

Thermische Analyse einer “midpower” LED auf verschiedenen Leiterplatten

von

K. Bosschaart, V. D. Hildenbrand,

LED Platform Development, BG LS&E, Philips Lighting B.V., HTC 44, Eindhoven,
The Netherlands

Zusammenfassung

Die Transiententestmethode T3ster wird häufig für die detaillierte thermische Analyse von LEDs und LED-Bauteilen verwendet, um thermische Widerstände in den Bauelementen zu bestimmen. Ein besonderes Augenmerk gilt hier der Temperatur der Lötstelle zwischen LED und Leiterplatte, weil deren Ermüdung eine der Hautausfallsursachen von LED-Lichtquellen ist. Oft wird hierzu die „dual interface“-Methode gebraucht, bei der unterschiedliche Leiterplatten benutzt werden, um durch den Vergleich der aus den Transientmessungen erhaltenen Strukturfunktionen auf die Position der Grenzfläche zu schließen.

Der Vortrag beschreibt die Analyse der Transientkurven einer „mid-power“ LED auf Al-IMS- und CEM3-Leiterplatten verschiedener Größen. Dabei wird auf Probleme der Transientmessung bei „mid-power“ LEDs eingegangen. Die Standardinterpretation der Transientmessungen ist auf einem linearen Widerstandstandsnetzwerk basiert. Mithilfe von ANSYS-Simulationen wird gezeigt, daß dies im Falle der „mid-power“ LEDs mit großem Leuchtstoffkörper zu Fehlinterpretationen führen kann.

Kurzbiographie Dr.-Ing. V. D. Hildenbrand

V. D. Hildenbrand promovierte nach einem Studium der Chemie 1996 in dem Fachbereich Materialwissenschaft der TH Darmstadt. Daraufhin wechselte er in die Philips Forschungslaborationen in Eindhoven und arbeitete an Glasbeschichtungen und optischen Modellen für Fluoreszenzlampen. 2001 begann er als Projektleiter für Leuchtstoff relativierte Projekte in der zentralen Vorentwicklung von Philips Licht in Eindhoven. Zwischen 2003 und 2005 verschob sich sein Tätigkeit auf das Gebiet der Hochdruckgasentladungslampen und später erfolgte eine Spezialisierung auf die thermomechanische und chemische Modellierung dieser Lampen. Nach einer kurzen Periode in Turnhout (Belgien) arbeitet er seit 2013 in der „LED Platform Development“ Gruppe von Philips Licht in Eindhoven als Projektleiter und „Principal Thermal Engineer“.

Thermische Analyse einer “midpower” Led auf verschiedenen Leiterplatten

von

K. Bosschaart, V. D. Hildenbrand,

LED Platform Development, BG LS&E, Philips Lighting B.V., HTC 44, Eindhoven,
The Netherlands

Einleitung

Die Lichtindustrie vollzieht momentan den Übergang von der durch Vakuum, Entladungen und Prozesstechnik gekennzeichneten Lampenindustrie zu der durch LEDs geprägten Halbleiterindustrie. LEDs werden je nach Anwendung auf verschiedene Sorten Leiterplatten wie Al-IMS, FR4 oder CEM3 montiert. Wichtig für die Auslegung von Lampen- und Leuchtensystemen sind die „junction“-und die Lötstellentemperatur. Allgemein wird die Lebensdauer halbiert, wenn sich die genannten Temperaturen um 10 °C erhöhen. Problem ist, daß diese Temperaturen nicht bzw. oft nicht direkt mithilfe von IR-Kameras oder Thermoelementen meßbar sind. Die „junction“ befindet sich in der LED und kann nur durch eine indirekte Messung der Vorwärtsspannung ermittelt werden. Die Lötstelle sitzt unter der LED und es entsteht ein von der Auslegung der LED-Kontakte abhängiger Gradient bis zu dem Punkt auf der Leiterplatte, auf dem man ein Thermoelement anbringen kann. Etwas Licht in das Dunkel bringen zwei Methoden.

Die erste ist die T3ster Transienttestmethode. Die aus der Vorwärtsspannungsänderung der LED abgeleitete Abkühlungskurve der „junction“ wird benutzt, um unter der Annahme eines linearen Widerstandsnetzwerks thermische Widerstände und Kapazitäten für die Haupt-LED-Bauteile zu berechnen. Ist der Bauplan und sind die Materialparameter der LED-Komponenten bekannt, kann mithilfe von FEM-Programmen wie z. B. ANSYS auch eine Temperaturverteilung in der LED simuliert werden. In der vorliegenden Studie werden beide Methoden angewendet und verglichen.

Experimente

Der Kern der „midpower“ LED besteht aus einer Licht emittierenden Schicht auf Saphir. Mithilfe eines Klebers wird sie auf der aus einer Kupferlegierung bestehenden Kathode befestigt. In den im Gehäuse befindlichen Hohlraum wird um den Saphir und die Licht emittierende Schicht ein mit Leuchtstoff gefüllter Kunststoff zur Lichtkonversion angebracht. Die Leiterplatten bestehen aus CEM3 and Al-IMS mit einer Dicke von 1.6 mm. Die Dicke des Dielektrikums auf der Ober- und Unterseite des Al-IMS ist 120 μm und die der aufgetragenen Cu-Spuren 35 μm . Es werden zwei verschiedenen Leiterplattengrößen und Kupferspurenmuster untersucht. Sie sind in Abbildung 1 wiedergegeben. Im ersten Fall ist die Leiterplatte 25 mm \cdot 25 mm groß. Die grün wiedergegebenen Kupferspuren füllen beinahe die gesamte Leiterplattenfläche. Im zweiten Fall sind die Leiterplatten lediglich 6.6 mm \cdot 8 mm und sind die Kupferspuren nur etwas größer als die Elektrodenoberflächen der LED gewählt.

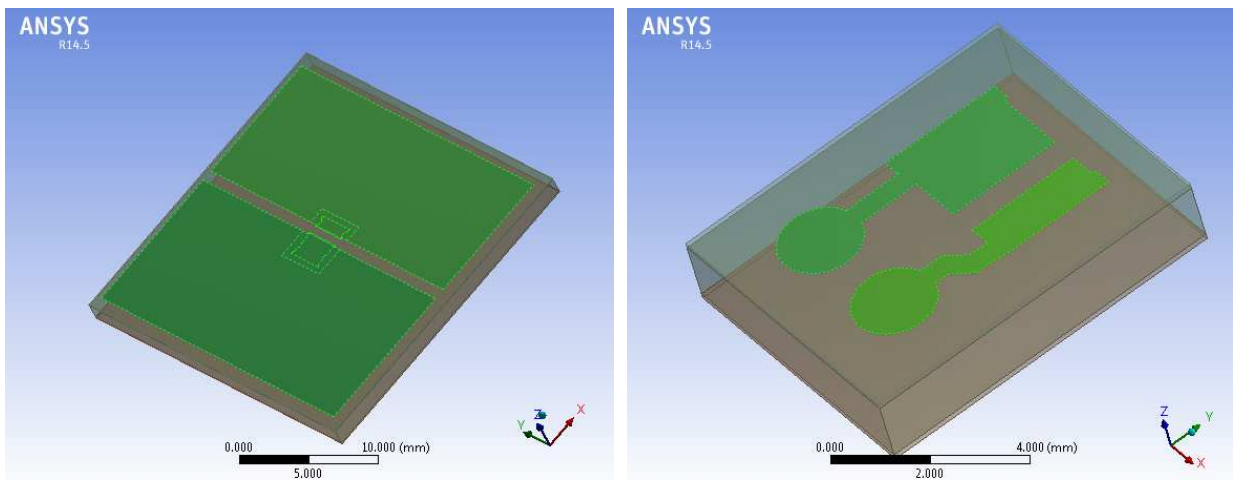


Abbildung 1: Wiedergabe der zwei verwendeten Leiterplattengeometrien. Die Leiterplatte auf der linken Abbildung ist 25 mm \cdot 25 mm groß, die auf der rechten 6.6 mm \cdot 8 mm. Die grünen Flächen markieren die Größe der Kupferspuren.

Messungen

Die LEDs werden zur thermischen Charakterisierung mit einer thermischen Paste auf eine Kühlplatte aufgebracht, deren Temperatur mit einem Thermostat auf 25 $^{\circ}\text{C}$ eingestellt wird. Der Betriebsstrom beträgt 100 mA. Auf der leicht aus dem Gehäuse herausstehenden Kathode wird ein Thermoelement Typ K festgeklebt. Während der T3ster-Messungen werden bei der Abkühlung die Vorwärtsspannung als Maß für die „junction“-Temperatur und die Thermoelementtemperatur registriert. Der Teststrom beträgt 4 mA. Vor jeder Messung wird mit einer Fluke-Ti32-Kamera ein Infrarotphoto im erwärmten Zustand aufgenommen. Um die Infrarotdaten in Temperaturen umzuwandeln wird eine Emissivität von 0.95 angenommen. Zum Vergleich der Infrarotdaten mit den Transienttestdaten werden die Temperaturen entlang einer

Linie von der Kathoden- zu der Anodenseite der Leiterplatte ausgelesen. Die Auswertung der T3ster-Messungen erfolgt mit dem T3ster-Master-Programm von MentorGraphics/MicReD. Die „junction“-Temperatur, die Thermoelementtemperatur und das ausgelesene Infrarottemperaturprofil werden in den Abbildungen 2 und 3 für die 25 mm · 25 mm bzw. die 6.6 · 8 mm Leiterplatten zusammengefaßt.

Die extra Temperaturmaxima in dem Temperaturprofil des 25 mm · 25 mm Al-IMS werden durch freiliegende Kupferstellen erzeugt, deren Emissivität deutlich unter der der Lötmaske liegt. Die mit dem Thermoelement gemessenen Temperaturen stimmen für die CEM3-Leiterplatten recht gut mit den Temperaturen an der entsprechenden Position im IR-Profil überein. Bei den Al-IMS ist eine signifikante Abweichung von einigen °C erkennbar. Die Temperatur des IMS liegt nur wenig über der Umgebungstemperatur. Die Abweichungen lassen sich nicht exakt erklären, aber Reflektionen von der LED-Strahlung oder anderen Körpern in der Umgebung können zu diesen Abweichungen beitragen.

Die Abkühlkurve aus den T3ster-Messungen wird mithilfe einer Foster-Cauer-Transformation in eine Pronatorius-Wing-Funktion umgewandelt. Diese Funktion gibt den Verlauf der thermischen Kapazitäten in der Probe als Funktion des thermischen Widerstands wieder und wird auch als Strukturfunktion bezeichnet. Die erste Ableitung dC_{th}/dR_{th} bezeichnet man als differentielle Strukturfunktion. Die differentiellen Strukturfunktionen der Proben sind in Abbildung 4 zusammengefaßt. Mit den vertikalen Linien wird für jede Probe der thermische Widerstand zwischen der „junction“- und der Thermoelementtemperatur wiedergegeben. Zu größeren Widerständen hin laufen die Kurven asymptotisch auf einen Grenzwert zu. Der Grenzwert entspricht dem Gesamtwiderstand der LED und der Leiterplatte. Wie erwartet haben die kleineren Proben einen deutlich höheren thermischen Gesamtwiderstand als die vergleichbaren großen Leiterplatten. Auffallend ist auch, daß die gemessenen Thermoelementtemperaturen der größeren Proben wenig voneinander abweichen, während die der kleinen Proben sich deutlich von einander und von denen der größeren Proben unterscheiden. Dies weist auf große Temperaturgradienten in den Proben hin.

Eine detaillierte Interpretation der kumulativen und differentiellen Strukturfunktion wird anhand der in Abbildung 5 wiedergegebenen der 25 mm · 25 mm Al-IMS Leiterplatte versucht. Die Kapazität bleibt zwischen ≈ 0 und 3 K/W konstant. Dies ist der Bereich, der dem Saphirbauteil in der LED zugeschrieben werden kann. Eine Stufe leitet dann zu einem langen linearen Plateau zwischen 4.6 und ca. 20 K/W über. Diesen großen Widerstand und die kleine Kapazitätsänderung könnte man der dünnen Kleberschicht zwischen Saphir und der darunterliegenden Kathode zuschreiben. Es ergibt sich dann aber ein Problem. Der thermische Widerstand zwischen der Grenzfläche Kleberlage/Kathode und der Thermoelementposition an der Seite der Kathode errechnet sich dann zu $\approx 11 - 13$ K/W. Dies ist ein sehr großer Wert, wenn man berücksichtigt, daß die Kathode aus einer sehr gut leitenden Kupferlegierung besteht. Die gemachten Zuordnungen sind deshalb höchstwahrscheinlich falsch.

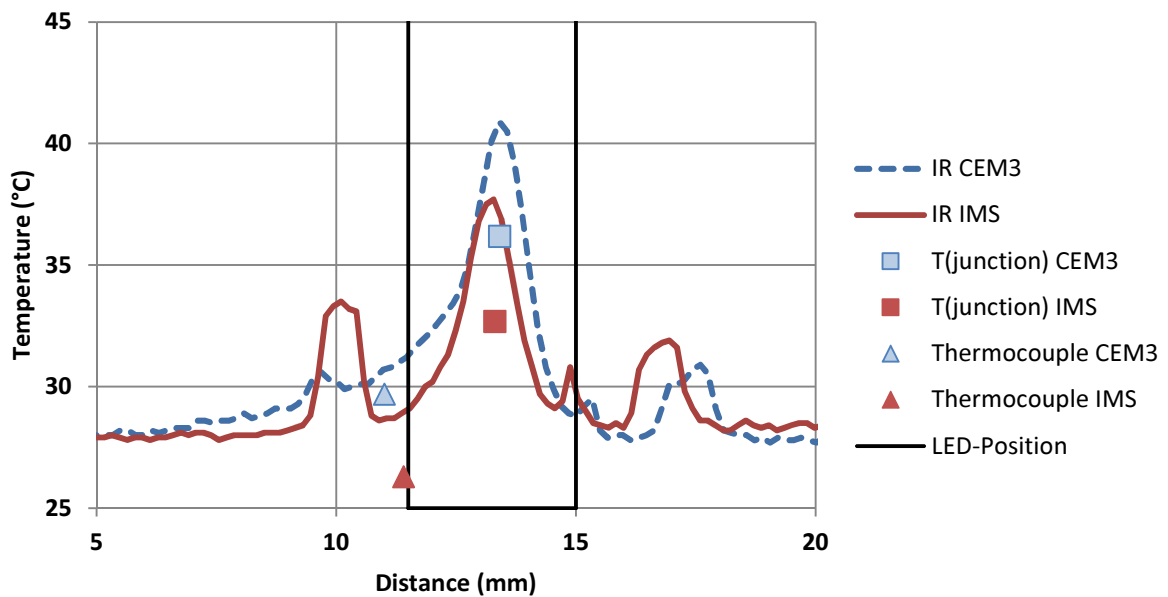


Abbildung 2: Gemessene „junction“- und Thermoelementtemperatur zusammen mit dem IR-Temperaturprofil für die 25 mm · 25 mm großen CEM3 und Al-IMS Leiterplatten. Die IR-Temperaturen sind mit einer Emissivität von 0.95 berechnet worden.

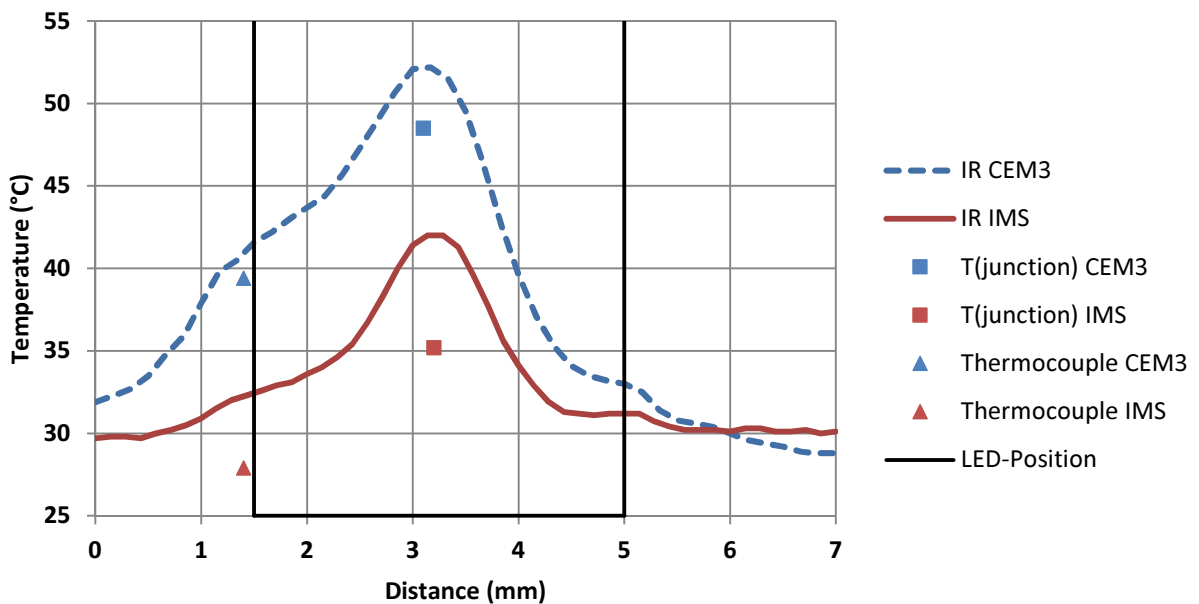


Abbildung 3: Gemessene „junction“- und Thermoelementtemperatur zusammen mit dem IR-Temperaturprofil für die 6.6 mm · 8 mm großen CEM3 und Al-IMS Leiterplatten. Die IR-Temperaturen sind mit einer Emissivität von 0.95 berechnet worden.

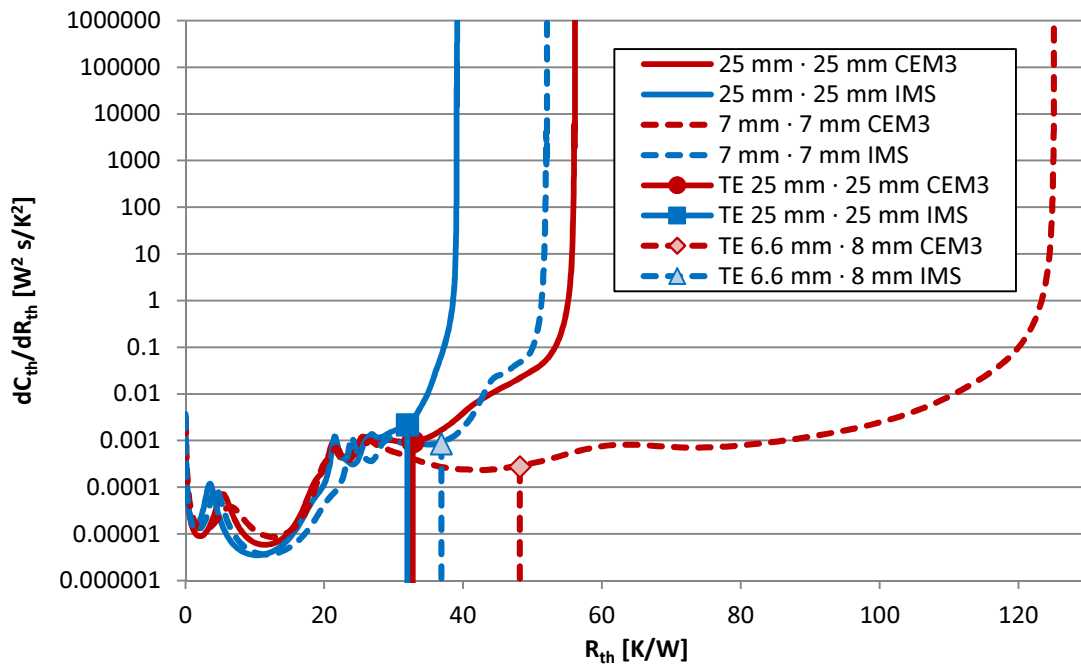


Abbildung 4: Die differentiellen Strukturfunktionen der untersuchten Proben. Größe und Leiterplattenmaterial sind in der Legende angegeben. Der gemessene thermische Widerstand zwischen der „junction“ und der Thermoelementposition ist für jede Probe als vertikale Linie wiedergegeben.

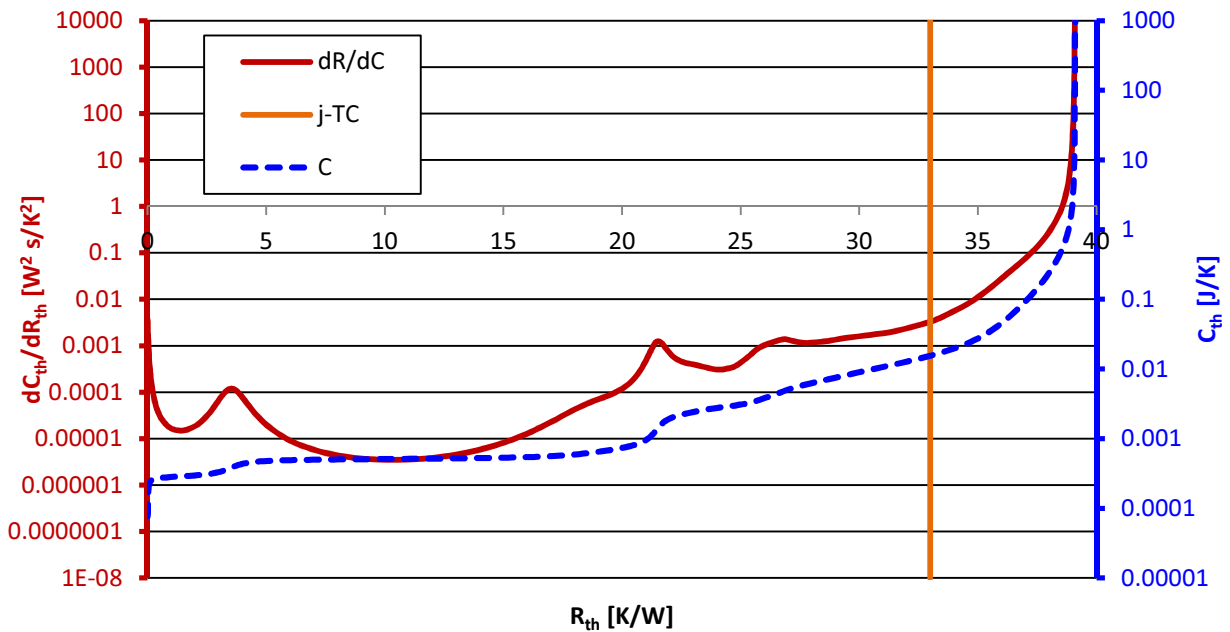


Abbildung 5: Differentielle und kumulative Strukturfunktion der 25 mm · 25 mm Al-IMS Leiterplatte. Der gemessene thermische Widerstand zwischen „junction“ und Thermoelement ist als vertikale orange Linie wiedergegeben.

Vergleicht man die Messungen der CEM3- und Al-IMS-Proben gleicher Größe, sollten man zumindest die Grenzfläche zwischen LED und Leiterplatte definieren können, wenn man annimmt, daß der LED Widerstand unabhängig vom Substrat ist. Bei dem Widerstand, bei dem die kumulativen Strukturfunktionen einen unterschiedlichen Verlauf nehmen, sollte mit dem Widerstand zwischen „junction“ und der Temperatur der Grenzfläche übereinstimmen. In Abbildung 6 sind die kumulativen Strukturfunktionen der 25 mm · 25 mm IMS und CEM3 Leiterplatten wieder gegeben. Der aus der „junction“- und Thermoelementtemperatur berechnete thermische Widerstand ist als orange, vertikale Linie eingezeichnet.

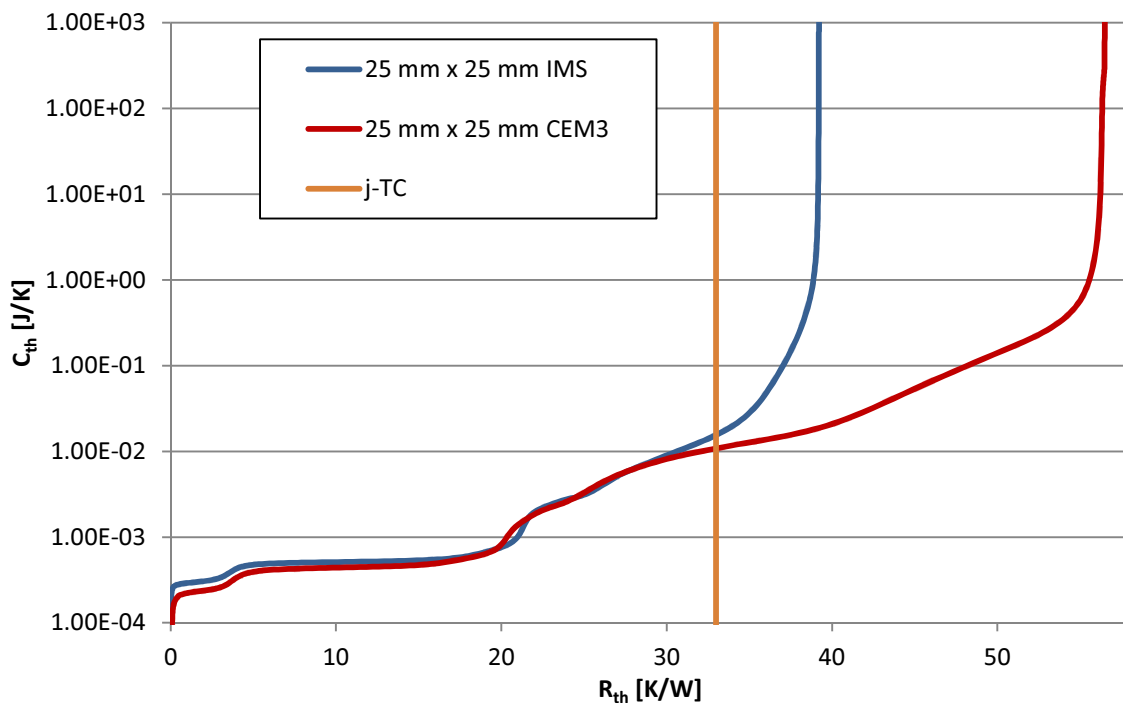


Abbildung 6: Kumulative Strukturfunktionen der 25 mm · 25 mm IMS und CEM3 Leiterplatten. Die orange vertikale Linie markiert den aus der „junction“- und der Thermoelementtemperatur berechneten thermischen Widerstand.

Der Verlauf der Kurven ist selbst im Bereich unter 20 – 30 K/W nur ähnlich, aber nicht identisch. Deutlich anders verlaufen sie jedoch erst ab ≈ 30 K/W. Dieser Wert sollte dann die Grenzfläche zwischen LED und Leiterplatte markieren. Der Wert ist aber niedriger als der mithilfe des Thermoelements berechnete. Im Konzept des linearen Widerstandsnetzwerkes denkend wäre dann die Grenzfläche zwischen LED und Leiterplatte in der LED selbst angesiedelt. Der Widerspruch läßt sich lösen, wenn man annimmt, daß auch das Temperaturprofil in der LED durch die Leiterplatte beeinflusst wird. Bleibt die Frage, bei welchem Wert dann die Grenzfläche zwischen beiden Komponenten und der für die Zuverlässigkeit wichtigen Lötstelle zu finden ist. Dies wird mithilfe von Simulationen in ANSYS Workbench weiter untersucht.

Simulationen

Simulationen sind nur so gut wie die verfügbaren Ausgangsdaten. Die Dimensionen und die gebrauchten Materialien der LED werden mithilfe optischer Mikroskopie, SEM-Aufnahmen und EDAX bestimmt. Wichtige LED-Bauteile wie der Kleber für den Saphir und den Leuchtstoffkörper sind jedoch Komposite aus mindestens 2 Materialien. Die entsprechenden Materialparameter können deshalb nur abgeschätzt werden bzw. müssen solange angepasst werden, bis eine akzeptable Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulationen erzielt wird. Um die Anzahl der variablen Parameter zu begrenzen, wird das Wärmegenerationsprofil im Leuchtstoffkörper durch die Umwandlung des blauen Lichtes mit einem semi-emprischen Model simuliert. Die Wärmebilanz in der Leuchtstoffschicht ist schematisch in Abbildung 7 wiedergegeben.

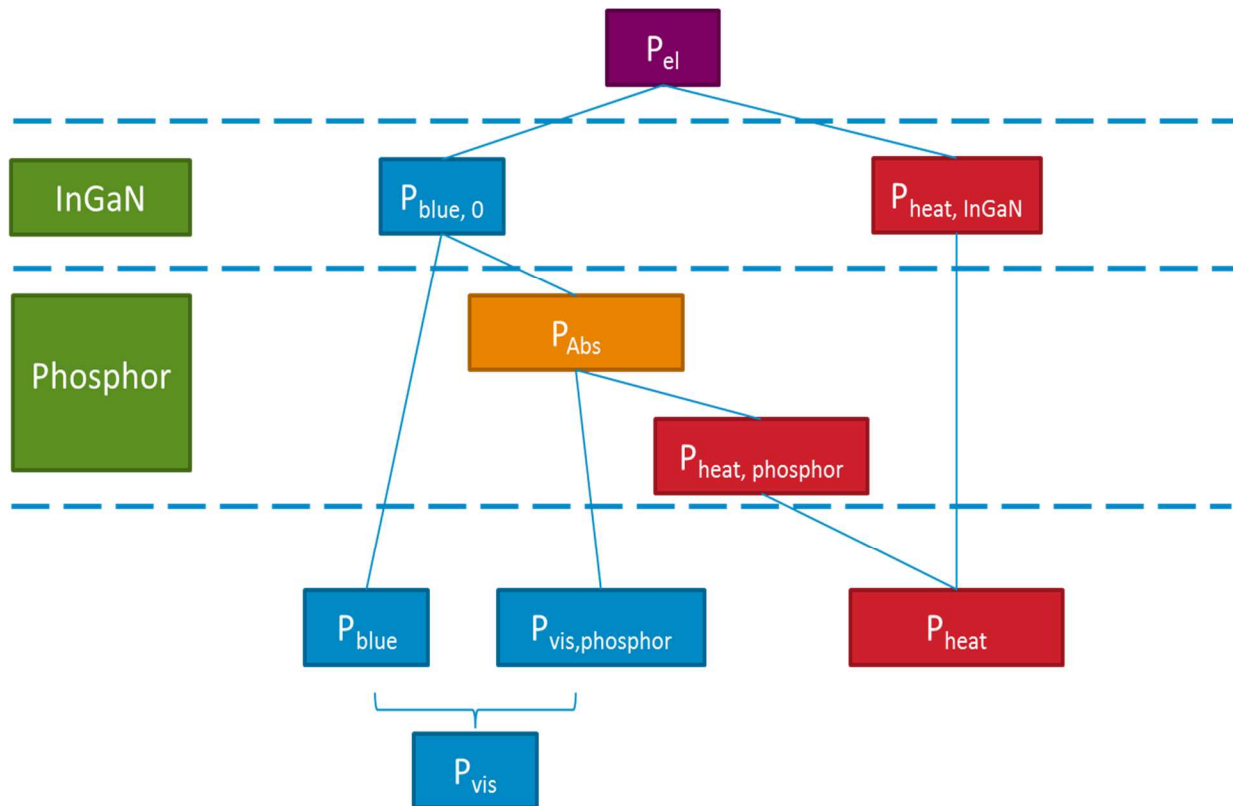


Abbildung 7: Schema der Wärmebilanz in der Leuchtstoffschicht.

Die elektrische Eingangsleistung P_{el} und die optische Ausgangsleistung P_{vis} sind experimentell zugänglich. Die anderen lassen sich abschätzen bzw. berechnen, wenn man annimmt, daß die im Leuchtstoff absorbierte Leistung P_{abs} durch

$$P_{abs} = P_{vis, phosphor} / (Q \cdot \lambda_{blau} / \lambda_{em})$$

gegeben ist. Q ist die Quanteneffizienz des Leuchtstoffes. Ihr Wert bewegt sich um die 0.9. λ_{blau} und λ_{em} sind die gemittelte Emissionswellenlänge der LED und des Leuchtstoffes. $P_{\text{vis, phosphor}}$ ist der Anteil der Leuchtstoffstrahlung an der sichtbaren Totalemission. Für die untersuchten warmweißen LEDs liegt der Wert bei knapp 90 %.

Die Simulationen werden für alle 4 Proben durchgeführt. Die thermische Leitfähigkeit des Leuchtstoffkörpers und der Kleberschicht werden solange innerhalb physikalische Grenzen variiert bis eine akzeptable Simulation der gemessenen Temperaturen und der Strukturfunktionen erreicht werden. Als Beispiel sind die kumulative und die differentielle Strukturfunktion des 25 mm · 25 mm Al-IMS in Abbildung 8 wiedergegeben.

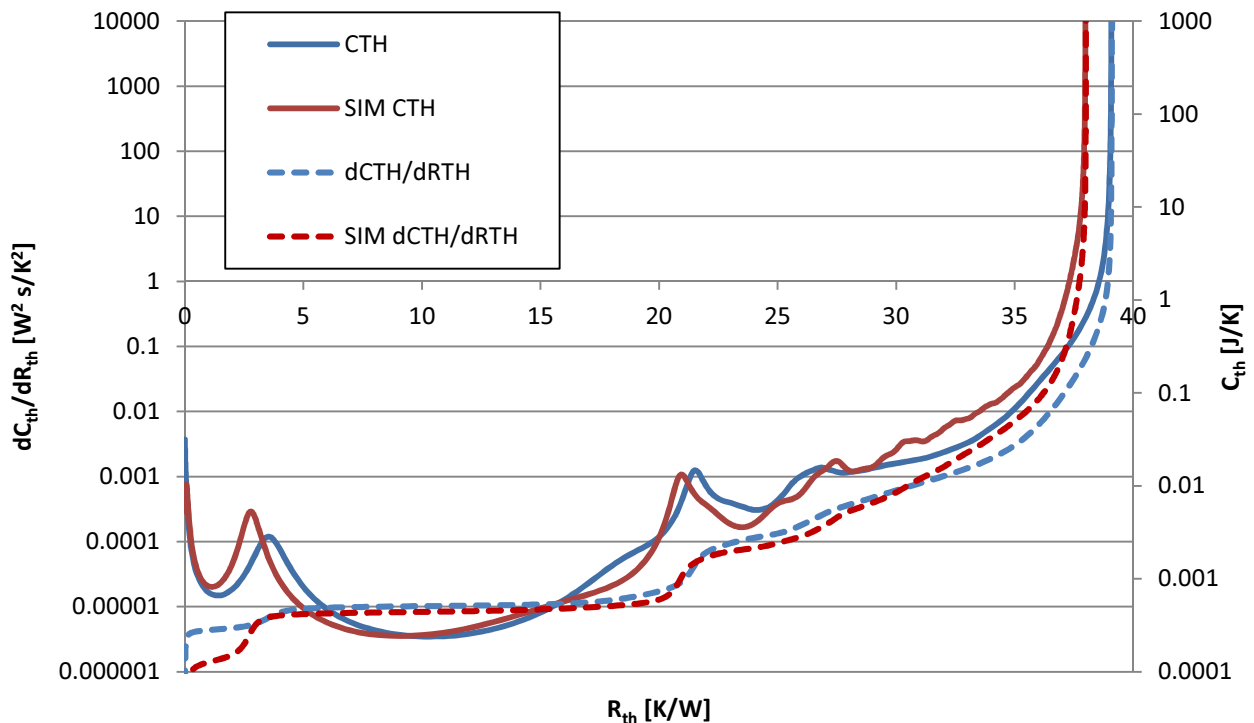


Abbildung 8: Gemessene und mit ANSYS berechnete kumulative und differentielle Strukturfunktionen der 3535L auf dem 25 mm · 25 mm Al-IMS. Die gestrichelten Linien geben die kumulativen Strukturfunktionen wieder, die durchgezogenen die differentielle. Blaue Linien markieren die Messungen, die roten die Simulationsergebnisse.

Das ANSYS-Modell kann nun benutzt werden, um die Temperaturen der unterschiedlichen Grenzflächen zu berechnen und die dazugehörigen thermische Widerstände mit den Stufen bzw. Maxima und Minima in den Strukturfunktionen zu vergleichen. Dabei stellt sich heraus, daß die Stufe in der kumulativen bzw. das Maximum in der differentielle Strukturfunktion bei ≈ 21 K/W nicht einer realen Grenzfläche entspricht, sondern einer Änderung des Temperaturgradienten ca. $2.8 \mu\text{m}$ von der Grenzfläche zum Saphir entfernt. Gleiches gilt für das

breite Maximum bei $\approx 27 \text{ K/W}$ in der differentiellen Strukturfunktion, das auf eine Gradientenänderung in ca. $5.5 \mu\text{m}$ Abstand von dem Saphir zurückzuführen ist. Leuchtstoffkörper und Kleber haben vergleichbare thermische Leitfähigkeiten. Im Bereich der Kleberschicht kann es deshalb zu erheblicher lateraler Wärmeleitung kommen. Eine Interpretation im Rahmen eines linearen Widerstandsmodells kann zu Fehlinterpretationen führen, weil Spreizungswiderstände und parallele Wärmewege hinzu kommen.

Der Unterschied von 3 K/W zwischen dem thermischen Widerstand zwischen „junction“- und Thermoelementtemperatur und dem Trennungspunkt der kumulativen Strukturfunktion der $25 \text{ mm} \cdot 25 \text{ mm}$ CEM3- und IMS-Proben in Abbildung 6 läßt sich mit einem internen Temperaturgradienten in dem Kathodenkörper erklären.

Zusammenfassung

„mid-power“-LEDs sind komplexe thermische Systeme. Zum einen ist der Leuchtstoffkörper im Vergleich zur Licht emittierenden Schicht groß und es entwickelt sich darum ein ausgeprägtes Temperaturprofil. Zum anderen ist die Leitfähigkeit des Klebers, der den Saphir mit dem Kathodenkörper verbindet von gleicher Größenordnung wie die des Leuchtstoffkörpers. Dadurch ergibt sich eine kleine Zone, in der eine starke laterale Wärmeleitung stattfinden kann. Die standardmäßige Auswertung der T3stermessungen unter Annahme eines linearen Widerstandsnetzwerkes kann hier zu Fehlinterpretationen führen.