light quality of phosphor converted LEDs from a phosphor materials perspective of view: an evaluation based on combined thermal and optical simulations**, *Proc. of SPIE 8484*, 848403, (2012)
- S. Schweitzer, C. Sommer, W. Nemitz, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, P. Fulmek, J. Nicolics, F. P. Wenzl, **The impact of the silicone encapsulation layers on the white light quality of phosphor converted LEDs**, *Proc. of SPIE 8484*, 84840N, (2012)
- J. Nicolics, P. Krivic, P. Fulmek, F. P. Wenzl, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, **Thermal issues of phosphor converted LEDs**, *Proc. of the LED professional Symposium, LPS 2012*, 28 – 35, (2012)

- P. Fulmek, C. Sommer, P. Hartmann, F. P. Wenzl, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, J. Nicolics, **Color temperature constancy of phosphor converted LED modules: A combined thermal and optical simulation study on the materials requirements**, *Elektrotechnik & Informationstechnik*, Nov. 2012
- S. Schweitzer, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, F. P. Wenzl, **Improvement of color temperature constancy of phosphor converted LEDs by adaption of the thermo-optic coefficients of the color conversion materials**, *IEEE/OSA J. Displ. Technol.*, 9, 413 – 418, (2013)
- F. P. Wenzl, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, P. Fulmek, J. Nicolics, **The impact of the non-linearity of the radiant flux on the thermal load of the color conversion elements in phosphor converted LEDs under different current driving schemes**, *Opt. Express* 21, A439 – A449, (2013)
- P. Fulmek, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, G. Langer, J. Nicolics, F. P. Wenzl, **On the thermal load of the color conversion elements in phosphor based white light-emitting diodes**, *Adv. Opt. Mater.* 1, 753–762, (2013)
- C. Sommer, P. Fulmek, J. Nicolics, S. Schweitzer, W. Nemitz, P. Hartmann, P. Pachler, Hans Hoschopf, Franz Schrank, Gregor Langer, F. P. Wenzl, **Thermal and optical aspects of glob-top design for phosphor converted white LED light sources**, *Proc. of SPIE* 8835, 88350J, (2013)
- F. P. Wenzl, P. Fulmek, C. Sommer, P. Hartmann, P. Pachler, Hans Hoschopf, Franz Schrank, Gregor Langer, J. Nicolics, **The impact of the color conversion element configuration on its thermal response in phosphor converted LEDs**, *Proc. of SPIE* 8835, 88350N, (2013)
- F. P. Wenzl, P. Fulmek, C. Sommer, S. Schweitzer, W. Nemitz, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, F. Schrank, G. Langer, J. Nicolics, **The impact of the extinction coefficient of the phosphor on the thermal load of the color conversion elements of phosphor converted LEDs**, *J. Rare Earths*, accepted
- G. Langer, M. Leitgeb, J. Nicolics, M. Unger, H. Hoschopf, F. P. Wenzl, **Advanced Thermal Management Solutions on PCBs for High Power Applications**, *Proc. of the IPC APEX und Expo 2014*, submitted
- S. Schweitzer, P. Fulmek, C. Sommer, W. Nemitz, P. Hartmann, P. Pachler, H. Hoschopf, F. Schrank, G. Langer, J. Nicolics, F. P. Wenzl, **Color conversion element design for solid state lighting: an example based on a glob-top configuration**, in preparation