

# Energieforschungsprogramm

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

31/10/2016

icol

843877

## e!Mission.at - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	4. Ausschreibung e!Mission.at
Projektstart	01/01/2014
Projektende	31/08/2016
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	32 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	JOANNEUM RESEARCH Forschungsges.mbH, Technische Universität Wien
AnsprechpartnerIn	DI Wolfgang Nemitz
Postadresse	Franz-Pichler-Straße 30
Telefon	++43-3168763203
Fax	++43-3168763010
E-mail	Wolfgang.Nemitz@joanneum.at
Website	www.joanneum.at

# icol

## Intelligente Farbkonversion

**AutorInnen:**

Wolfgang Nemitz

Franz P. Wenzl

Paul Fulmek

Johann Nicolics

# 1 Inhaltsverzeichnis

**Es muss ein Inhaltsverzeichnis mindestens auf Überschriftenebene 1 mit Seitenangabe erstellt werden!**

1	Inhaltsverzeichnis .....	4
2	Einleitung .....	6
3	Inhaltliche Darstellung .....	7
3.1	Simulationsmodell .....	7
3.2	Problemanalyse und Konzepterstellung .....	20
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	24
5	Ausblick und Empfehlungen .....	27
6	Literaturverzeichnis .....	29
7	Anhang .....	31
8	Kontaktdaten .....	31

Ein publizierbarer Endbericht sollte folgende Struktur (Index) besitzen und besteht aus **mindestens 25 Seiten**. Die unten angeführte **Darstellung ist eine Mindestanforderung** und kann bei Bedarf erweitert werden.

Vorrangiges Ziel der publizierbaren Berichte ist die Darstellung der wesentlichen Projektergebnisse.

## Textformat

- Papierformat: A4 Hochformat
- Linker und rechter Rand: 2,5 cm
- Schriftformatierung: Arial, 11 Punkt, Zeilenabstand 1,3-fach
- Schriftformatierung für Tabellen: Arial, 10 Punkt
- Fußzeile: Seitennummerierung
- Definition der Überschriften bis zur 3. Ebene
  - Überschrift 1:
    - Schriftformat: Arial, 16 Punkt und Fett
    - Absatzformat: Abstand vor: 24 Punkt, Abstand nach: 12 Punkt
  - Überschrift 2:
    - Schriftformat: Arial, 14 Punkt und Fett
    - Absatzformat: Abstand vor: 24 Punkt, Abstand nach: 12 Punkt
  - Überschrift 3:
    - Schriftformat: Arial, 11 Punkt und Fett
    - Absatzformat: Abstand vor: 12 Punkt, Abstand nach: 6 Punkt

## 2 Einleitung

Leuchtdioden haben inzwischen in vielen Bereichen der Beleuchtung Einzug gehalten. Insbesondere das enorme Energieeinsparungspotential und die damit verbundene Verringerung der Betriebskosten sind (neben dem Glühbirnenverbot und der allgemeinen Ablehnung von Energiesparlampen) für viele Leute ein entscheidendes Argument um zu LED-Produkten zu greifen.

Ein wichtiges Verkaufsargument ist auch die lange Lebensdauer, die je nach Produkt bis zu einigen 10.000 Stunden betragen kann. Die Lebensdauer ist dabei nicht mehr durch einen Totalausfall definiert, vielmehr spricht man dann vom Ende der Lebensdauer, wenn der Lichtstrom auf unter 70% des Anfangswerts zurückgegangen ist. Inzwischen gibt es auch schon erste Modelle, mit deren Hilfe diese Lebensdauern abgeschätzt werden können. Problematischer ist dies mit Farbänderungen, die im Laufe der Zeit ebenfalls auftreten können. Für Farbänderungen gibt es weder Vorhersagemodelle noch ist ein „Ende der Lebensdauer“ auf Basis von Farbänderungen definiert. In der Tat können aber insbesondere in Bereichen, in denen die Lichtfarbe entscheidend ist durch derartige Farbänderungen LED-Lichtquellen im Laufe der Zeit ebenfalls unbrauchbar werden.

In komplexeren Systemen kann man die jeweilige Lichtfarbe mit Sensoren messen und die Lichtfarbe nachregeln. Dies erfordert aber zusätzliche Elektronik und in einfacheren Leuchtenausführungen ist eine derartige Nachregelung auch nicht möglich.

Das Projekt icol widmete sich dieser Thematik mittels eines Materialansatzes. Ausgangspunkt ist der Umstand, dass die Farbkonversionsschichten (Phosphore in Silikon) von Farbkonversions-LEDs sich während des Betriebs erwärmen. Damit ändern sich auch ihre optischen Eigenschaften. Einer dieser Parameter ist der Brechungsindex, sowohl der von den Phosphoren als auch der von Silikon. Die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex von Silikon ist aber in etwa 2 Größenordnungen größer als der der Phosphore. Zudem ist dieser Wert negativ, das heißt der Brechungsindex von Silikon wird mit zunehmender Temperatur kleiner. Damit wächst aber auch die Brechungsindexdifferenz zwischen Silikon und Phosphor. Es kommt zu mehr Streuung, sodass insgesamt mehr gelbes Licht (Phosphoremission) erzeugt wird. Umgekehrt nimmt die Quantenausbeute der Phosphore mit zunehmender Temperatur ab. Es sollte daher möglich sein bei entsprechender Abstimmung von temperaturbedingter Brechungsindexvariation von Silikon und temperaturbedingter Abnahme der Quantenausbeute des Phosphors eine Farbänderung (Änderung des Ausmaßes der Phosphoremission) kompensieren zu können. Auf Basis dieser Überlegungen sollten in diesem Projekt primär auf der Basis von optischen Simulationen Konzepte gefunden und evaluiert werden, mit deren Hilfe man Farbänderungen (sowohl temperaturbedingt aber auch durch Materialdegradation) von Farbkonversions-LEDs möglichst minimieren kann.

Damit trägt das Projekt zum einen zur Qualitätssteigerung von LED-Leuchtmitteln bei und liefert auch eine Möglichkeit wie komplexe Sensorelektronik zur Farbortkontrolle hintangehalten werden könnte. Bedingt durch das Energieeinsparungspotential von LED-Leuchtmitteln an sich aber auch der Möglichkeit Ressourcen einsparen zu können deckt das Projekt wichtige Aspekte der österreichischen Klimaschutzstrategie ab.

### 3 Inhaltliche Darstellung

Das Projekt gliederte sich in die Phasen der Erstellung eines iterativen optischen und thermischen Simulationsmodells für Farbkonversions-LEDs inklusive dessen experimenteller Verifikation (um die Konzepte evaluieren zu können), der Erstellung von Konzepten zur Kompensation von Temperatur- und Degradationsbedingten Farbänderungen sowie deren Evaluierung (auf der Basis von Simulationen). Konkret wurden dabei folgende Ergebnisse erzielt:

#### 3.1 Simulationsmodell

##### Optisches Simulationsmodell der primären Lichtquelle

Als Grundlage für das optische Simulationsmodell und auch für den experimentellen Abgleich wurde der LED Typ Cree EZ 900 GEN2 gewählt. Die Daten für die Modellierung des LED-Chips wurden sowohl dem zugehörigen Datenblatt (www.cree.com) entnommen, aber auch durch eigene experimentelle Charakterisierung bestimmt. Dem Datenblatt lässt sich entnehmen, dass der Chip eine Grundfläche von  $880 \times 880 \mu\text{m}^2$  und eine Höhe von  $170 \mu\text{m}$  hat. Die aktive, lichtemittierende Fläche hat eine Größe von  $850 \times 850 \mu\text{m}^2$  (vergleiche **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.1**).

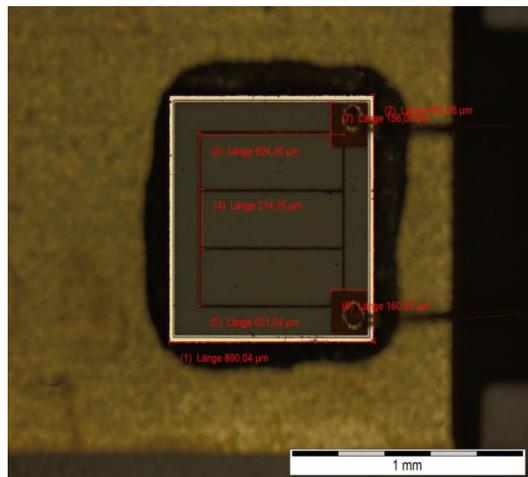


Abbildung 1: Optische Mikroskopieaufnahme des verwendeten LED-chips

Von den realen LED-Chips wurde während des Betriebs mit 10 mA die Intensität an der Oberfläche gemessen (unter Verwendung von Thorlabs Beam) die, umgewandelt in ein Graustufenbild als Grundlage für die Intensitätsverteilung der Blaulichtabstrahlung des LED-Modells in der optischen Simulation diente. Die Abstrahlcharakteristik des blauen Quelllichts wird dabei als Lambert'sch angenommen. In der optischen Simulation wird als Anregungslicht die aus der Messung ermittelte dominierende Wellenlänge von  $\lambda=460 \text{ nm}$  verwendet.

Als Ergebnis der Simulation ergibt sich eine Lambert'sche Abstrahlcharakteristik des blauen LED-Lichts.

##### Thermisches Simulationsmodell der primären Lichtquelle

Auch für die thermischen Simulationen wurden die Abmessungen des Chipaufbaus sowie die

elektrischen Grenzwerte des EZ 900 Gen II aus dem Datenblatt entnommen. So zum Beispiel die typischen charakteristischen Kurven dieser LED, wie die UI-Kennlinie.

Im Simulationsmodell wurden die Abmessungen der einzelnen Schichten des LED-Chips so gewählt, dass die einem typischen Aufbau von GaN-LEDs entsprechen. Der LED-Chip ist auf einem P211 IMS-Substrat von AT&S montiert. Das Layout dieses LED-Trägers ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: LED-Chip auf IMS-Substrat

Für die thermischen Simulationen wurde die experimentelle Open-Source-Software gmsh/GetDP eingesetzt, in der ein vereinfachtes Modell der oben beschriebenen Geometrie umgesetzt wurde. Der tatsächliche Aufbau der LED mit den Nanometer dünnen Schichten der MQW-Struktur (multiple-quantum-well) und den Strompfaden durch den Halbleiter (vergleiche **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurde als eine einzige Schicht modelliert, in welcher der Großteil der Verlustleistung der LED umgesetzt wird. Der Si-Chip, der diese eigentliche LED trägt, stellt im Modell einen Teil des Serienwiderstands der LED dar, der ebenfalls Ohmsche Verluste produziert. Die Verbindung der LED mit der Kupfer-Oberfläche des IMS-Substrats erfolgt im Modell durch eine einzige Leitkleber-Schicht, so dass der tatsächliche Verbindungsaufbau (Metallisierungen an LED und IMS) vernachlässigt wird. Das IMS besteht im Modell aus 3 Schichten: Kupfer, Dielektrikum und Aluminium. Die im Modell verwendeten Dimensionen sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgelistet.

Tabelle 1: Geometriedaten der verwendeten Schichten

Geometrie-Objekt	xy-Dimension	z-Dimension
LED	850 µm	5 µm
Chip	880 µm	170 µm
Adhesive	880 µm	5 µm
IMS-Cu	5000 µm	70 µm
IMS-Dielectric	5000 µm	90 µm
IMS-Alu	5000 µm	2000 µm

Die im Modell benutzte Geometrie enthält 6 einfache Domänen, für welche äquivalente Materialparameter definiert werden müssen. Für (stationäre) thermische Simulationen werden der Wert der thermischen Leitfähigkeit, der Koeffizient für den Wärmeabtransport durch Konvektion sowie die Verlustleistung der LED im Betrieb benötigt. Da die Schichten im Modell teilweise aus verschiedenen Materialien bestehen, müssen die eingesetzten Materialparameter in der numerischen

Simulationsrechnung eine Mischung aus den jeweiligen rein physikalischen Materialparametern (aus werkstoffwissenschaftlicher Sicht für Bulk-Materialien) und den Einflüssen der in der Modellgeometrie vernachlässigten Details sein. Die Wahl der Materialparameter erfolgte durch einen iterativen Messung-Simulation-Prozess, der zunächst die für die gesuchte Temperaturverteilung in der LED wesentlichen Modell-Materialparameter zu identifizieren erlaubte. Die Werte dieser Parameter wurden dann durch Abstimmung mit experimentellen Ergebnissen bestimmt. In Tabelle 2 sind die letztendlich verwendeten Werte der Parameter angeführt. Die Parameter Wärmekapazität und spezifische Dichte werden für transiente Simulationen benötigt.

**Tabelle 2** Parameter, die in der Simulation benutzt wurden

Domäne	Wärmeleitfähigkeit W/(m.K)	Wärmekapazität J/(kg.K)	Dichte kg/m <sup>3</sup>
LED	45	327	5317
Si-Chip	100	703	2340
adhesive	0.45	800	7000
IMS-Cu	270	420	8300
IMS-Dielektrikum	2.6	900	3000
IMS-Alu	138	897	2700

In den thermischen Simulationen wird der LED-Strom als Eingangsparameter verwendet. Für diesen gewählten Strom wurde die zugehörige temperaturabhängige LED-Spannung aus den charakteristischen Kurven des gemessenen UIT-Kennfelds **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden**. ermittelt. Die Verlustleistung, die als Wärmequelle in der LED wirkt, kann dann aus dem temperaturabhängigen Wirkungsgrad aus dem Datenblatt der LED berechnet werden. Der größte Teil dieser Verlustleistung wird dabei in der dünnen aktiven Schicht der LED umgesetzt, ein kleiner Teil wird durch den ohmschen Widerstand im Si-Chip erzeugt.

Das UIT-Kennfeld (Spannung-Strom-Temperatur-Charakteristik) wurde aus der um einen Serienwiderstand erweiterten Shockley-Gleichung ermittelt. Dafür war es notwendig, eigene Messungen durchzuführen, da in der Literatur keine Daten zu finden waren, die das UIT-Kennfeld unter Berücksichtigung der Eigenerwärmung der LED beschreiben. In der Shockley-Gleichung wird das prinzipielle elektrische Verhalten einer LED und ihre Temperaturabhängigkeit beschrieben, welches in erster Näherung zusammen mit den Bahnwiderständen die Spannung-Strom-Temperatur-Charakteristik (UIT) einer LED definiert. Als Parameter treten daher der Sperrstrom  $I_s$ , ein ideality factor  $n$  sowie der Serienwiderstand  $R_s$  auf, welche durch Experimente an der LED ermittelt wurden. Aus diesen Parametern wurde der Zusammenhang von UIT in der dünnen aktiven LED-Schicht ermittelt, so dass die Messung von Spannung und Strom am kompletten LED-Modul die Temperatur der LED-Sperrschicht charakterisiert. Diese Temperatur sowie die abgestrahlte Blaulichtleistung bestimmen im Gesamtmodell die Temperatur der Farbkonversionsschicht.

Das Problem bei der Messung des UIT-Zusammenhangs ist die Eigenerwärmung der LED im Betrieb. Durch Messungen mit kurzen Strompulsen kann der Effekt dieser Eigenerwärmung so reduziert werden,

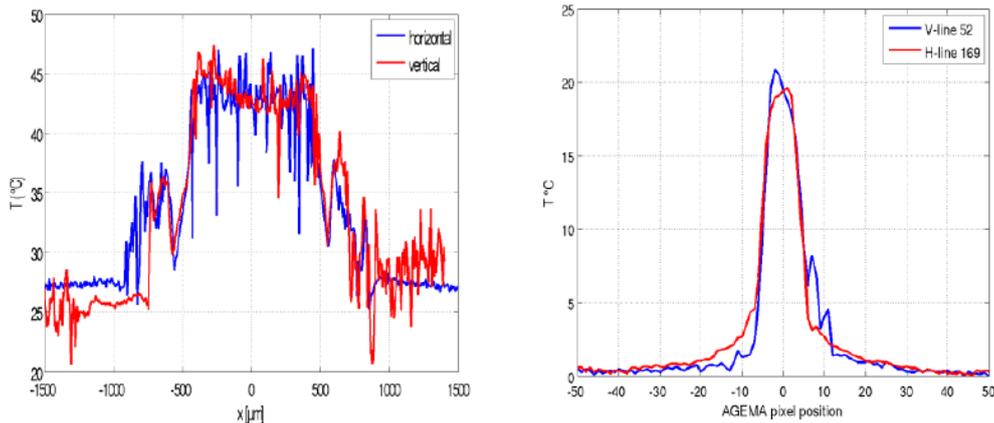
dass die Temperaturänderung in der LED jedenfalls unter 1 K bleibt. Damit kann die tatsächliche LED-Temperatur aus einer einfachen Strom-Spannungs-Messung bestimmt werden. Mit dieser LED-Temperatur kann die von der LED abgestrahlte Blaulichtleistung, die wiederum auch von der Temperatur abhängt, durch eine Messung in der Ulbrichtkugel ermittelt werden. Damit ist der (stationäre) Zusammenhang zwischen den primär elektrischen Größen Strom und Spannung mit der LED-Temperatur sowie mit der abgestrahlten Lichtleistung definiert.

Für diese Messungen wurde eine Vorrichtung entwickelt, die ein komplettes LED-Modul auf eine hinreichend gut definierte Temperatur bringt. Die Experimente erfolgten mit kurzen, rechteckigen Strompulsen mit exakt bestimmter Dauer und Höhe. Gleichzeitig wurde die am LED-Modul auftretende Spannung gemessen. Die Dauer dieser Pulse wurde so gewählt, dass einerseits eine Temperaturverteilung in der aktiven LED-Schicht erreicht wird, die der Verteilung im stationären Betrieb entspricht (time-dependent current crowding), andererseits aber die mittlere Temperatur der aktiven LED-Schicht um weniger als 1 K von der Ausgangstemperatur abweicht. Damit ist einerseits der Strom  $I$ , andererseits die Temperatur  $T$  in der LED hinreichend gut definiert, sodass die Messung der Spannung  $U$  schließlich einen Punkt in der gesuchten UIT-Charakteristik der LED liefert.

Nach Messung der UIT-Kennlinien für die einzelnen Samples wurde die Oberflächentemperatur der LED-Module mittels Infrarot-Thermographie aufgenommen. Zwei Referenzaufnahmen bei jeweils konstanten Temperaturen und konstanten Umgebungsbedingungen wurden dabei zur Bestimmung des Emissionskoeffizienten der Sample-Oberflächen herangezogen. Erst mit dieser Information kann das Strahlungsbild in eine reale Temperaturverteilung auf der Sample-Oberfläche umgerechnet werden. Es wurden zwei verschiedene Thermographiesysteme eingesetzt: ein Infratec 8300 System für den Wellenlängenbereich 3–5  $\mu\text{m}$  mit Stirling-Kühler und ein Agema THV 9000 System im Wellenlängenbereich 8–12  $\mu\text{m}$  mit Flüssigstickstoff-Kühlung. Durch die Auswertung der IR-Strahlung in zwei verschiedenen Wellenlängenbereichen kann der sonst verzerrende Einfluss der Semitransparenz des Messobjekts bewertet werden. Bei semitransparenten Messobjekten könnte die empfangene Strahlung sonst nicht in das Signal einer strahlenden Oberfläche und damit in eine Oberflächentemperatur umgerechnet werden. Für das modernere Infratec System (3-5  $\mu\text{m}$ ) stand ein eigenes Mikroskop-Objektiv zur Verfügung mit einer räumlichen Auflösung von etwa 6.25  $\mu\text{m}$ . Nach Kalibration der Systeme mit dem jeweiligen Sample wurden Thermographie-Aufnahmen bei verschiedenen konstanten LED-Strömen und konstanter Kühler Temperatur von 25°C gemacht. Beide Systeme zeigten fast identische Temperaturen von etwa 44°C bei 350 mA auf der LED-Chip Oberfläche. Aus den Thermographie-Aufnahmen wurden Temperaturverläufe (line-plots) entlang von Schnitten durch das Zentrum der LED extrahiert. Diese geben jeweils die Oberflächentemperatur auf dem Chip und auf dem P211-Substrat wieder. Abbildung 3 zeigt typische Verläufe für ein P211-EZ900II Sample bei 350 mA und 25°C-Kühler Temperatur, die aus den Thermogrammen extrahiert wurden. Im linken Teilbild ist das Ergebnis der Infratec Messung dargestellt (x-Achse in  $\mu\text{m}$  skaliert) und zeigt deutlich das Temperaturplateau von etwa 44 °C am Ort der LED. Das entspricht einer Übertemperatur von 19°C bezüglich der Kühler Temperatur 25°C. Das wesentlich schlechter ortsauflösende Agema-System im rechten Teilbild zeigt ebenfalls eine Übertemperatur von etwa 19°C (die x-Achse ist hier in Agema-Pixeln skaliert). Beim Agema-System entspricht die Kühler Temperatur 0 °C. Daher muss man zur korrekten Interpretation dieses Verlaufs die Kurven mit einem Offset von 25 °C beaufschlagen.

Auffallend ist der steile Temperaturabfall entlang der Chip-Kante. Von der LED-Oberfläche ( $\pm 440 \mu\text{m}$ )

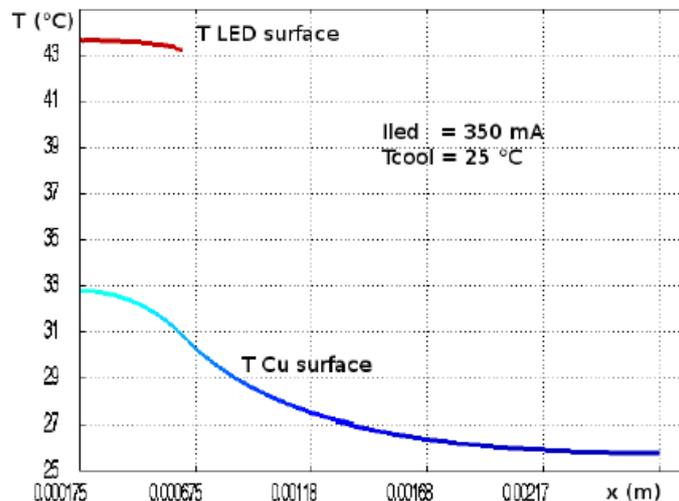
bis zur IMS-Oberfläche am Rand des Chips stellt sich ein Temperatursprung von etwa 15°C ein, der nur durch eine niedrige thermische Leitfähigkeit der Chip-IMS-Verbindung erklärt werden kann. Der gesamte Wärmestrom fließt im Wesentlichen von der LED-Schicht durch den Chip und die Klebverbindung in die sehr gut thermisch leitfähige Kupfer-Schicht des IMS, welche die Wärme sehr gut lateral verteilen kann. Dieser Temperatursprung wurde daher verwendet, um die Wärmeleitfähigkeit im Simulationsmodell anzupassen.



**Abbildung 3** Temperaturverlauf entlang von Schnitten durch das Zentrum der LED.  
Links: Infratec. Rechts: Agema (Offset von 25 °C notwendig).

Der analoge Temperaturverlauf aus der GetDP-Simulation ist in Abbildung dargestellt. Gezeigt ist der Temperaturverlauf entlang einer Linie durch das Zentrum des LED-Chips, wobei die rote Kurve für die Temperatur an der Chipoberfläche und die blaue Kurve für die Temperatur am IMS stehen. Sowohl die Temperatur auf der LED-Oberfläche (rote Kurve, fast 44 °C), als auch der Temperatursprung am Ort der Chipkante (Ende der roten Kurve – Sprung auf blaue Kurve, Abfall um ca. 13 °C) passen sehr gut zu den Thermographie-Messungen (vgl. Abbildung 4). Aus dem Simulationsergebnis wird auch der Temperaturverlauf auf der IMS-Kupferoberfläche unter dem LED-Chip sichtbar, der allerdings nicht gemessen wurde.

Mit diesem Simulationsmodell können auch (mit dem jeweiligen Strom als Eingangsparameter) unterschiedliche Betriebsbedingungen (Konstantstrom, gepulst) simuliert werden.

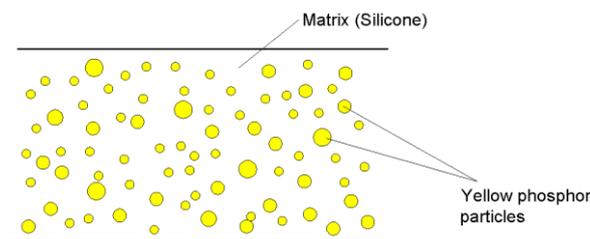


**Abbildung 4** Temperaturverteilung entlang einer Linie durch das Zentrum des LED-Chips als Ergebnis der

thermischen Simulation.

### Optisches Simulationsmodell der gesamten Lichtquelle (inklusive Simulation der Farbkonversionsschicht)

Als Grundlage des optischen Simulationsmodells der gesamten Weißlicht-LED dient das Modell der primären Lichtquelle. Das blaue Anregungslicht trifft dabei auf eine Silikonschicht, die mit Farbkonversionselementen (Phosphor) versetzt ist. Je nach Material wird ein Teil des blauen Lichts absorbiert und in einem zweiten Simulationsdurchlauf als gelbes Licht re-emittiert. Die dominierende Wellenlänge des gelben Lichts wurde für das experimentelle Modellsystem als 565 nm gemessen. In beiden Durchgängen wird das Licht an den Farbkonversionselementen gestreut. Als Modell für den Streuvorgang wurde in ASAP das Modell von Mie verwendet.



**Abbildung 1** Schema einer Farbkonversionsschicht.

Für die Verifikation der Simulation wurden Silikonschichten hergestellt, die als Farbkonverter Phosphorpartikel von BOSE (Orthosilikat-Phosphor) enthalten. Schematisch dargestellt ist so eine Schicht in **Abbildung 5**. Die Konzentration der BOSE-Partikel in den Schichten liegt bei 11.52 Vol.%, wobei die Partikel einen mittleren Durchmesser von 7.8  $\mu\text{m}$  mit einer Standardabweichung von 4.2  $\mu\text{m}$  haben. Die Brechungsindizes der Farbkonversionsschicht sind  $n=1.63$  für BOSE und  $n=1.4$  für Silikon (für  $\lambda=460$  nm und  $\lambda=565$  nm) und der Extinktionskoeffizient ist  $\kappa=1 \times 10^{-3}$  für  $\lambda=460$  nm, bzw.  $\kappa=0$  für  $\lambda=565$  nm.

Aus diesen Schichten wurden mittels Laser Plättchen ausgeschnitten, so dass diese auf allen Seiten 30  $\mu\text{m}$  über den Chip herausragen und Ausnehmungen für die Bonddrähte haben (siehe **Abbildung 2**). Für den Schnittprozess mussten die Parameter des Lasers (im Wesentlichen Schnittgeschwindigkeit und Laserleistung) optimiert werden, so dass die Schichten durchtrennt, aber an den Rändern nicht verbrannt sind. Ein Foto und Lichtmikroskopieaufnahmen der Schichten sind in **Abbildung 7** zu sehen.

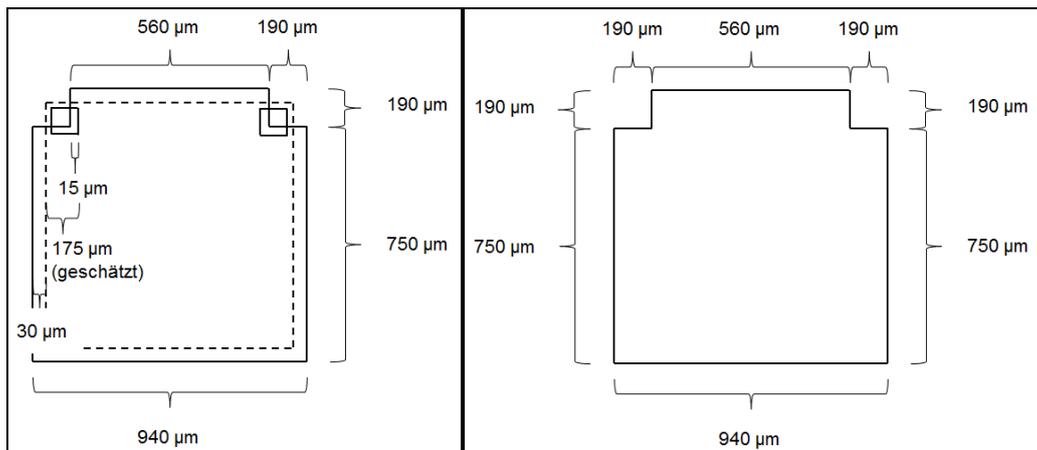


Abbildung 2 Dimension des Farbkonversionsplättchens. Links mit Chip (gestrichelt). Rechts ohne Chip.

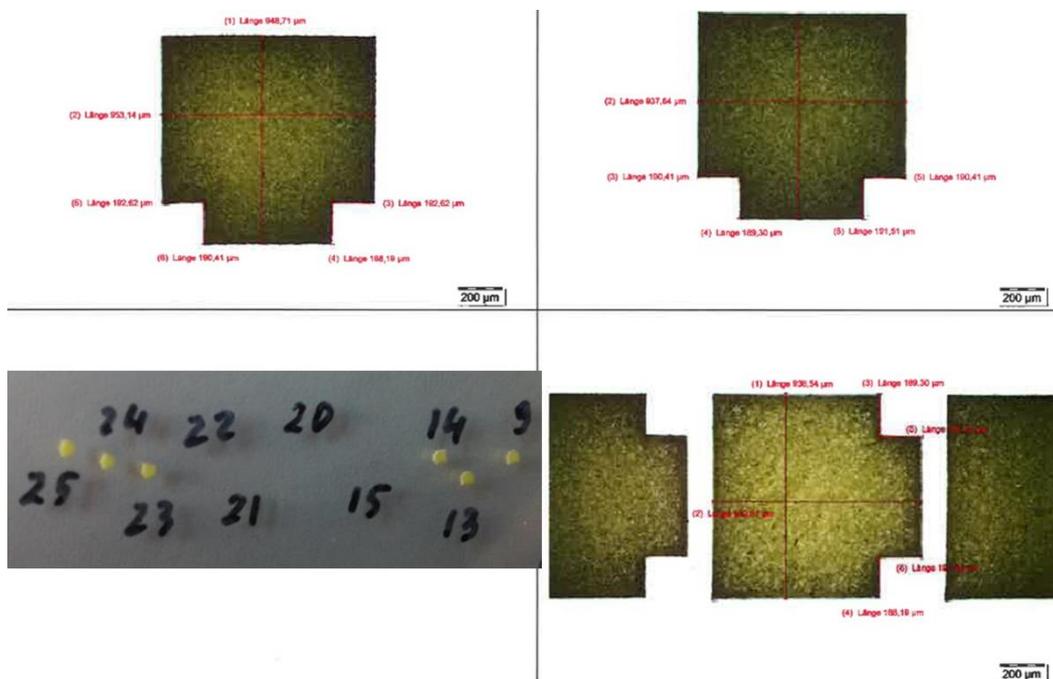


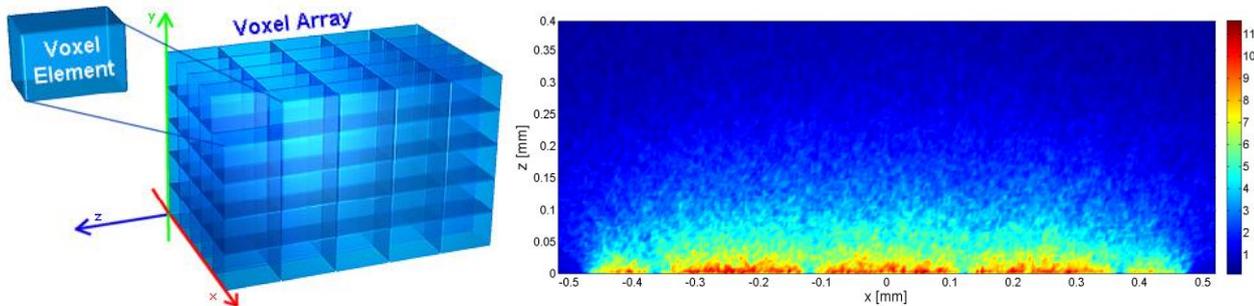
Abbildung 3 Mikroskopieaufnahmen (oben links und rechts und unten rechts) und Foto (unten links) der geschnittenen Farbkonversionsplättchen.

Zur experimentellen Verifizierung des Simulationsmodells wurde ein konzeptionell einfacher Aufbau gewählt, bei dem die Farbkonversionsplättchen mit einer Silikonschicht auf den LED-Chip aufgeklebt werden.

Die komplette optische Simulation ergibt sich aus der Kombination von zwei Durchgängen für jeweils eine Wellenlänge (exemplarisch für blaues und gelbes Licht). Dabei wird im ersten Durchgang (Simulation des Blaulichts) ein 3D-Gitter von Voxel über die Farbkonversionsschicht gelegt, bei dem jedes Voxel eine Größe von  $4 \times 4 \times 4 \mu\text{m}^3$  hat. Exemplarisch ist so ein Voxelarray in **Abbildung** (links) dargestellt. In jedem dieser Voxel wird während der Blaulicht-Simulation aufgezeichnet, wie hoch die jeweilige Absorption von blauem Licht durch die Phosphorpartikel ist. Diese Absorptionsdichteverteilung (beispielhaft dargestellt in **Abbildung** rechts) dient einerseits als Grundlage für die thermischen Simulationen und andererseits für die Gelblicht-Simulation. Beim zweiten Durchgang, der Gelblicht-

Simulation, werden in jedem Voxel Lichtquellen generiert, deren Fluss dem Wert der Absorption in dem Voxel entspricht und die isotrop strahlen.

Aus der Kombination der beiden Durchläufe lassen sich die benötigten Parameter, wie der Farbort oder die Abstrahlcharakteristik, für Weißlicht berechnen.



**Abbildung 8** Links: Voxelarray, exemplarisch gezeigt. Rechts: xz-Schnitt der Absorptionsverteilung durch die CCE-Mitte, exemplarische Darstellung.

### Thermisches Simulationsmodell der gesamten Lichtquelle (inklusive Farbkonversion)

Im thermischen Modell stellt die CCE eine Leistungsquelle dar. Das Modell der primären Lichtquelle liefert für einen gewählten LED-Strom neben der Temperaturverteilung im Modellraum auch die zugehörige Lichtleistung der LED  $P_{blue}$ . Die von der LED abgestrahlten blauen Lichtquanten ( $\lambda_{blue} = 460 \text{ nm}$ ) werden im CCE absorbiert, und mit dem Quantenwirkungsgrad ( $QE$ ) in weiß-gelbe Quanten ( $\lambda_{white} = 565 \text{ nm}$ ) umgesetzt. Für die Energiebilanz ist dabei noch der Stokes-Shift zu berücksichtigen, welcher die Abnahme der Energie der Lichtquanten bei der Konversion in langwelligere Quanten beschreibt ( $\lambda_{blue}/\lambda_{white}$ ). Sowohl die Absorptionskoeffizienten als auch der Quantenwirkungsgrad sind temperaturabhängig und müssen daher für jedes Voxel im thermischen Modell eigens bestimmt werden. Die Absorptionskoeffizienten in der CCE werden durch die Absorptionsverteilung aus der optischen Simulation bestimmt. Mit diesen Absorptionsdaten kann dann im thermischen Modell eine veränderte Temperaturverteilung bestimmt werden.

Die CCE stellt für die thermische Simulation eine Wärmequelle dar. Jedes CCE-Voxel liefert dabei einen Verlustleistungsbeitrag von  $P_{CCE}(x,T) = P_{blue}(T_{LED}) * A(x) * (1 - QE(T) * \lambda_{blue} / \lambda_{white})$ .

Zusammen mit der temperaturabhängigen Verlustleistung im LED-Chip, die schon im thermischen Modell der primären Lichtquelle etabliert und verifiziert wurde (temperaturabhängige Shockley-Gleichung mit Serienwiderstand) wird dann in einigen Iterationsschritten eine neue Temperaturverteilung im Modellraum simuliert. Der temperaturabhängige Verlauf des Quantenwirkungsgrades, der dabei benutzt wird, wurde messtechnisch bestimmt.

Das schon vorgestellte thermische Modell der LED (primäre Lichtquelle) wurde um die CCE mit den bereits oben beschriebenen geometrischen Abmessungen erweitert. Eine Gesamtansicht des Modells ist in **Abbildung 4** zu sehen. Auch bei der Simulation mit Farbkonversionsschicht wurde aus Gründen der Symmetrie nur 1/8 des Gesamtmodells berechnet. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Geometrie des Modells mit einer typischen Temperaturverteilung bei 350 mA im stationären Zustand.

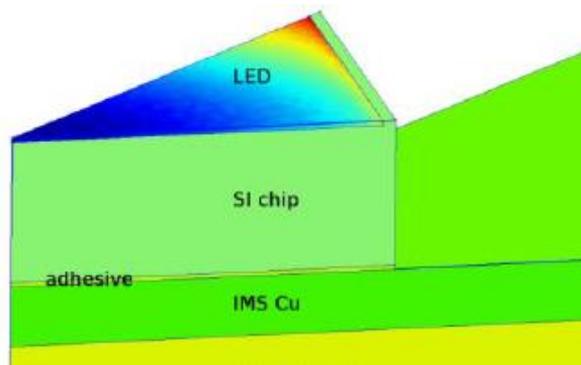


Abbildung 4 Modell-Geometrie: Symmetrie erlaubt eine Reduktion auf 1/8.

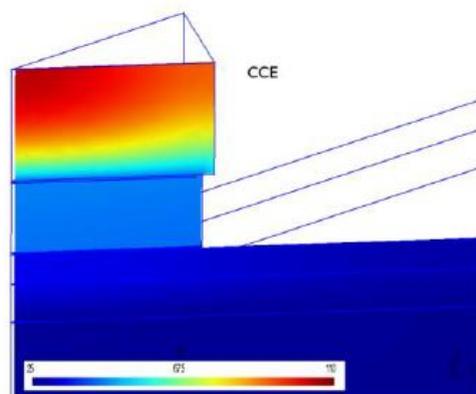
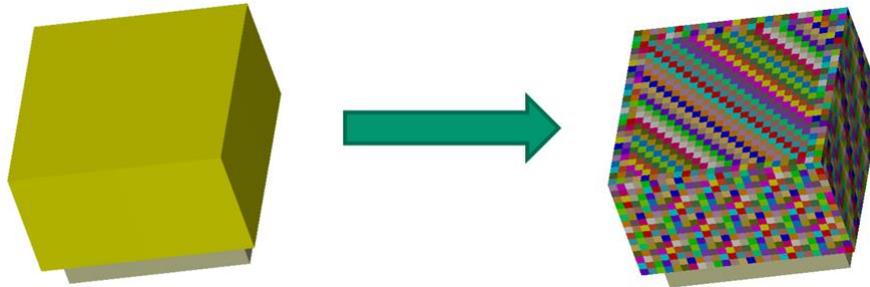


Abbildung 10: Erweiterte Modellgeometrie mit CCE. In der zx-Ebene ist die simulierte Temperaturverteilung bei 350 mA dargestellt.

### Kombination von thermischen und optischen Simulationen

Für die Kombination der thermischen und der optischen Simulation war es notwendig, Übergabeparameter zu definieren und die Modelle um die Funktionen dieser zu erweitern. Von der thermischen zur optischen Simulation wird dafür die Temperaturverteilung in der Silikon- und in der Farbkonversionsschicht übergeben. Im LED-Chip selbst sind keine relevanten Temperaturschwankungen zu erwarten, weil in der Simulation davon ausgegangen wird, dass der LED-Chip auf einem Kühlkörper mit einer konstanten Temperatur von 300 K montiert ist. Außerhalb der Silikon- und Farbkonversionsschicht wird mit natürlicher Konvektion in Luft gerechnet, so dass sich etwaige Temperaturschwankungen ausgleichen und vor allem den Aufbau nicht beeinflussen. In der Farbkonversionsschicht dagegen ist mit großen Temperaturschwankungen zu rechnen, da sich durch die Farbkonversion des blauen in gelbes Licht die dabei auftretenden Verluste durch die Stokes-Verschiebung (ca. 25% der Energie des absorbierten blauen Lichts) als zusätzliche Wärmequellen direkt in der Farbkonversionsschicht bemerkbar machen. Daher genügt die Temperaturverteilung in der Silikon- und Farbkonversionsschicht als Übergabeparameter.

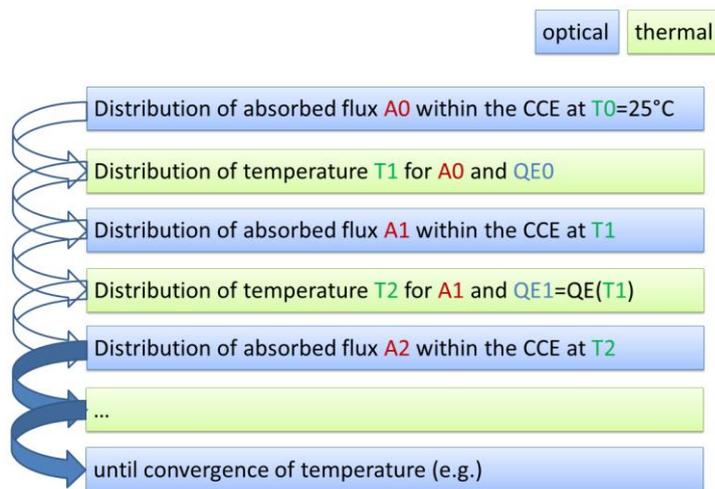
Da sich der Brechungsindex von Silikon stark mit der Temperatur ändert, werden die Silikon- und Farbkonversionsschicht in der optischen Simulation in kleine Volumina unterteilt, für die jeweils der Brechungsindex aus der entsprechenden Temperatur berechnet wurde (vergleiche **Abbildung** ). Dabei



**Abbildung 11** Unterteilung der Farbkonversionsschicht in kleine Volumina mit unterschiedlichen Brechungsindizes.

ist es auch notwendig, für jeden neuen Brechungsindex ein neues Modell für die Streuung des Lichts zu berechnen, wodurch sich in weiterer Folge auch eine neue Absorptionsdichteverteilung ergibt. Diese neue Absorptionsdichteverteilung stellt wiederum das Übergabefile für die nachfolgenden erneuten thermischen Simulationen dar, wobei das thermische Modell auch um die temperaturabhängige Quanteneffizienz des Phosphors ergänzt werden muss. Diese sinkt mit steigender Temperatur, was auch in experimentellen Messungen werden konnte.

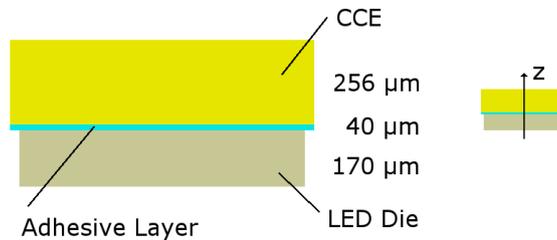
Zusammenfassend kann man das kombiniert thermisch-optische Simulationsverfahren damit folgendermaßen beschreiben (siehe **Abbildung 12**):



**Abbildung 12:** Schema der iterativen optischen und thermischen Simulationen

Ausgehend von der optischen Simulation, wobei im initialen Schritt davon ausgegangen wird, dass überall in der Farbkonversionsschicht Raumtemperatur ( $25^\circ\text{C}$ ) vorherrscht, wird die Absorptionsdichteverteilung des blauen LED-Lichts in der Farbkonversionsschicht ermittelt, die als Eingangsparameter für die nachfolgende thermische Simulation verwendet wird. Die resultierende Temperaturverteilung dient wiederum als Eingangsparameter für eine nachfolgende optische Simulation, die die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex des Silikons berücksichtigt und auf Basis dessen eine neue Absorptionsdichteverteilung erstellt, die wiederum als Eingangsparameter für eine

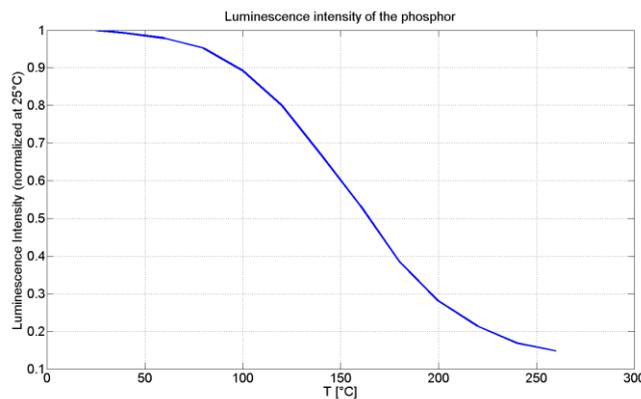
nachfolgende thermische Simulation (die auch die Temperaturabhängigkeit der Quantenausbeute des Phosphors berücksichtigt) dient. Nach mehreren dieser Iterationen werden die Differenzen hinreichend klein, so dass die Simulationen abgebrochen werden können. Zur Überprüfung der Simulationen wurde in weiterer Folge eine LED gefertigt, deren Aufbau schematisch in **Abbildung 13** zu sehen ist.



**Abbildung 13:** Schematischer Aufbau des LED-Packages. Auf dem LED-Chip ( $880 \times 880 \mu\text{m}^2$ ) befindet sich wiederum ein Farbkonversionsplättchen mit Abmessungen von  $936 \times 936 \mu\text{m}^2$ , die Kleberschichtdicke beträgt  $40 \mu\text{m}$ .

Auf dem LED-Chip ( $880 \times 880 \mu\text{m}^2$ ) befindet sich wiederum ein Farbkonversionsplättchen mit Abmessungen von  $936 \times 936 \mu\text{m}^2$  und mit einer Kleberschichtdicke von  $40 \mu\text{m}$  um thermische Effekte noch deutlicher zum Vorschein kommen zu lassen.

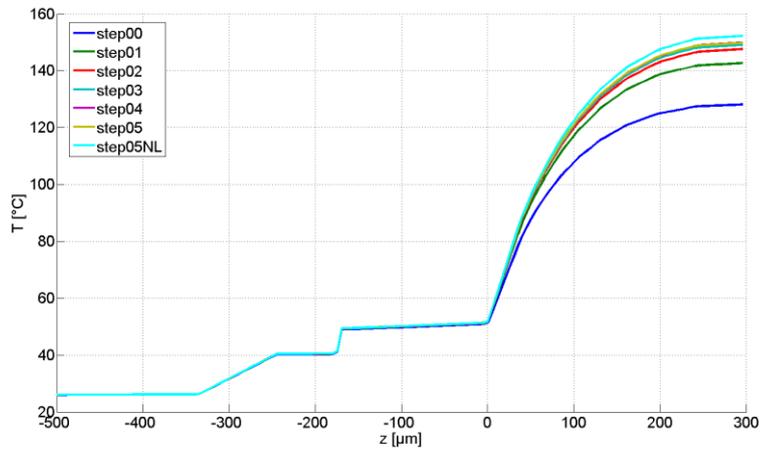
Die **Abbildung 14** zeigt die Abnahme der Lumineszenzintensität des für die Fertigung der Farbkonversionsschicht verwendeten Phosphors, normiert auf  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .



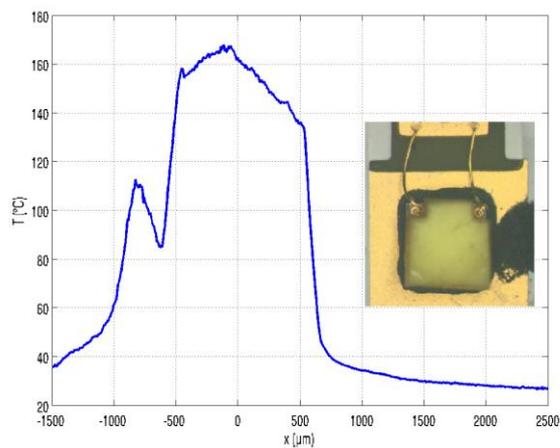
**Abbildung 14:** Abnahme der Lumineszenzintensität des Phosphors.

Die optischen und thermischen Simulationen wurden mit dem iterativen Verfahren durchgeführt. Das Ergebnis ist in **Abbildung 15** dargestellt. Nach 6 iterativen Schritten kommt es zur Konvergenz. Zusätzlich dargestellt ist die Temperaturverteilung, die sich daraus ergibt, dass der letzte Simulationsschritt nochmals unter der zusätzlichen Annahme durchgeführt wurde, dass auch die thermische Leitfähigkeit von Silikon temperaturabhängig ist. Der real gefertigte Aufbau wurde einerseits mittels Infrarot-Thermographie und andererseits mittels Phosphorthermometrie charakterisiert. Die Ergebnisse sind in den **Abbildungen 16** und **17** dargestellt. Für die Phosphorthermometrie wurde zunächst eine dünne Schicht des Phosphors in Silikon auf einer Heizplatte erwärmt und die Abklingzeit der Phosphoremission bei verschiedenen Temperaturen gemessen. Danach wurde die Abklingzeit der

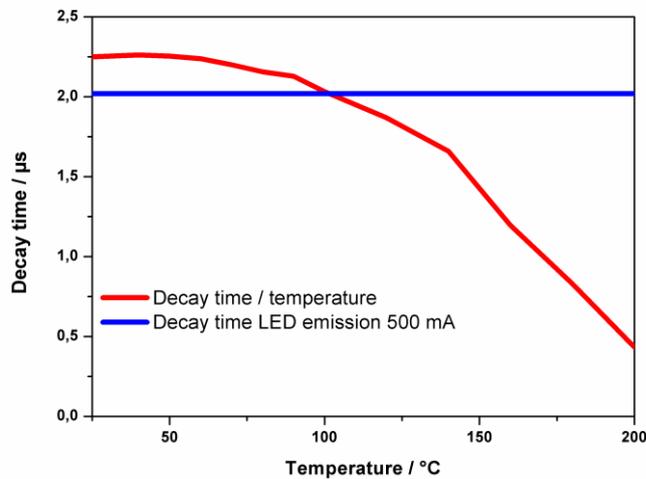
Phosphoremission direkt an der LED ermittelt. Dabei ergab sich eine Abklingzeit von ca. 2.02  $\mu\text{s}$ , was einer Temperatur von ca. 104  $^{\circ}\text{C}$  entspricht.



**Abbildung 15:** Temperaturprofile des LED-Aufbaus. Die Temperaturverteilungen konvergieren nach 6 iterativen Simulationsschritten. Zusätzlich wurde der letzte Iterationsschritt unter der Annahme, dass auch die thermische Leitfähigkeit von Silikon temperaturabhängig ist nochmals wiederholt. Die Simulationen erfolgten unter der Annahme eines Betriebs bei 500 mA.

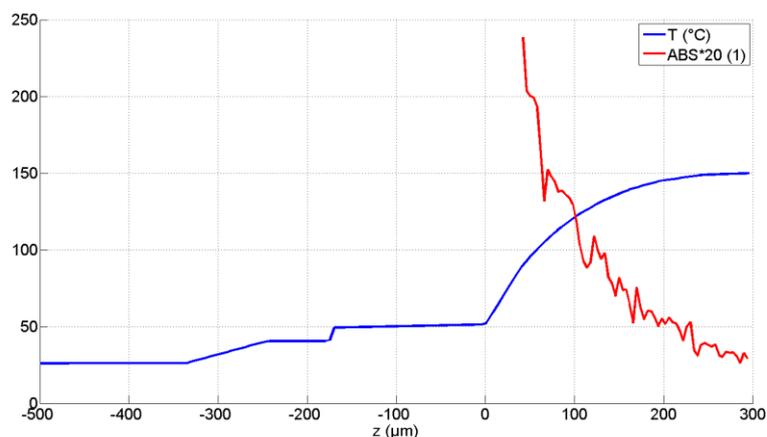


**Abbildung 16:** Ergebnis der Infrarot-Thermographiemessung



**Abbildung 17:** Ergebnis der Phosphorthermometrie. Die rote Linie zeigt die Temperaturabhängigkeit der Abklingzeit der Phosphoremission (gemessen auf einer Heizplatte), die blaue Linie zeigt die Abklingzeit der Phosphoremission, die an der LED gemessen wurde.

Vergleicht man das mit den Ergebnissen der Simulation, so zeigt sich, dass die Infrarot-Thermographie die Oberflächentemperatur, die mittels Simulation ermittelt wurde, recht gut wiedergibt (ca. 160 ° C aus der Messung, ca. 152 ° C aus der Simulation). Mit der Infrarotthermographie kann man allerdings nur die Oberflächentemperatur bestimmen (welche, da in diesem Bereich die höchsten Temperaturen auftreten, Auskunft über Materialbelastung und das Risiko einer Degradation geben kann). Der für die Farbkonversion wichtige Temperaturbereich kann aber nur über die Phosphorthermometrie bestimmt werden. Das meiste blaue Licht von der LED wird nämlich in unmittelbarer Nähe der LED-Chipoberfläche absorbiert und in gelbes Licht umgewandelt. Dies ist in **Abbildung 18** dargestellt.



**Abbildung 18:** Temperaturverlauf im LED-Package. Die Farbkonversionsschicht beginnt in einer Höhe von 40 μm. Ebenfalls eingezeichnet ist die Absorptionsdichteverteilung des blauen LED-Lichts in der Farbkonversionsschicht.

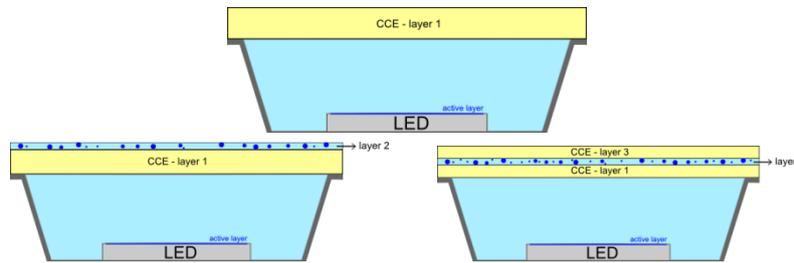
Wie aus Abbildung F ersichtlich wird da meiste blaue Licht bereits in den ersten μm absorbiert und in gelbes Konversionslicht umgewandelt. Die Temperatur in diesem Bereich, ca. 100 °C, stimmt sehr gut mit den Messungen der Phosphorthermometrie überein. Damit ist es direkt möglich diesen wichtigen

Temperaturbereich auch experimentell zu bestimmen. Dies ist nämlich genau jener Temperaturbereich, der auch für die in diesem Projekt behandelten Konzepte am wichtigsten ist und der darüber entscheidet wie stark die jeweiligen Änderungen des thermo-optischen Koeffizienten tatsächlich sind.

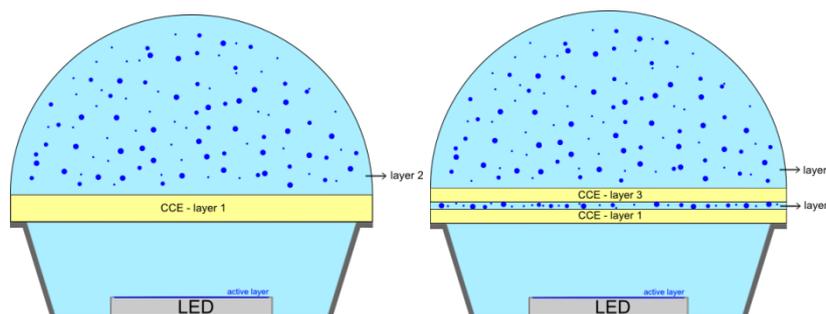
### 3.2 Problemanalyse und Konzepterstellung

Auf der Basis des Simulationsmodells wurden mögliche Konzepte für die selbstständige Nachregelung durch die Farbkonversionsschicht zur Aufrechterhaltung des Farborts im Falle einer Temperaturänderung sowie einer Degradation des Phosphors (aufgezeigt am Beispiel einer Abnahme der Anregbarkeit des Phosphors) sowie einer Kombination beider Effekte zu erarbeiten. Dies erfolgte anhand zweier möglicher Aufbauten für Farbkonversions-LEDs, Remote und Globe-Top-Anordnungen. Die wesentlichen Grundzüge dieser Konzepte für die beiden Farbkonversionsschichtkonfigurationen, Remote und Globe-Top, sind in den folgenden Abbildungen schematisch dargestellt. Ausgehend vom grundlegenden Konzept, wie es im Antragsformular dargestellt ist (für das Matrixmaterial der Farbkonversionsschicht ein Material zu wählen, dessen thermo-optischer Koeffizient genau darauf abgestimmt ist, dass sich temperaturabhängig das Streuverhalten in der Schicht derartig verändert, sodass eine gleichzeitige temperaturabhängige Änderung der Quantenausbeute kompensiert wird), kann dieses Konzept weiter verfeinert bzw. in der Anwendungsbreite vergrößert werden, indem komplexere Aufbauten in Betracht gezogen werden, wie sie z.B. in der **Abbildung** dargestellt sind. In diesem Aufbau befindet sich auf der Oberseite der Farbkonversionsschicht in Remote-Konfiguration (deren Matrixmaterial einen bestimmten thermo-optischen Koeffizienten besitzt) eine weitere Schicht, z.B. aus einem Matrixmaterial wie Silikon, wobei deren thermo-optischer Koeffizient gleich wie der des Matrixmaterials der Farbkonversionsschicht oder aber auch unterschiedliche sein kann. In dieser oberen Schicht können zusätzlich Streupartikel eingebettet sein, die nur der Streuung aber nicht der Farbkonversion dienen (Streuschicht). Sowohl über den thermo-optischen Koeffizienten des Matrixmaterials der Streuschicht als auch über die Konzentration der Streupartikel in der Streuschicht ist es möglich, zu steuern, wieviel Licht, welches die Farbkonversionsschicht verlassen hat, durch Rückstreuung wieder in die Farbkonversionsschicht zurückgestreut wird, siehe **Abbildung**. Die Streuschicht kann dabei, wie in **Abbildung** dargestellt, sowohl eine flache Geometrie aufweisen, sie kann aber auch, wie in **Abbildung** dargestellt, eine Geometrie aufweisen, über die ebenfalls das Ausmaß der Rückstreuung kontrolliert werden kann. Von Bedeutung ist dabei, dass sowohl blaues als auch gelbes, konvertiertes Licht die Farbkonversionsschicht verlassen und durch die Streuschicht wieder in diese zurückgestreut werden, siehe schematisch in **Abbildung**. Während das gelbe zurückgestreute Licht den Phosphor in der Farbkonversionsschicht nicht anregen kann, wird das zurückgestreute blaue Licht teilweise wiederum vom Phosphor absorbiert und in gelbes Licht konvertiert, wodurch der Gelbanteil an der Gesamtemission erhöht werden kann. Durch geschickte Kombination derartiger Schichten (siehe z.B. auch **Abbildung**, eine konzeptionelle Ausführung in der oberhalb dieser Streuschicht eine weitere Farbkonversionsschicht angebracht ist) kann dabei bedingt durch das Ausmaß der Rückstreuung sowohl temperaturabhängig als auch abhängig von der Anregbarkeit (Degradation) ein bestimmter Farbort in einem gewissen Ausmaß konstant gehalten werden. In besonders gut

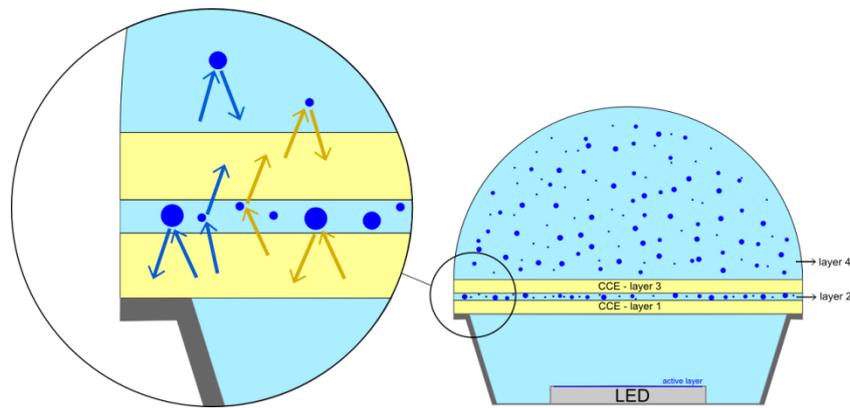
abgestimmten Fällen sollte dies auch für die gleichzeitige Kompensation von Temperatur und Anregungseffekten möglich sein.



**Abbildung 19** Konzeptionelle Aufbauten für die selbstständige Nachregelung durch die Farbkonversionsschicht zur Aufrechterhaltung des Farborts im Falle einer Temperaturänderung sowie einer Degradation des Phosphors am Beispiel einer Farbkonversionsschicht in Remote-Konfiguration. Oben: Ausgangssituation. Eine Farbkonversionsschicht (gelb) befindet sich räumlich getrennt (remote) oberhalb des LED-Chips. Unten: Mögliche Konfigurationen zur Erhöhung der Anwendungsbreite (Größe des kompensierbaren Bereichs) Links: Oberhalb der Farbkonversionsschicht ist eine weitere Schicht bestehend aus einem Matrixmaterial mit eingebetteten Streupartikeln angebracht (Streuschicht). Rechts: Oberhalb der Streuschicht ist eine weitere Farbkonversionsschicht angebracht. Die Volumina der beiden Farbkonversionsschichten können dabei gleich dem Volumen der im linken Fall dargestellten Farbkonversionsschicht sein oder sich von diesem unterscheiden.

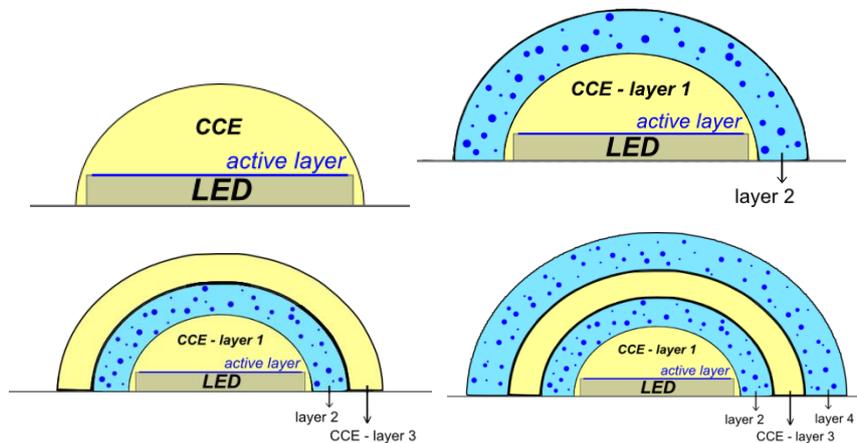


**Abbildung 20** Das Ausmaß der Rückstreuung kann auch über die Geometrie der Streuschicht eingestellt werden. Analoge Konzepte können auch für den Fall von Farbkonversionsschichten in Globe-Top-Konfiguration angedacht werden, wie sie in **Abbildung** schematisch zusammengefasst sind und bei denen ebenfalls in Abhängigkeit von der Wahl der Materialparameter und der Geometrie sowohl temperaturabhängige als auch degradationsbedingte Änderungen (bzw. deren Kompensation) kompensiert werden können sollten, da auch hierbei analoge Bedingungen, z.B. für die Rückstreuung, siehe **Abbildung** , gelten.

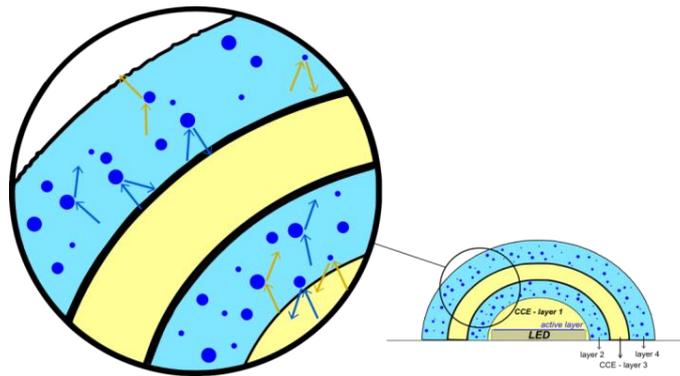


**Abbildung 21** Durch die Streuschicht wird ein Teil des blauen und gelben Lichts, welches die erste Farbkonversionsschicht verlassen hat, in diese zurückgestreut. Während das gelbe Licht vom Phosphor nicht absorbiert wird, wird blaues rückgestreutes Licht absorbiert und in gelbes Licht umgewandelt, sodass insgesamt der Gelbanteil des Lichts steigt. Wenn durch Degradation des Phosphors (weniger Absorption) mehr blaues Licht die Farbkonversionsschicht verlässt, so wird auch mehr blaues Licht zurückgestreut.

Mit den in den **Abbildung - Abbildung** dargestellten Aufbauten konnten sogar mehrere Konzepte (bzw. auch eine Reihe von Unterkonzepten) gefunden werden, mit denen eine selbstständige Nachregelung durch die Farbkonversionsschicht zur Aufrechterhaltung des Farborts im Falle einer Temperaturänderung sowie einer Degradation des Phosphors bzw. auch deren Kombination möglich sein sollte. Der Meilenstein 3 kann also als abgeschlossen betrachtet werden. Zudem wurden in diesem Arbeitspaket auch potentiell gesundheits- bzw. umweltrelevante Aspekte, die von diesen Aufbauten ausgehen bzw. bei einer Realisierung dieser Technologie zum Tragen kommen könnten, betrachtet.



**Abbildung 22** Konzeptionelle Aufbauten für die selbstständige Nachregelung durch die Farbkonversionsschicht zur Aufrechterhaltung des Farborts im Falle einer Temperaturänderung sowie einer Degradation des Phosphors am Beispiel einer Farbkonversionsschicht in Globe-Top-Konfiguration. Für Details siehe **Abbildung** .



**Abbildung 23** Auch im Falle der Globe-Top-Konfiguration kann das Ausmaß der Rückstreuung und der dadurch bedingte Anteil des gelben Lichts an der Gesamtemission gesteuert werden, für Details siehe **Abbildung** .

Die Materialien, die für diese Aufbauten in Betracht kommen können sind klassische Phosphore, wie sie üblicherweise in der LED-Industrie zur Anwendung kommen (Bose (Silikate):  $(\text{Ba,Sr,Ca})_2 \text{SiO}_4 : \text{Eu}^{2+}$ , Nitride:  $(\text{CaSr})_2 \text{Si}_5 \text{N}_8 : \text{Eu}^{2+}$ , YAG:  $\text{Y}_3 (\text{AlGa})_5 \text{O}_{12} : \text{Ce}^{4+}, \text{Ce}^{3+}$ ), Silikone (insbesondere verschiedene Varianten wie Polydimethylsiloxan, Polyphenylmethylsiloxan, Polyphenylsiloxan,...), die sich in ihren thermooptischen Koeffizienten unterscheiden) und Epoxidharze als Matrixmaterialien. Materialien, wie Titanoxid oder Bornitrid, PMMA oder Polystyrol als Streupartikel finden zum größten Teil bereits derzeit (wenngleich auch nicht so gezielt aufeinander abgestimmt wie es das Ziel dieses Projekts ist) Anwendung in der Herstellung von LED-Modulen, sodass unter dem Gesichtspunkt von Umweltaspekten in keinerlei Hinsicht mit einer Verschlechterung gegenüber dem Ist-Zustand zu rechnen ist. Eine überblicksmäßige Recherche hat gezeigt, dass von diesen Materialien im Wesentlichen auch keine gravierenden gesundheitsschädlichen Bedenken ausgehen.

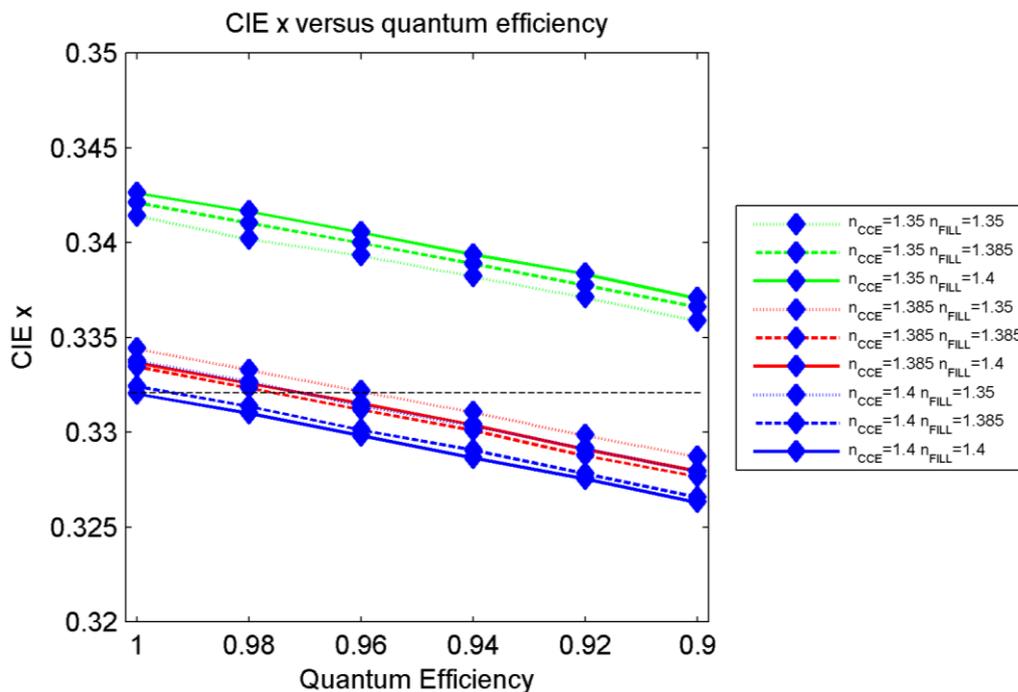
Berücksichtigt man den Umstand, dass die „Betriebsphase“ der bei weitem wichtigste Parameter für den Energieverbrauch in einer life-cycle Bewertung der LED-Technologie ist, so zeigt sich, dass sowohl die Materialherstellung als auch die Fertigung der Farbkonversionsschicht keinen gravierenden umweltrelevanten Einfluss haben. Alle Konzeptaufbauten beruhen auf Materialien, wie sie derzeit schon in der LED-Technologie zum Einsatz kommen und können auch mit Verfahren gefertigt werden, wie sie derzeit schon eingesetzt werden. Der wesentliche Unterschied besteht nur in einer ausgeklügelten Wahl der optischen Eigenschaften der Materialien. Auch wenn für die Fertigung der Farbkonversionsschicht keine detaillierten Angaben in LCA-Studien gefunden werden können, so sei dennoch z.B. die Studie Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part I: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps des U.S. Department of Energy angeführt, indem die Fertigung der Farbkonversionsschicht im Zusammenhang mit dem gesamten Packaging-Prozess betrachtet wird (The final phase of LED manufacturing is referred to as the “packaging” of the device, and involves mounting the LED chip in housing, providing electrical connections, coating with phosphor (for pc-LED packages), and applying the encapsulant and optics). Dem gesamten Packaging wird dabei ein mittlerer Wert von 6.6% des total life cycle energy use zugerechnet, was ebenfalls untermauert, dass die Realisierung der vorgeschlagenen Technologie zur Selbstkompensation keinen wesentlich hohen oder höheren Energieaufwand erforderlich machen würde. Weitere potentielle Vorteile (wie eine mögliche Verringerung des Anteils an Treiber- und

Sensorelektronik) und damit die Verringerung von Elektronikschrott unterstreichen die durchaus positive Bewertung im Hinblick auf die Energiebilanz.

## 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse hinsichtlich der Erstellung des iterativen thermischen und optischen Simulationsmodells finden sich bereits in das vorige Kapitel integriert.

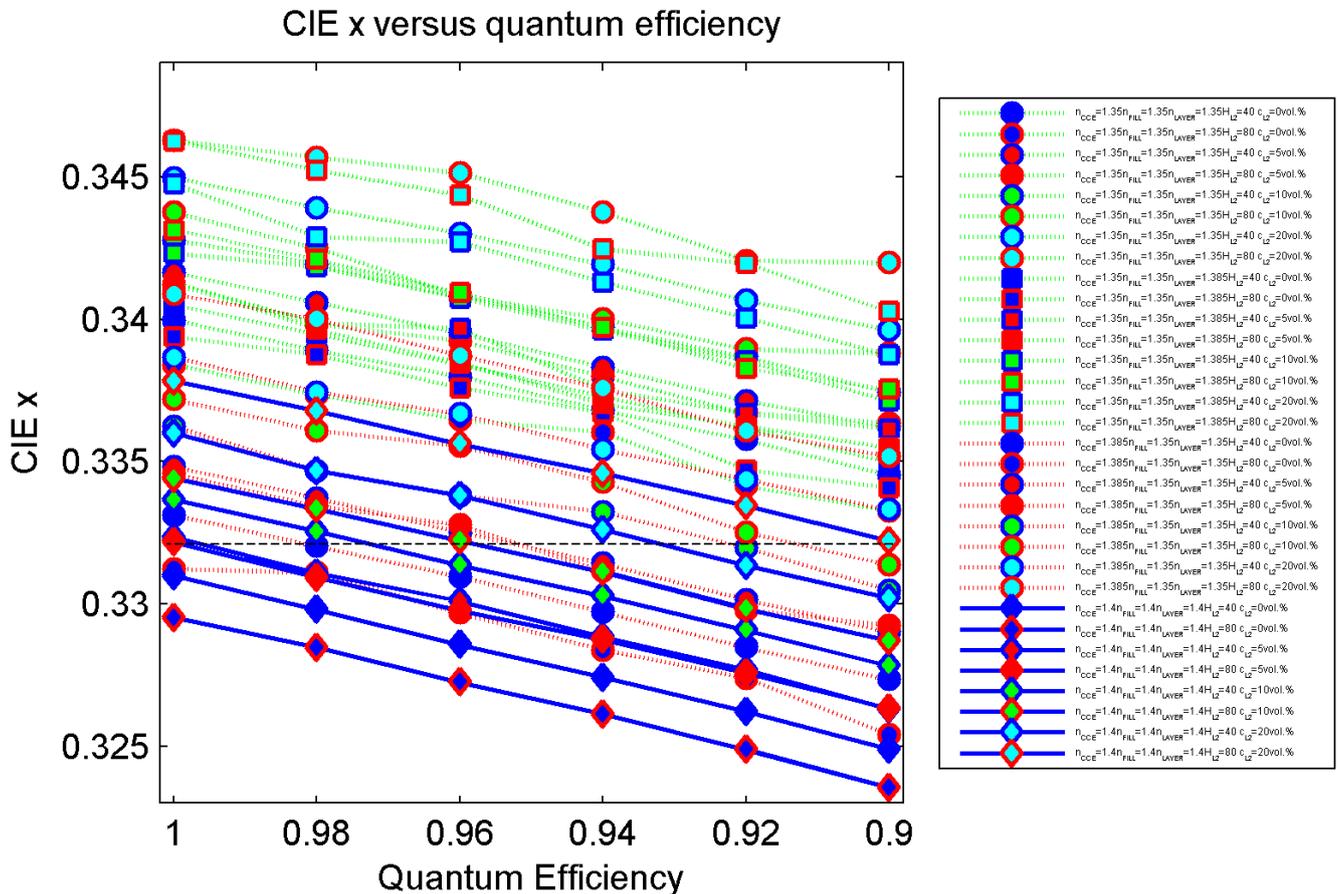
Die **Abbildung 24** zeigt die Ergebnisse des Einflusses des thermo-optischen Koeffizienten auf die Kompensation der Abnahme der Quantenausbeute für den einfachen Remote-Phosphoraufbau. In Abhängigkeit der Wahl des thermo-optischen Koeffizienten in den einzelnen Bereichen können unterschiedliche Grade an Quanteneffizienzabnahme kompensiert werden.



**Abbildung 5** CIE<sub>x</sub> vs Quanteneffizienz für den Remote-Phosphoraufbau ohne Verkapselungsschicht.

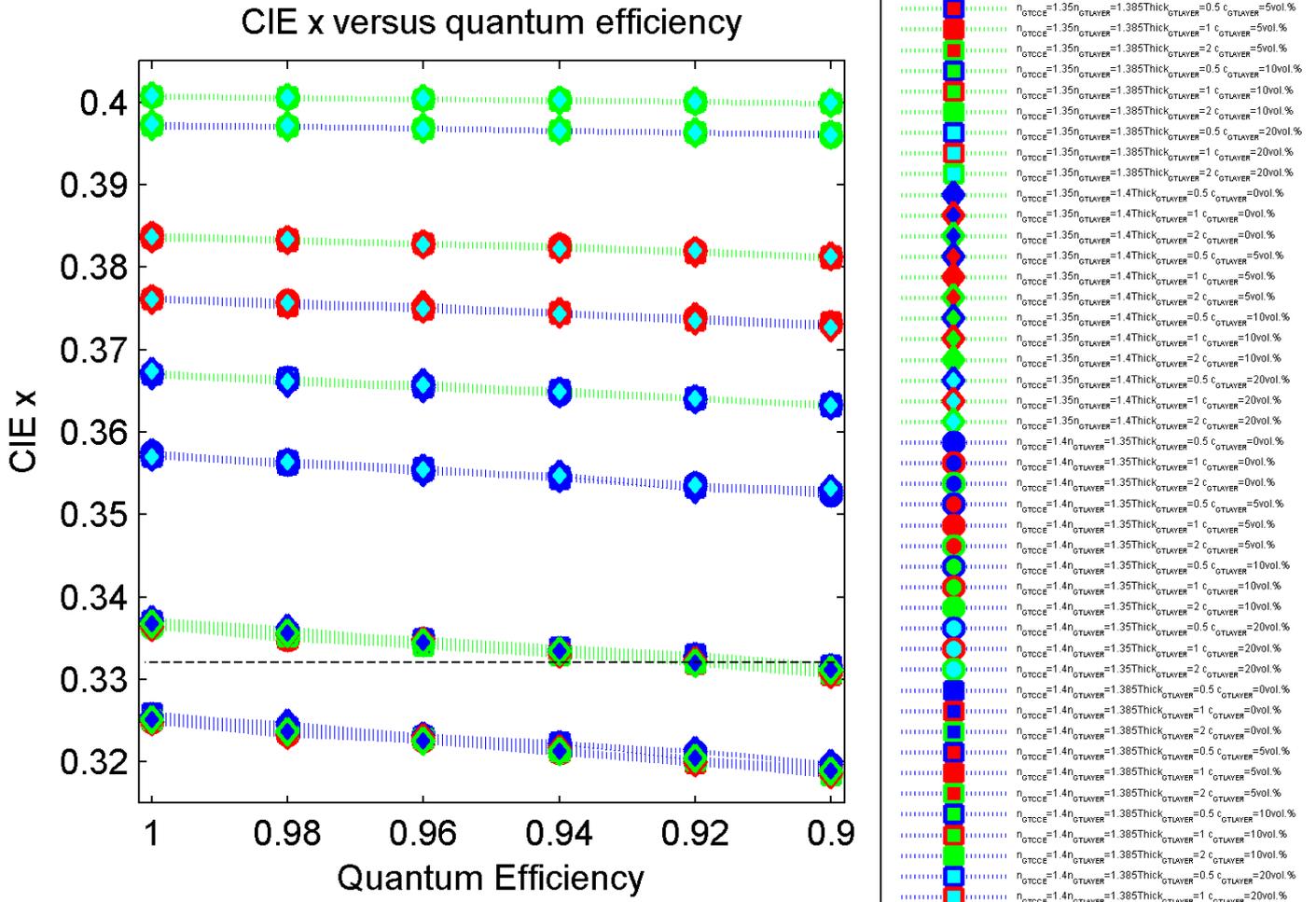
Ausgangspunkt ist immer die Annahme, dass bei 25° C der Brechungsindex des Silikons (hier der Füllbereich (Fill) und der Farbkonversionsschicht (CCE)) 1.4 ist. Während des Betriebs erhöht sich die Temperatur innerhalb der Farbkonversionsschicht, wodurch sich der Brechungsindex des Silikons in Abhängigkeit von seinem thermo-optischen Koeffizienten ändert. Es wird angenommen, dass das Füllsilikon einen thermo-optischen Koeffizienten von  $-5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  bzw.  $-1.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  hat, ebenso die Farbkonversionsschicht. Diese Werte stellen die äußeren Grenzen von thermo-optischen Koeffizienten dar, die bei Silikonen eingestellt werden können. Geht man davon aus, dass die Temperatur in der Farbkonversionsschicht um 100 K höher liegt, so ändern sich die Brechungsindizes entsprechend auf Werte zwischen 1.35 und 1.385. Wie in Abbildung 24 dargestellt lassen sich mit einigen Kombinationen von thermo-optischen Koeffizienten in den Schichten bereits recht gute Kompensationen der Quantenausbeutereduktion erzielen (Der Ausgangswert ist durch die schwarze Linie gekennzeichnet). Im Idealfall können deutlich mehr als 10% an Quantenausbeuteverlust kompensiert werden.

Noch ausgeprägter ist der Bereich der Quantenausbeutekompensation im Falle von Kombinationen der thermo-optischen Koeffizienten in den einzelnen Bereichen des Aufbaus entsprechend **Abbildung 21**, siehe **Abbildung 25**.

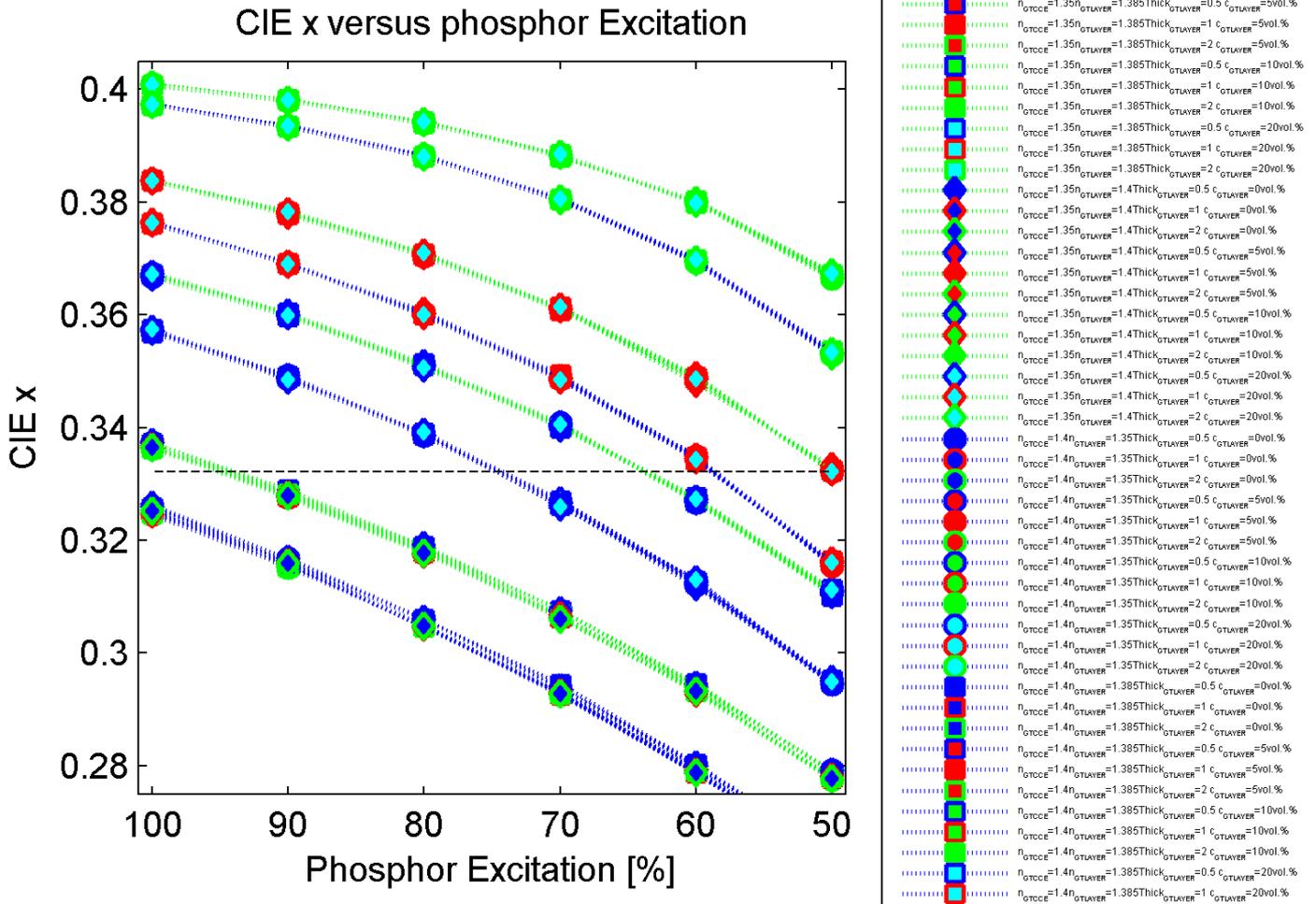


**Abbildung 25:** CIE<sub>x</sub>-Werte zur Kompensation der Abnahme der Quantenausbeute für verschiedene Kombinationen der thermo-optischen Koeffizienten (und Streupartikelkonzentrationen) in den einzelnen Bereichen vom Aufbau aus **Abbildung 21**.

Sehr gute Kompensationen kann man auch erzielen, wenn man die Aufbauten aus **Abbildung 22** zugrunde legt, siehe **Abbildung 26**. Insbesondere kann man mit letzterem Aufbau auch eine Degradation (dargestellt durch eine Abnahme des Extinktionskoeffizienten) recht gut kompensieren, siehe **Abbildung 27**.



**Abbildung 26:** CIE<sub>x</sub>-Werte zur Kompensation der Abnahme der Quantenausbeute für verschiedene Kombinationen der thermo-optischen Koeffizienten (und Streupartikelkonzentrationen) in den einzelnen Bereichen vom Aufbau aus **Abbildung 22**.



**Abbildung 27:** CIE<sub>x</sub>-Werte zur Kompensation einer Abnahme der Anregbarkeit des Phosphors (Degradation) für verschiedene Kombinationen der thermo-optischen Koeffizienten (und Streupartikelkonzentrationen) in den einzelnen Bereichen vom Aufbau aus **Abbildung 22**.

## 5 Ausblick und Empfehlungen

Die Ergebnisse haben deutlich gemacht dass durch geschickte Kombination der optischen Eigenschaften der Materialien in der Farbkonversionsschicht sowohl Abnahmen der Quantenausbeute als auch Degradation kompensiert werden können. Das sich daraus ergebende Potential zur Erhöhung der Farbstabilität von Farbkonversions-LEDs verspricht hier in Zukunft Lösungen anbieten zu können, die ohne aufwendige optische Sensorik auskommen.

Insbesondere zeichnet sich diese Technologie durch folgende Vorteile aus:

	Herkömmlicher Ansatz mittels Sensorik	iCOL-Ansatz
<b>Herstellungskosten</b>	<p>Aufwändig durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Sensorik</li> <li>-Regelungssteuerung</li> <li>-mindestens 2 LEDs unterschiedlicher Farbe (blau+CCE, rot, grün) notwendig</li> <li>-pro Farbgruppe ein Stromkreis notwendig</li> <li>-komplizierte Regelung bei Dimmbarkeit</li> <li>-im Regelungsbetrieb können nicht alle LEDs mit voller Leistung betrieben werden, daher geringerer Lichtstrom erzielbar und mehr LEDs für einen bestimmten Lichtstrom erforderlich</li> </ul>	<p>Günstig durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-einmalige Charakterisierung der LED (blau+CCE) für Farbortbestimmung</li> <li>-Auswahl des passenden Silikons</li> <li>-unabhängig von Dimmbarkeit</li> <li>-auch mit nur einer LED möglich</li> <li>-alle LEDs können mit voller Leistung betrieben werden, ohne dass sich der Farbort ändert</li> <li>-durch eine geringere Anzahl erforderlicher Komponenten und einer kompakteren Bauweise ist eine Materialreduktion für das Gesamtsystem möglich</li> </ul>
<b>Stabilität</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-hauptsächlich abhängig von Stabilität der Elektronikkomponenten (v.a. Sensoren)</li> <li>-Ausfall einer einzelnen LED kann Farbort verändern</li> <li>-Abhängig von Materialdegradation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Abhängig von Materialdegradation</li> <li>-Ausfall einer einzelnen LED beeinflusst Farbort des Gesamtsystems <b>nicht</b></li> </ul>
<b>Herstellungsdauer</b>	<p>Mehr Einzelkomponenten zu verarbeiten, mehr Prozessierungsschritte notwendig, höherer Fertigungsaufwand</p>	<p>Hauptsächlich durch Abstimmung auf Materialeigenschaften (z.B. Auswahl eines speziellen Silikons, Silikon an sich muss aber in jedem Fall verwendet werden) bestimmt</p>
<b>Genauigkeit der Regelung</b>	<p>Abhängig von Zustand und Alter der Elektronik (v.a. Sensor)</p>	<p>Näherungsweise Regelung, die im Wesentlichen den Anforderungen einer Beleuchtung genügt. Sensoransatz kann genauer sein, dies erfordert aber wiederum hochpräzise und damit teurere elektronische Komponenten.</p>
<b>Umweltrelevante Materialien</b>	<p>Typische Halbleiter-Materialien wie AlGaAs (rote LED), AlGaInP (rote, grüne, gelbe LED), AlInGaN (blaue LED) und Saphir (blaue LED).                      Farbkonversionsmaterialien, wie Silikon oder Epoxid, Granaten YAG:Ce3+ oder Orthosilikaten (Ba, Sr, Se):Eu2+, TiO2.                      Silizium, Widerstände, Dioden, Kondensatoren, Induktivitäten, andere Halbleiterbauelemente für die Sensorik</p>	<p>Typische Halbleiter-Materialien wie AlGaAs (rote LED), AlGaInP (rote, grüne, gelbe LED), AlInGaN (blaue LED) und Saphir (blaue LED).                      Farbkonversionsmaterialien, wie Silikon oder Epoxid, Granaten YAG:Ce3+ oder Orthosilikaten (Ba, Sr, Se):Eu2+, TiO2.</p>
<b>Optische Wahrnehmung (im ausgeschalteten Zustand)</b>	<p>Elektronik- und Sensorintegration erfordert größere Bauform</p>	<p>Kompaktere Bauform möglich, optische Wahrnehmung der LEDs unterscheidet sich im Wesentlichen nicht von konventionellen Systemen, daher auch kein Nachteil hinsichtlich der optischen Ästhetik</p>

<p><b>Kosten im laufenden Betrieb</b></p>	<p>Zusätzlicher Stromverbrauch durch Betrieb zusätzlicher elektronischer Komponenten, Ausfall der Elektronik kann höhere Wartungskosten verursachen (kürzeres Wartungsintervall)</p>	<p>Betrieb einer geringen Anzahl elektronischer Komponenten erforderlich, potentiell längeres Wartungsintervall Durch geringere Anzahl elektrischer Komponenten geringere Wärmeerzeugung im Betrieb, die wiederum eine geringere Wärmeabführung (bis hin zu Klimaanlage in Räumen) erfordert.</p>
---	--	---

## 6 Literaturverzeichnis

Ergebnisse aus dem Projekt wurden auf folgenden Konferenzen präsentiert

1. F.P. Wenzl, W. Nemitz, S. Schweitzer, C. Sommer, P. Hartmann, P. Fulmek, J. Nicolics, **The impact of compositional and optical properties of the colour conversion elements of phosphor converted LEDs on the thermal load upon device operation**, *14th International Symposium on the Science and Technology of Lighting, LS 14*, 22. – 27. Juni 2014, Como, Italy
2. W. Nemitz, F. P. Wenzl, S. Schweitzer, C. Sommer, P. Hartmann, P. Fulmek, J. Nicolics, **A self-compensation approach for maintaining the chromaticity coordinates of phosphor converted LEDs upon temperature variations**, *4th International LED professional Symposium +Expo, LpS 2014*, 30. September - 02. Oktober 2014, Bregenz, Austria (Vortrag)
3. F. P. Wenzl, W. Nemitz, S. Schweitzer, C. Sommer, P. Hartmann, P. Fulmek, J. Nicolics, **A self-compensation approach for chromaticity coordinate maintenance of phosphor converted LEDs upon temperature variations**, *EOS Conference on Light Engineering (EOSLE), World of Photonic Congress 2015*, 21. - 25. Juni 2015, München, Germany (Vortrag)
4. C. Sommer, P. Fulmek, J. Nicolics, W. Nemitz, S. Schweitzer, F. P. Wenzl, **Influence of electrode structure on thermal performance of high power LED**, *EOS Conference on Optomechanical Engineering (EOSOME), World of Photonic Congress 2015*, 21. - 25. Juni 2015, München, Germany (Vortrag)
5. W. Nemitz, F. P. Wenzl, S. Schweitzer, C. Sommer, P. Hartmann, P. Fulmek, J. Nicolics, **An iterative optical and thermal simulation procedure for an accurate simulation of phosphor converted LEDs**, *5th International LED professional Symposium +Expo, LpS 2015*, 22. – 24, September 2015, Bregenz, Austria (Vortrag)
6. F. P. Wenzl, W. Nemitz, F. Reil, S. Schweitzer, P. Hartmann, C. Sommer, P. Fulmek, J. Nicolics, **A comprehensive discussion on phosphor induced thermal load of solid state lighting sources**, *4<sup>th</sup> International Conference on Rare Earth Materials (REMAT 2015)*, 26. – 28. Oktober 2015, Zamek Toplacz, Sleza/Wroclaw, Poland (Vortrag, eingeladen)
7. W. Nemitz, P. Fulmek, C. Sommer, S. Schweitzer, P. Hartmann, P. Fulmek, J. Nicolics, F. P. Wenzl, **Chromaticity coordinate maintenance of phosphor converted LEDs by a self-compensation approach**, *38th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 06.-10.05.2015, Eger, Hungary (Poster)

8. P. Fulmek, W. Nemitz, F. P. Wenzl, S. Schweitzer, P. Hartmann, J. Nicolics, **Simulation Based Experimental Study of the Temperature and Power Density Distribution in a High-Power LED**, *38th International Spring Seminar on Electronics Technology, 06.-10.05.2015, Eger, Hungary* (Poster)

9. W. Nemitz, P. Fulmek, F. P. Wenzl, J. Nicolics, **Determining the thermal load of phosphor converted LEDs by an iterative optical and thermal simulation procedure**, *SPIE Optics and Photonics 2016, 28. August – 01. September 2016, San Diego, California, USA* (Vortrag)

## Wissenschaftliche Veröffentlichungen

### Proceedings

1. W. Nemitz, Ch. Sommer, S. Schweitzer, P. Hartmann, P. Fulmek, J. Nicolics, F.P. Wenzl: "Chromaticity coordinate maintenance of phosphor converted LEDs by a self-compensation approach", *IEEE Proc. of the 38<sup>th</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology, Egerzalog, Hungary, 2015*, pp. 183–187.

2. P. Fulmek, W. Nemitz, F.P. Wenzl, S. Schweitzer, P. Hartmann, J. Nicolics: "Simulation Based Experimental Study of the Temperature and Power Density Distribution in a High-Power LED"; *IEEE Proc. of the 38<sup>th</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology, Egerzalog, Hungary, 2015*, pp. 179–182

3. W. Nemitz, F.P. Wenzl, S. Schweitzer, Ch. Sommer, P. Hartmann, P. Fulmek, J. Nicolics: "A self-compensation approach for maintaining the chromaticity coordinates of phosphor converted LEDs upon temperature variations"; *Proc. of LED professional Symposium +Expo, LpS 2014, Sept. 30<sup>th</sup> – Oct. 2<sup>nd</sup> 2014, Bregenz, Austria*, pp. 66-73.

4. W. Nemitz, F.P. Wenzl, S. Schweitzer, Ch. Sommer, P. Hartmann, P. Fulmek, J. Nicolics: "An iterative optical and thermal simulation procedure for an accurate simulation of phosphor converted LEDs"; *LpS 2015, Trends and Technologies for future lighting solutions, Bregenz, Austria, Sept. 22 – 24, 2015*, pp. 54-60, in *LED Professional Review*, No. 52, Nov/Dec. 2015, pp. 48-53

### Peer Reviewed

1. M. Franz, "Critical Review on Life Cycle Inventories and Environmental Assessments of LED-Lamps", submitted

2. P. L. Fulmek, P. Haumer, F.P. Wenzl, W. Nemitz, J. Nicolics, "Time Dependent and Temperature Dependent Properties of the Forward Voltage Characteristic of InGaN High Power LEDs" submitted

3. W. Nemitz, P. Fulmek, J. Nicolics, F. Reil, F. P. Wenzl, "On the determination of the temperature distribution within the color conversion elements of phosphor converted LEDs", submitted

4. P. Fulmek, J. Nicolics, W. Nemitz<sup>2</sup>, F. P. Wenzl, "On the impact of the temperature dependency of the quantum efficiency of the phosphor on correlated color temperature stability in phosphor converted LEDs", submitted

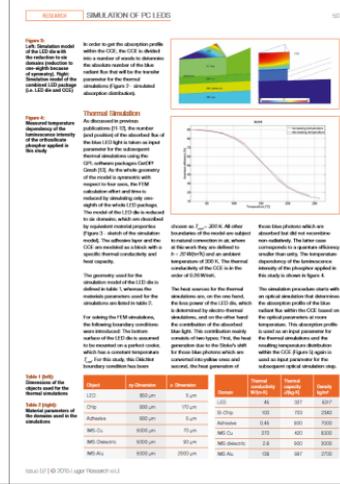
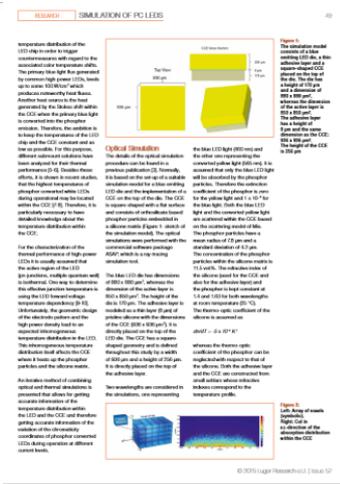
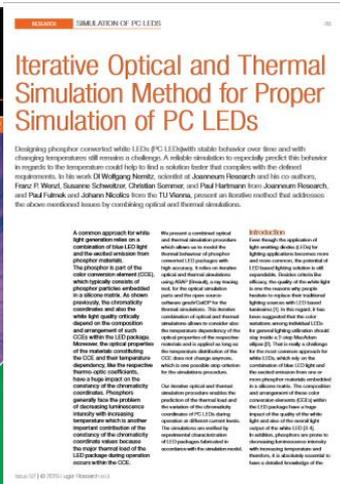
5. J. Nicolics, P. Fulme<sup>1</sup>, W. Nemitz, F. P. Wenzl, "Analysis of the Local Temperature Distribution in Color Conversion Elements of phosphor converted LEDs", submitted

6. W. Nemitz, P. Fulmek, J. Nicolics, F.P. Wenzl, "On the impact of the thermo-optic coefficient of the matrix materials on the angular homogeneity of phosphor converted LEDs", in preparation

Weitere Einreichungen sind noch in Planung.

# 7 Anhang

Ein wichtiges Projekt-Highlight die Verleihung des Scientific Awards auf dem LED professional symposium 2015, bei der der Projektleiter Wolfgang Nemitz mit seiner vollständig im Rahmen des Projektes iCOL erstellten Arbeit den „LpS Scientific Award 2015“ gewinnen konnte. Neben der Reputation des Preises wurden die Proceedings in einer Ausgabe der LED professional Review abgedruckt (die angeführten Bilder finden sich auch bereits im ersten Zwischenbericht). In einer weiteren Ausgabe des LED professional Review wurde ein Interview mit Wolfgang Nemitz veröffentlicht (Tech Talk), in dem er nochmals den Inhalt seiner Arbeit (iCOL) einer breiten Öffentlichkeit vorstellte konnte.



# 8 Kontaktdaten

ProjektleiterIn: DI Wolfgang Nemitz  
 Institut/Unternehmen: JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH  
 Kontaktadresse Franz-Pichler-Straße 30, A-8160 Weiz, Wolfgang.Nemitz@joanneum.at  
 Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen TU Wien, Prof. Johann Nicolics, Institut für Sensor & Aktuatorssysteme.