

Systematischer Ansatz für effizientes Thermomanagement in LED-Beleuchtungssystemen

Alena Tarbeyevskaya^{1,2}, Christian Herbold³, Alexander Hornberg¹, Cornelius Neumann³, Christoph Schierz²

¹ Hochschule Esslingen, ZAFH LED-OASYS

² Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

³ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)

1. EINLEITUNG

Im Gegensatz zu konventionellen Leuchtmitteln muss das thermische Verhalten von Hochleistungs-LEDs genau kontrolliert werden, um eine lange Lebensdauer der Bauteile zu erreichen. Nicht nur die Lebensdauer, sondern auch optische Eigenschaften, wie der Lichtstrom und die Lichtfarbe, hängen von der Sperrschichttemperatur der LED ab. Dabei ist ein effizientes Thermomanagement aus technischer Sicht und aus Kostengründen immer eine maßgeschneiderte Lösung, die auf die speziellen Anforderungen und Ziele des jeweiligen LED-Systems ausgerichtet ist.

Der Entwicklung eines optimalen Entwärmungs-Konzeptes von LED-Beleuchtungssystemen wird immer noch im Vergleich zum Optik-Design wesentlich weniger Beachtung geschenkt und sie wird entsprechend unsystematisch gehandhabt. Dabei ist es gerade in diesem Umfeld wichtig, die verschiedenen Produktbestandteile, wie Mechanik, Optik und Elektronik, integriert zu betrachten. Hierbei können Vorgehensmodelle mit einer strikten Systemorientierung hilfreich sein, da sie die Definition von Anforderungen auf Systemebene inklusive der Verknüpfung mit ihrer Umsetzung in Software fordern und die Systemintegrations- und Systemtestphasen hervorheben.

Im Rahmen des ZAFH-Projektes LED-OASYS wurde eine systematische Vorgehensweise zur Entwicklung eines optimalen Entwärmungs-Konzeptes von LED-Beleuchtungssystemen in [1] vorgestellt und dient als Grundlage für diese Arbeit. Das auf einem V-Modell basierte Vorgehen ist dabei sehr organisationsneutral gehalten und beschränkt sich ausschließlich auf den technischen Entwicklungsgang.

In diesem Beitrag wird eine praktische Anwendung dieses Vorgehens am konkreten Beispiel einer LED- Spotleuchte dargestellt. Basierend auf einer systematischen Analyse der an das System gestellten Randbedingungen und Zielparameter wird ein Lösungsansatz für ein effizientes Thermomanagement erarbeitet. Eine Vorhersage der thermischen Vorgänge im entwickelten System wird mit Hilfe von CFD („Computational Fluid Dynamics“) Simulationen getroffen. Basierend auf der Analyse der thermischen Transienten wird anschließend das Funktionsmuster charakterisiert, wobei sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität gezeigt hat.

2. GRUNDKONZEPT

Das in [1] vorgeschlagene Modell beschreibt den kompletten Entwicklungsprozess von der Anforderungsdefinition bis hin zur Verifikation und Validierung des Funktionsmusters. Dabei ermöglicht dieses definierte Vorgehen eine bessere

Planung, da wichtige Entwicklungsschritte nicht mehr vergessen werden können. Dies führt letztlich zu einem sehr viel realistischeren Zeitplan.

In Abbildung 1 ist die überarbeitete Version des Modells dargestellt. Die Aufgabenbereiche „Spezifikation und Detaillierung“ auf der einen Seite stehen der „Realisierung und Integration“ auf der anderen Seite gegenüber. Die vertikale Richtung beschreibt dabei die Umsetzung von der Idee bis hin zur Realisierung. Mit jeder weiteren Stufe steigt der Grad der Spezifikation. Hierbei wird immer genauer festgelegt, wie die Umsetzung aussehen soll, bis es zur Verifikation und Validierung eines Funktionsmusters kommt. Außerdem zeigen die horizontalen Verbindungen die logischen Abhängigkeiten, um die existierende Realisierung des rechten Zweiges gegen die Spezifikation des linken Zweiges zu prüfen. Eine umfassende Beschreibung einzelnen Entwicklungsphasen findet sich in [1].

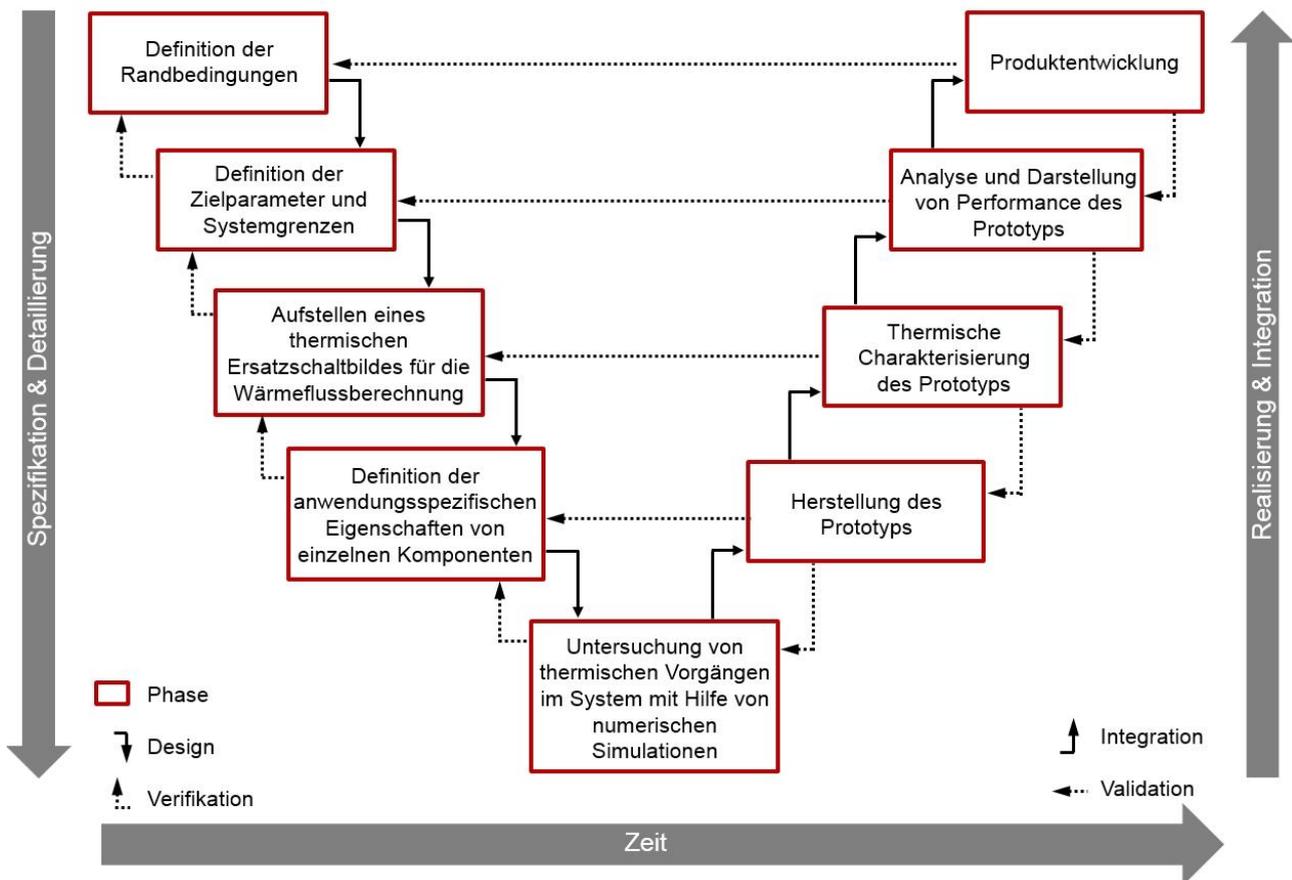


Abbildung 1: V-Modell zur Entwicklung eines optimalen Entwärmungs-Konzeptes von LED-Beleuchtungssystemen

Aufgrund der Komplexität von LED-Beleuchtungsmodulen ist ihre Modellierung nur näherungsweise möglich. Dabei steigt der Rechenaufwand mit der Detailgenauigkeit überproportional an. Deshalb wird in diesem Beitrag gezeigt, inwiefern mit vergleichsweise geringem Detaillierungsgrad auf Basis des oben vorgestellten V-Modells eine Auslegung eines optimalen Entwärmungs-Konzeptes am konkreten Beispiel einer Standleuchte durchgeführt werden kann. Dabei handelt es sich um eine LED-Leuchte mit dem Namen CubeSpot, die im Rahmen des ZAFH-Projektes LED-OASYS in einen Ausstellungsraum eingebaut und der Öffentlichkeit vorgestellt wird.

3. ANWENDUNGSBEISPIEL

Der CubeSpot ist eine Standleuchte für den Inneneinsatz, die mit einer hochwertigen, zielgerichteten Optik ausgestattet ist, welche durch den Kühlkörper gehalten wird (Abbildung 2). Ein Magnetkugelgelenk lässt die flexible Positionierung des Leuchtenkopfes zu. Ein massiver Ständer hält durch einen schweren Fuß die Leuchte senkrecht.

Der CubeSpot soll zeigen, wie eine Lichtformung und das Thermomanagement auf kleinem Raum realisiert werden können. Dabei erfolgt eine gestalterische und technische Trennung von optischen und thermischen Komponenten. Hierbei wird die verwendete Optik im Rahmen einer Partnerarbeit des ZAFH-Projektes ausgelegt.

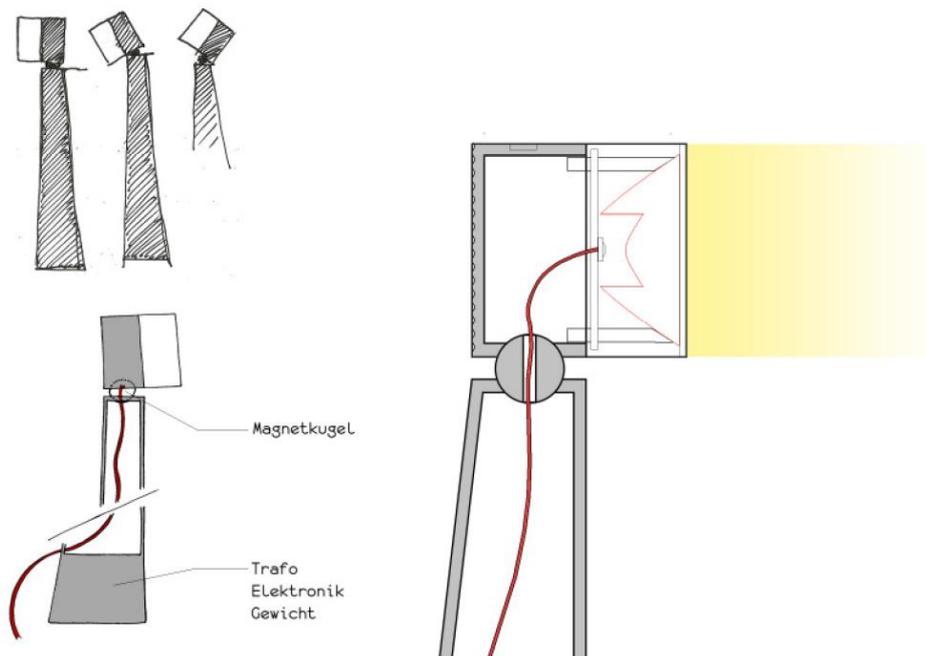


Abbildung 2: CubeSpot - Standleuchte für den Inneneinsatz

3.1. SYSTEMENTWURF

Ausgehend von Randbedingungen und Anforderungen umfasst der Systementwurf vor allem das thermische Management des Beleuchtungssystems. Es optimiert den Abtransport der Wärme, indem geeignete Materialien und Aufbautechniken verwendet werden. Nachdem das thermische Ersatzschaltbild für die Wärmeflussberechnung aufgestellt wird, werden die anwendungsspezifischen Eigenschaften von einzelnen System-Komponenten bestimmt. Im Anschluss erfolgt die Beurteilung von thermischen Vorgängen im entwickelten System mit Hilfe von thermischen Simulationen. Dabei entsprechen die folgenden Unterkapitel der einzelnen Phasen des oben vorgestellten V-Modells.

Definition der Randbedingungen

Zu den wichtigsten physikalischen Einflussfaktoren, die die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von LEDs beeinflussen, gehören unter anderem Temperatur, Feuchtigkeit, Strom und Spannung, mechanische Kräfte, Chemikalien und einwirkende Strahlung. Diese können dabei direkt zu einem Totalausfall führen oder langfristig das Alterungsverhalten der LED beeinflussen. Um dies zu vermeiden,

müssen der Einsatzbereich des Beleuchtungsmoduls und somit die Einflussfaktoren bereits in der ersten Phase der Entwicklung möglichst genau definiert werden.

Hierbei handelt es sich lediglich um eine Leuchte für den reinen Inneneinsatz. Die Umgebungstemperatur liegt dabei im Bereich von $+10\text{ °C}$ bis $+30\text{ °C}$. Bei der Auslegung des CubeSpots müssen keine Expositions- und Feuchtigkeits-Klassen berücksichtigt werden. Außerdem können dabei die Auswirkungen der Einflussfaktoren, wie Chemikalien und einwirkende Strahlung, vernachlässigt werden. Der Inneneinsatz im Wohnraum bedingt dagegen ein passiv luftgekühltes System, um Geräusche während des Betriebs zu vermeiden. Dabei soll es möglich sein, die vorhandene am Kühlkörper befestigte Optik durch eine andere schnell auszutauschen.

Im Vorfeld dieser Arbeit wurde bereits eine LED vom Typ XLamp XM-L2 des Herstellers Cree als Lichtquelle definiert [2]. Diese LED kann speziell nach Farbtemperatur und Farbwiedergabe gebinnt werden und zeichnet sich sowohl durch eine kleine Dimension als auch ausreichend hohen Lichtstrom aus. Der thermische Widerstand zwischen aktiver Zone dieser LED und thermischem Anschlusspad ist vom Hersteller mit $2,5\text{ K/W}$ angegeben [2].

Außerdem soll in diesem Beitrag lediglich der Leuchtenkopf behandelt werden. Da die elektrischen Vorschaltgeräte für die LED-Leuchte sich im massiven Ständer befinden sollen, werden diese nicht weiter berücksichtigt. Ansonsten sollten diese als zusätzliche Wärmequelle bei der Entwicklung des Entwärmungs-Konzeptes betrachtet werden.

Definition der Zielparameter und Systemgrenzen

Beim Design des Leuchtengehäuses wurde darauf geachtet, dass der Leuchtenkopf die Maße und die Geometrie eines Würfels mit der Kantenlänge von 50 mm nicht überschreitet (Abbildung 2). Da die Geometrie durch die Optik ($50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 18\text{ mm}$) vorgegeben wurde, soll eine entsprechend kleine Leuchte realisiert werden, was erhöhte Anforderungen an das Thermomanagement stellt. Hierbei wird in erster Linie eine kompakte, robuste und möglichst kostengünstige Lösung für ein effizientes Thermomanagement angestrebt.

Die Aufgabe ist es zunächst, eine in Wärme umgesetzte Verlustleistung von $P_V = 4,6\text{ W}$ so gut abzutransportieren, dass an der aktiven Zone der LED eine möglichst geringe Temperatur herrscht, die 125 °C nicht übersteigt. Diese Verlustleistung ergibt sich beim Betrieb der Leuchtdiode mit einer Stromstärke von 1500 mA . Die Maximaltemperatur für die aktive Zone der XLamp XM-L2 ist hier mit 125 °C definiert, damit der Lichtstromrückgang gegenüber $T_J = 85\text{ °C}$ von mindestens 90% gewährleistet wird [2]. Hierbei müssen außerdem die Toleranzen hinsichtlich des Lichtstroms und der Leistung berücksichtigt werden, die vom Hersteller auf $\pm 7\%$ begrenzt sind.

Aus Gründen des Designs- und der Herstellungsmöglichkeiten, werden der Kühlkörper und der Standfuß aus Aluminium gefertigt werden. Da der Kühlkörper gleichzeitig auch als Gehäuse fungiert, soll seine Oberflächentemperatur 51 °C nicht übersteigen, damit der Benutzer die Möglichkeit hat, den Leuchtenkopf zur Ausrichtung anzufassen (Kontaktdauer bis zu 1 Minute) [3]. Daraus kann der Streubereich für diesen Zielparameter in Form eines Mittelwertes von 51 °C und

einer Abweichung von $\pm 5\%$ definiert werden. Diese Abweichung ist auf die Unterschiede des menschlichen Temperaturempfindens und der Schmerzempfindung zurückzuführen. Da die Temperatur des Kühlkörpers nicht einheitlich ist, wird in diesem Zusammenhang von einer mittleren Oberflächentemperatur des Kühlkörpers gesprochen.

Aufstellen eines thermischen Ersatzschaltbildes für die Wärmeflussberechnung

Zur Untersuchung von thermischen Vorgängen im LED-Beleuchtungsmodul ist es notwendig ein möglichst realitätsnahes Modell zu erstellen. Da bei der Modellierung der Rechenaufwand mit der Detailgenauigkeit überproportional ansteigt, soll das Modell so einfach wie möglich sein und dennoch erlauben, die Bauteile der thermischen Baugruppe auf ihre thermischen Eigenschaften zu untersuchen.

Grundsätzlich lassen sich die Wärmetransportvorgänge analog zur Elektrotechnik als thermische Netzwerke von Kapazitäten, Widerständen und Quellen darstellen, für die auch die Kirchhoff'schen Regeln gelten. Ein anschauliches Hilfsmittel zur Beschreibung des Wärmetransportes im System ist ein thermisches Ersatzschaltbild.

Das thermische Ersatzschaltbild für das betrachtete Leuchtenbeispiel wird im Folgenden in Anlehnung an die thermischen Baugruppen aufgebaut. Der betrachtete Leuchtenkopf des CubeSpots besteht aus einer LED, einem Schaltungsträger, dem Kühlkörper und der Optik. Damit der Detaillierungsgrad vergleichsweise gering bleibt, wird für die Beschreibung des Wärmeflusses davon ausgegangen, dass dieser eindimensional ist.

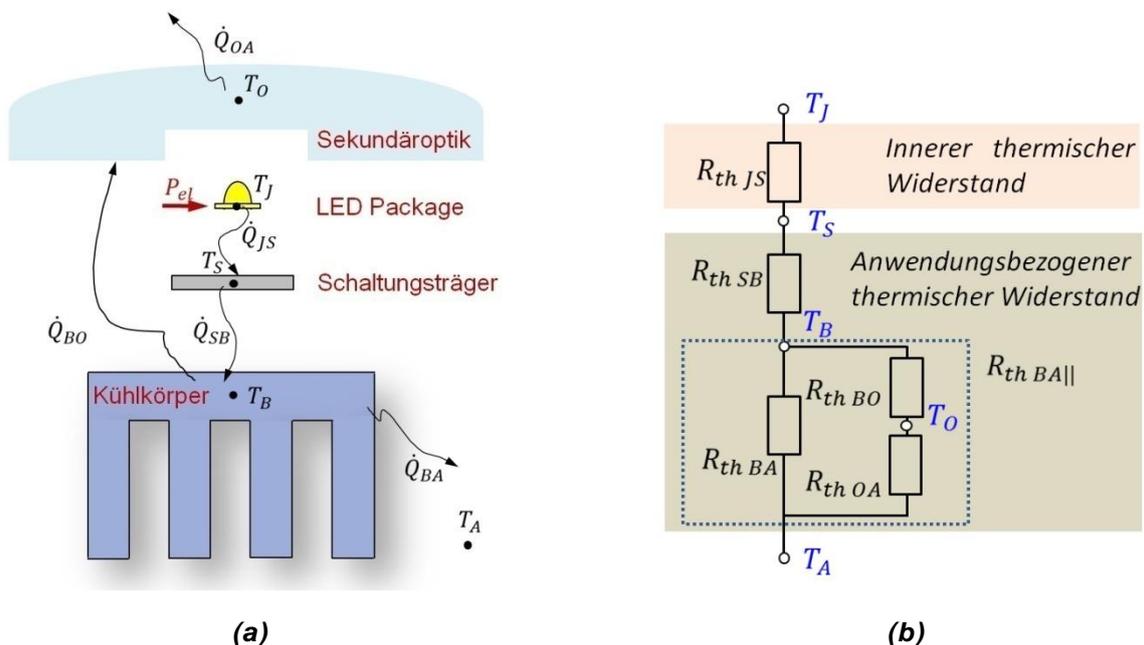


Abbildung 3: (a) Wärmetransport von der Sperrschicht (J) zur Umgebung (A) im CubeSpot; (b) Thermisches Ersatzschaltbild

In Abhängigkeit vom eingepprägten Strom und der dazugehörenden Spannung wird eine Verlustleistung im CubeSpot erzeugt, die gröÙtenteils in Wärme umgesetzt wird. Hierbei wird diese von der aktiven Zone der LED zuerst an den Schaltungsträger geleitet und von dort über den Kühlkörper und die Optik durch Konvektion und Wärmestrahlung an die Umgebung abtransportiert (Abbildung 3 (a)).

Diese anfallende Wärme führt zu einer Temperaturänderung an der aktiven Zone der LED, wobei die Höhe der Verlustleistung proportional zur Änderung der Sperrschichttemperatur ist. Der Proportionalitätsfaktor ist dabei der gesamte thermische Widerstand $R_{th JA}$, der den Wärmetransport von der Sperrschicht (J) zur Umgebung (A) beschreibt. Er setzt sich aus dem inneren thermischen Widerstand der LED $R_{th JS}$ und einem anwendungsbezogenem thermischem Widerstand $R_{th CA}$ zusammen (Abbildung 3 (b)). Der Entwärmungspfad $R_{th CA}$ besteht hierbei aus zwei Teilpfaden. $R_{th BA}$ beschreibt den Pfad vom Schaltungsträger über den Kühlkörper zur Umgebung, während $R_{th BA||}$ den Pfad über die Sekundäroptik zur Umgebung berücksichtigt. Da Sekundäroptiken meist aus Materialien im Vergleich zu metallischen Kühlkörpern mit geringerer Wärmeleitfähigkeit hergestellt sind, erfolgt über $R_{th BA||}$ nur eine geringe Wärmeableitung. Dieser Entwärmungspfad kann daher im thermischen Ersatzschaltbild vernachlässigt werden.

Mit Hilfe dieser Vereinfachung bleibt schließlich nur noch ein thermischer Pfad übrig. Die Wärme wird von der Sperrschicht der LED über den Schaltungsträger und den Kühlkörper an die Umgebung abgegeben. Das vereinfachte thermische Ersatzschaltbild sieht wie folgt aus:

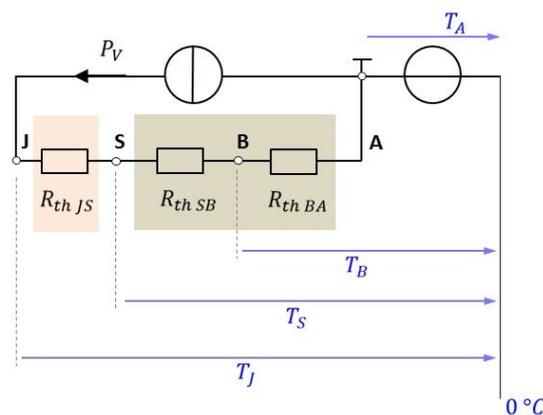


Abbildung 4: Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild des CubeSpots

Die Temperaturen T_J , T_S , T_K und T_A sind Absolutwerte. Hierbei ist unter der Bezeichnung „Umgebungstemperatur“ T_A nicht die Temperaturverteilung im Raum sondern die in der Umgebung des Kühlkörpers gemeint. Diese wird in Abbildung 4 durch eine Spannungsquelle eingestellt. Damit kann in einer Simulationsrechnung eine Temperaturänderung des Kühlmediums berücksichtigt werden.

Außerdem treten am physikalischen Modell zwischen den einzelnen Bauteilen thermische Kontaktwiderstände $R_{th K}$ auf. Aufgrund der Herstellungs-Beschränkungen, wie zum Beispiel Oberflächen-Rauheit, -Ebenheit und Anpressdruck, entstehen kleine Luftzwischenräume an den Kontaktstellen, die den Wärmeübergang zwischen einzelnen Bauteilen behindern [1, 4]. Deshalb müssen diese Kontaktwiderstände auch im Ersatzschaltbild berücksichtigt werden. Im betrachteten Leuchtenbeispiel treten sie an Kontaktstellen zwischen der LED und

dem Schaltungsträger, $R_{th K1}$, und zwischen dem Schaltungsträger und dem Kühlkörper, $R_{th K2}$, auf.

Im CubeSpot sind die einzelnen Schichten aneinander gebracht und somit sind die thermischen Widerstände hintereinander gereiht. Der gesamte thermische Widerstand dieses Ersatzmodells $R_{th JA}$ berechnet sich deshalb aus der Summe der thermischen Einzelwiderstände:

$$R_{th JA} = R_{th JS} + R_{th K1} + R_{th SB} + R_{th K2} + R_{th BA}$$

Um einen Sicherheitsfaktor zu erhalten, wird als Verlustleistung zunächst die gesamte in die LED elektrisch eingespeiste Leistung angenommen, das heißt, dass die Auskopplung in Form von optischer Leistung zunächst nicht berücksichtigt wird (optischer Wirkungsgrad $\eta_{opt} = 0$, $P_V = P_{ei}$). Mit der Berücksichtigung der Leistungstoleranz der LED lässt sich der maximal zulässige thermische Gesamtwiderstand des Entwärmungs-Konzeptes für den CubeSpot zu $19,4 \text{ K/W}$ berechnen.

Definition der anwendungsspezifischen Eigenschaften von einzelnen Komponenten

Da der innere thermische Widerstand $R_{th JS}$ durch das Design der LED vorgegeben ist, wird zum Erreichen einer guten Wärmeabfuhr im CubeSpot besonderer Wert auf die Reduzierung der thermischen Widerstände des Schaltungsträgers selbst, $R_{th SB}$, und dessen thermische Anbindung an die Umgebung, $R_{th BA}$, gelegt. Diese sind vom Aufbau und der Fertigung der Bauelemente abhängig.

Da im betrachteten Anwendungs-Beispiel eine hohe Verlustleistung von der Sperrschicht der LED an die Umgebung abtransportiert werden soll, wird eine Metallkern-Platine als Schaltungsträger für die eingesetzte Keramikboard-LED verwendet. Eine weitere Möglichkeit bestand jedoch im Einsatz eines glasfaserverstärkten Basismaterials auf Epoxidharzbasis (FR4) mit thermischen Durchkontaktierungen [1]. Dabei stellen thermische Durchkontaktierungen (Vias) grundsätzlich eine kostengünstige Möglichkeit zur Wärmeableitung dar, weil die Bohrungen im Standard-Prozess realisiert werden können. Da ein Via alleine nicht sehr viel Wärme leiten kann, sollten mehrere Vias eng aneinander platziert werden. Außerdem sollten die Durchgangslöcher zur weiteren Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit möglichst nahe an der Wärmesenke der LED liegen. Somit ist die optimale Auslegung eines Vias-Konzeptes aus technischer Sicht immer eine maßgeschneiderte Lösung und hängt stark von der LED und dem zu Verfügung stehenden Platz ab. Zwar stellt der Einsatz einer FR4-Platine mit thermischen Vias für die Serienproduktion eine kostengünstigere Lösung dar, dennoch ist ihr Einsatz für den Prototypbau nur aufwendig umsetzbar.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde aus technischer Sicht eine bereits auf dem Markt erhältliche Metallkern-Platine für die Realisierung des ersten Funktionsmusters gewählt, obwohl für die betrachtete LED-Leuchte die Möglichkeit der Wärmeabfuhr mit einer FR4-Platine mit thermischen Vias genauso gut geeignet ist. Bei der Auswahl einer geeigneten Metallkern -Leiterplatte wurde darauf geachtet, dass die Isolationsschicht einen möglichst geringen thermischen Widerstand hat und dass eine gute Anbindung von der Layout-Lage an den Metallträger vorhanden ist. Die

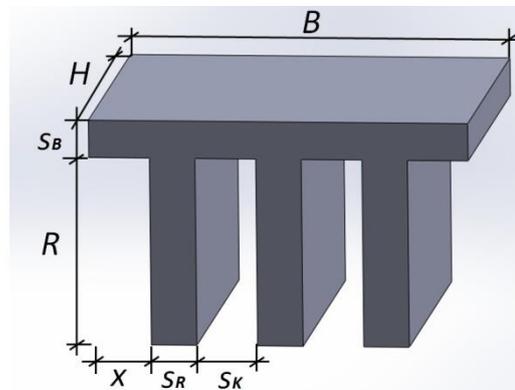
gestellten Anforderungen erfüllt am besten die Metallkern-Platine des Herstellers intl-outdoor (Abbildung 5 (a)).

Für die betrachtete LED-Anwendung mit einer hohen Verlustleistung ist die Entwärmung mittels Kühlkörper unerlässlich. Nach der Aufstellung der thermischen Kriterien, der Berechnung des Wärmewiderstandes und unter Berücksichtigung der Einbausituation und des zur Verfügung stehenden Bauraums, erfolgt nun die Auswahl eines geeigneten Kühlkörpers. Um die Größenordnung von dessen thermischem Widerstand abzuschätzen, wurde zunächst ein vereinfachter Rippenkühlkörper aus Aluminium betrachtet. Die Geometrie des Kühlkörpers mit der Grundfläche $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ist in Abbildung 5 (b) dargestellt. Der thermische Widerstand des Kühlkörpers ist neben der Wärmeleitfähigkeit des Kühlkörper-Materials vom Wärmeübergangskoeffizienten an das umströmende Fluid abhängig. Aufgrund der hohen thermischen Leitfähigkeit des Aluminiums liegt der thermische Widerstand des Kühlkörpers bei ca. $0,15\text{ K/W}$, wobei der thermische Widerstand bei freier Konvektion von Luft sich zu weniger als 10 K/W berechnen lässt.



(a)

$B = 50\text{ mm}$
 $H = 50\text{ mm}$
 $s_B = 5\text{ mm}$
 $R = 25\text{ mm}$
 $x = 8\text{ mm}$
 $s_R = 6\text{ mm}$
 $s_K = 8\text{ mm}$



(b)

Abbildung 5: (a) Verwendete Metallkern-Platine; (b) vereinfachter Rippenkühlkörper aus Aluminium

Die Größenordnung des thermischen Widerstands beim Wärmeübergang von Kühlkörper zur Umgebung bei freier Konvektion macht deutlich, dass für das zu entwickelnde LED-Modul auf diese Möglichkeit der Wärmeabfuhr zurückgegriffen werden kann.

Untersuchung von thermischen Vorgängen im System mit Hilfe von numerischen Simulationen

Mit Hilfe von thermischen Simulationen sollen nun die thermischen Vorgänge im entwickelten System berücksichtigt werden. Dafür wird das oben beschriebene thermische Modell des CubeSpots mit der entsprechender Optik dreidimensional aufgebaut.

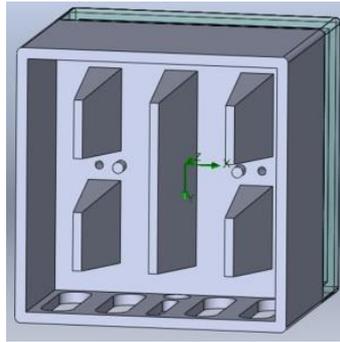


Abbildung 6: Kühlkörper des CubeSpots

Vorab wurde jedoch der Kühlkörper an die gestellten Aufgaben optimiert. Dabei wurde insbesondere die Geometrie eines geschlossenen Würfels angestrebt. Da die Luft die Wärme an die Umgebung verteilt, in einem geschlossenen Raum die Temperatur des Kühlmediums an. Dies führt letztendlich zur Steigerung der Temperatur der Sperrschicht und der Gehäuseoberfläche. Damit diese Temperaturen nicht unzulässig ansteigen, muss für einen ausreichenden Luftaustausch gesorgt werden. Dies ist in einem geschlossenen passiv luftgekühlten System des CubeSpots kostengünstig nicht möglich. Obwohl es negativ in die Bewertung des CubeSpot-Prototyps einfließen wird, wurde zur Begünstigung des Luftaustauschs die hintere Wand des Cubes entfernt (Abbildung 6).

Anschließend werden für jede Komponente des Modells Materialien und Oberflächen definiert und damit deren thermische Eigenschaften vorgegeben. Die Einrichtung der Umgebung des Modells geschieht über die Angabe von Einflussgrößen wie beispielsweise Umgebungstemperatur und Art des Fluides in der Umgebung.

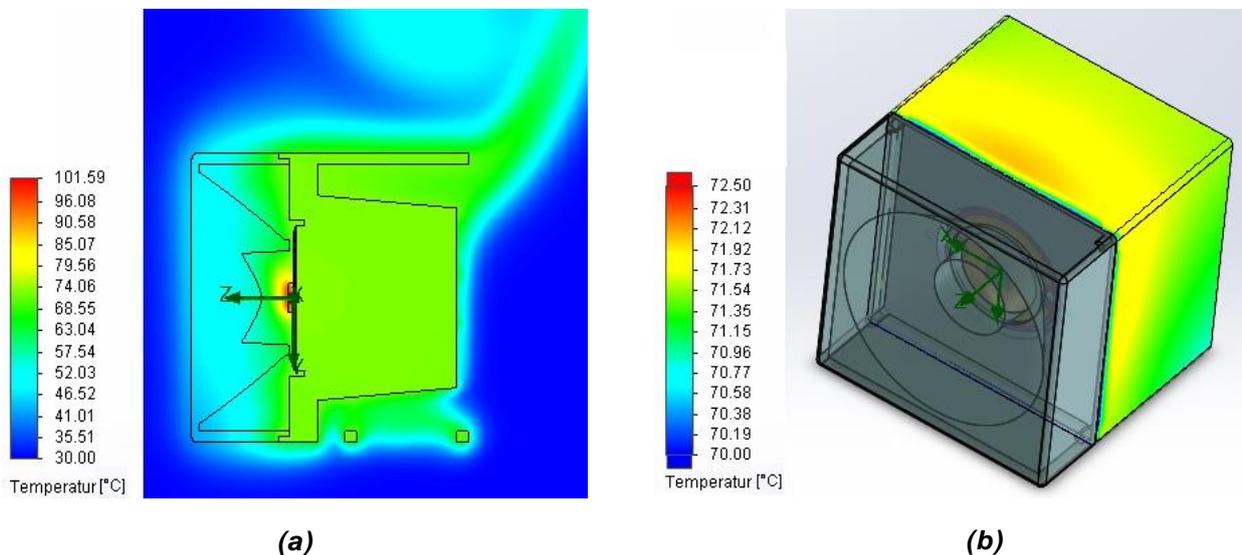


Abbildung 7: Grafische Darstellung der Simulationsergebnisse im Worst-Case ($P_V = 4,9\text{ W}$, $T_U = 30\text{ °C}$): (a) Festkörpertemperatur (Querschnitt-Darstellung); (b) Oberflächen-Temperatur

Die Ergebnisse der thermischen Simulation mit einer um 7% erhöhten Verlustleistung und einer höchst zulässigen Umgebungstemperatur von 30 °C sind in Abbildung 7 (a) als Temperaturverteilung gezeigt. In diesem Worst-Case Szenario lässt sich eine Temperatur am LED-Chip im Mittel von 93,2 °C und für das

Maximum von $101,6\text{ °C}$ erwarten. Diese liegen unterhalb des definierten Zielparameters: Maximaltemperatur von 125 °C . Die Grafik in Abbildung 7 (b) stellt die simulierte Temperaturverteilung an der Oberfläche des Kühlkörpers dar. Dabei lässt sich eine Temperatur an der Gehäuseoberfläche im Mittel von $70,5\text{ °C}$ und für das Maximum von $72,0\text{ °C}$ erwarten. Diese liegt nun deutlich oberhalb des gewünschten Zielwerts von 51 °C .

Hierbei muss erwähnt werden, dass beim Systementwurf der Anteil der emittierten optischen Energie bis jetzt vernachlässigt wurde. Der optische Wirkungsgrad liegt typischerweise bei ca. $15\% - 30\%$ der an die LED zugefügten elektrischen Leistung. Außerdem fand bei der hier durchgeführten thermischen Simulation der Wärmetransport lediglich über die Wärmeleitung und die Konvektion statt (keine Wärmestrahlung). Daher lässt sich in der Realität eine deutlich geringere Temperatur am LED-Chip und an der Gehäuseoberfläche im Vergleich zu den simulativ ermittelten Temperaturwerten erwarten. Diese Annahme ließ sich schnell mit Hilfe von weiteren thermischen Simulationen überprüfen. Mit der Berücksichtigung von einem optischen Wirkungsgrad von 20% und der Wärmestrahlung am Kühlkörper mit einem Emissionskoeffizient für unbearbeitetes Aluminium von $0,68$ [5] verringert sich die Maximaltemperatur am LED-Chip auf $88,1\text{ °C}$ und die mittlere Oberflächen-Temperatur auf $52,4\text{ °C}$. Die Oberflächen-Temperatur liegt nun im definierten Streubereich des Zielparameters: von $48,5\text{ °C}$ bis $53,6\text{ °C}$.

3.2. REALISIERUNG

Nachdem das Funktionsmuster aufgebaut und in Betrieb genommen wurde, sollen seine elektrischen, thermischen und optischen Eigenschaften untersucht werden. Im Anschluss folgt die Analyse und Darstellung von Performance des Prototyps. Zur Einordnung der ermittelten Größen werden diese zu den gestellten Zielparametern bezogen und das weitere Entwicklungspotenzial aufgezeigt. Dabei entsprechen die folgenden Unterkapitel der einzelnen Phasen des oben vorgestellten V-Modells.

Herstellung des Prototyps

Ähnlich den konventionellen Leuchtmodulen werden die Frühausfälle und die Spontanausfälle der LED-Leuchten häufig durch fehlerhafte Materialien, Abweichungen im Herstellungsprozess oder durch falsche Handhabung von Einzelkomponenten generiert. Die Auswirkungen dieser Faktoren beeinflussen stark die Qualität und Lebensdauer der LED-Systeme. Dennoch gibt es zwischen der theoretisch gewünschten idealen Form eines bestimmten Bauelementes und der in der Praxis umsetzbaren tatsächlichen Form in der Regel Unterschiede. Diese können zum einen im Produktionsprozess begründet sein, aber auch durch Messungenauigkeiten entstehen. Hierbei trägt eine Toleranz bezüglich verschiedener Maße dazu bei, trotz dieser Unterschiede praxistaugliche Bauteile herzustellen. Die Toleranz sollte dabei so gewählt werden, dass die Herstellung einerseits kostengünstig bleibt, zum anderen das Bauteil seine mechanische und thermische Aufgaben trotz der geringen Abweichungen von den Idealmaßen vollumfänglich erfüllen kann.

Neben den Toleranzen, die für das Erfüllen der Bauteilfunktion wichtig sind, spielen die Rauheitstoleranzen eine entscheidende Rolle bei der technischen Umsetzung des bereits ausgelegten Entwärmungs-Konzeptes. Die dadurch an den

Kontaktstellen entstandenen kleinen Luftzwischenräume behindern den Wärmetransport in LED-Beleuchtungssystemen. In Folge dessen ist es bereits bei der Auslegung geeigneter Entwärmungs-Konzepte wichtig, Engpässe im thermischen Pfad so früh wie möglich zu analysieren und diese wärmetechnisch zu optimieren.

Dennoch kann es durch verschiedene Umstände dazu kommen, dass die ausgelegten Bauelemente des LED-Beleuchtungssystems nicht mit der gewünschten Genauigkeit hergestellt werden können. In diesem Fall müssen die dadurch bewirkten Änderungen im Wärmetransport untersucht und gegebenenfalls optimiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit gebührt besondere Aufmerksamkeit dem thermischen Kontaktwiderstand der LED-Anbindung. Dieser ist im Allgemeinen durch die thermische Leitfähigkeit des Anbindungsmaterials, sowie dessen Dicke bestimmt. Für ein effektives thermisches Management kann die Anbindung des LED-Chips an den Schaltungsträger mit Hilfe von Lot erfolgen. Hierbei wurde neben einem niedrigen und homogenen thermischen Widerstand der Lötverbindung auch eine Reduktion von Reflowfehler wie Solderballs und Voids angestrebt [6]. Diese verschärfen das Problem der lokal eingeschränkten Wärmeabfuhr bei LEDs und reduzieren somit die Festigkeit von Lötstellen und elektrische Belastbarkeit von LEDs.

Weiteres Potenzial zur Verringerung des thermischen Gesamtwiderstandes liegt im optimalen Übergang der Wärme vom Schaltungsträger auf den Kühlkörper. Dafür ist insbesondere eine möglichst große Kontaktfläche erforderlich. Je größer jedoch die Fläche ist, desto geringer ist auch der Kontakt durch konvexe, konkave oder wellenartige Unebenheiten der realen Kontaktflächen. Diese können neben den herstellungsbedingten Prozessen auch durch maschinelle Bearbeitung, Gebrauch und/oder Verschleiß entstehen. Eine genaue Angabe der Höhe des tatsächlichen thermischen Kontaktwiderstandes sowohl ihre experimentelle Ermittlung ist in der Regel äußerst schwierig. Einen Überblick über mögliche Maßnahmen zur Verringerung des thermischen Gesamtwiderstandes verschafft beispielweise [1].

Thermische Charakterisierung des Prototyps

Nach den oben erwähnten Vorgaben wurde ein Prototyp des CubeSpots gebaut. Mit diesem soll überprüft werden, ob die thermischen Vorüberlegungen und Berechnungen mit der Messung übereinstimmen. Hierbei können unter anderem die Änderungen und Abweichungen vom definierten Herstellungsprozess festgestellt werden, die durch unvorhergesehe Maßnahmen hervorgerufen wurden und aus diesem Grund bei der Auslegung des Entwärmungs-Konzeptes nicht berücksichtigt werden konnten.

Zunächst soll die Sperrschichttemperatur bei einer LED ermittelt. Diese lässt sich allerdings schwer messen, ohne den thermischen Pfad deutlich zu verändern oder von einem Messpunkt rückrechnen zu müssen. Aus diesem Grund wurde die Temperatur indirekt über die Messung der Vorwärtsspannung bestimmt, deren Temperaturabhängigkeit sich ausnutzen lässt. Eine Messung zur Bestimmung dieser Abhängigkeit ist in Abbildung 8 zu sehen.

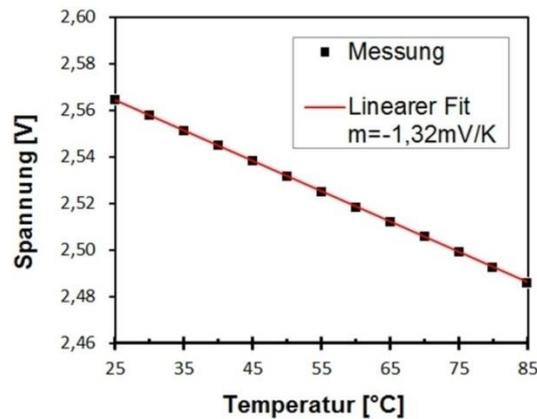


Abbildung 8: Gemessen Vorwärtsspannung einer weißen Cree XM-L2 LED bei einem Strom von 10 mA. Die Vorwärtsspannung verringert sich linear mit einer Steigung von $m = 1,32 \text{ mV/K}$.

Die thermischen Messungen bei der Raumtemperatur von $25,5 \text{ °C}$ haben eine Temperatur des LED-Chips von $82,6 \text{ °C}$ beim Betrieb mit der Stromstärke von 1500 mA ergeben. Der thermische Gesamtwiderstand des Entwärmungs-Konzeptes für den CubeSpot ergab sich hierbei zu $17,1 \text{ K/W}$. Somit kann ein zuverlässiger Betrieb des Moduls über mehrere tausend Stunden erfolgen.

Außerdem wurde der Anteil der emittierten optischen Energie messtechnisch bestimmt. Mit einem goniometrischen Verfahren wurde ein Lichtstrom von 455 lm beim Betrieb mit der Stromstärke von 1500 mA bei einer Raumtemperatur von $25,5 \text{ °C}$ gemessen. Somit lässt sich unter Berücksichtigung der Spektralverteilung der LED ein optischer Wirkungsgrad von 32% ermitteln. Hierbei ergab eine Kontaktmessung eine maximale Oberflächentemperatur des Kühlkörpers von 47 °C .

Analyse und Darstellung von Performance des Prototyps

Nachdem die elektrischen, thermischen und optischen Eigenschaften des Prototyps ermittelt wurden, folgt die Analyse und Darstellung von Performance des Prototyps. Zur Einordnung der ermittelten Größen werden diese auf die gestellten Zielparameter bezogen und das Potenzial aufgezeigt. Eine Möglichkeit zur Darstellung von Performance-Mängeln des Prototyps mit mehreren, gleichwertigen Kategorien stellt das Spinnennetzdiagramm dar. Auf Basis visualisierter Soll-/Ist-Abweichungen in den planungsrelevanten Kenngrößen können bei der technischen Realisierung Abweichungen schnell erkannt und umgehend behandelt werden. Dabei soll das aufgebaute LED-Modul die erwarteten Eigenschaften weder unterschreiten noch übertreffen.

In Abbildung 9 ist ein solches Spinnennetzdiagramm für die Analyse und Bewertung des CubeSpot-Prototyps dargestellt. Es zeigt die jeweiligen Ausprägungen hinsichtlich der fünf Soll-Kriterien auf. Diese sind Geometrie, Verlustleistung, Sperrschichttemperatur, Oberflächentemperatur und technische Umsetzung des Entwärmungs-Konzeptes. Zur Bewertung der einzelnen Kriterien ist jedes Merkmal mit einer siebenstufigen Skala hinterlegt. Da bei der Entwicklung in erste Linie eine optimale Lösung für ein effizientes Thermomanagement angestrebt wurde, soll die Bewertung der einzelnen Kriterien die Note 5 „gut“ nicht übersteigt. Falls dagegen die Note 4 „vollbefriedigend“ für mindestens ein Kriterium nicht erreicht wird, soll das Entwärmungs-Konzept überarbeitet werden. Hierbei sollen zuerst die Ergebnisse der vorherigen Phase überprüft werden, da diese zugleich „der Input“ für diese Phase sind.

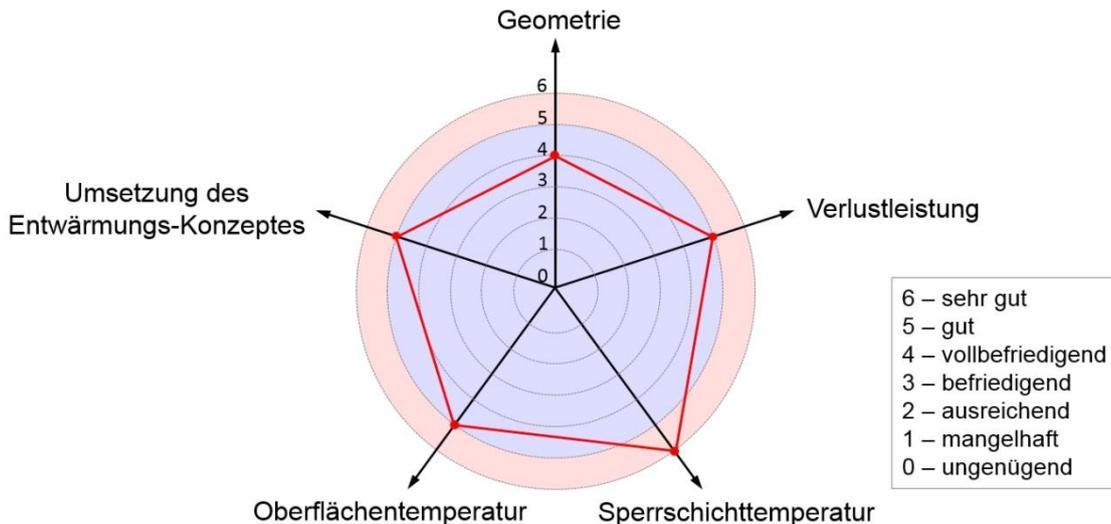


Abbildung 9: Spinnennetzdiagramm für die Analyse und Bewertung des CubeSpot-Prototyps

Abbildung 9 zeigt, wie ausgewogen das realisierte Funktionsmuster der Leuchte bezüglich der definierten Kriterien ist. Das thermische Verhalten des Prototyps macht deutlich, dass es mit den aufgezeigten Methoden erreicht werden kann, die LED-Leuchte bei definierten maximaler Verlustleistung mit Temperaturen unterhalb von 125 °C zu betreiben. Da dabei die maximale Oberflächentemperatur des Kühlkörpers den definierten Zielwert von 51 °C nicht übersteigt, hat der Benutzer die Möglichkeit den Leuchtenkopf zur Ausrichtung anzufassen (Kontaktdauer bis zu 1 Minute). So kann ein zuverlässiger Betrieb des Moduls über mehrere tausend Stunden erfolgen.

Allerdings wurde der Prototyp in Bezug auf das Kriterium „Sperrschichttemperatur“ mit Note 6 bewertet, da die gemessene Maximaltemperatur der aktiven Zone des LED-Chips deutlich unter dem definierten Zielwert von 125 °C liegt. Außerdem wurden bei der „Geometrie“-Bewertung Abstriche gemacht, da der Leuchtenkopf die Geometrie eines geschlossenen Würfels nicht aufweist.

Daraus ist ersichtlich, dass das weitere Entwicklungspotenzial der Leuchte in der Optimierung der Geometrie durch die Erhöhung der Sperrschichttemperatur besteht, da das aufgebaute Prototyp genau in diesem Punkt die Erwartungen übertroffen hat. Dies kann durch den Einsatz von weniger effektiven Materialien und Methoden im Entwärmungspfad geschehen. Die dazu notwendigen Anpassungen sollen in ein weiteres Funktionsmuster einfließen, bevor der CubeSpot weiter an die Produktentwicklung übergeben wird.

Produktentwicklung

Im Anschluss kann das entwickelte LED-Beleuchtungssystem in Serien von bis zu Millionen Stück gefertigt werden, falls es vom Hersteller erwünscht ist. Damit die nachfolgende Fertigung möglichst kostengünstig und reibungslos verläuft, soll die Prozessfähigkeit jedes einzelnen Entwicklungsschrittes zur Sicherstellung der Serienqualität nachgewiesen werden. Bei der Definition von Rahmenbedingungen für das Serienprodukt ist es ratsam, die maximal zulässigen Ausfallquoten mit zu definieren. Da das betrachtete Leuchtenbeispiel nicht in die Serienproduktion gehen soll, wird hier nicht näher darauf eingegangen.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Eine zeit- und kosteneffiziente Entwicklung eines optimalen Entwärmungskonzeptes von LED-Beleuchtungssystemen ist nur dann möglich, wenn sie von der Anforderungsdefinition bis zur Verifikation und Validierung eines Funktionsmusters systematisch vorgenommen wird. Dabei ist es gerade in diesem Umfeld wichtig, die verschiedenen Produktbestandteile, wie Mechanik, Optik und Elektronik, integriert zu betrachten. Eine hohe Zuverlässigkeit kann nur erreicht werden, wenn die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der einzelnen Bestandteile untereinander schon während der Entwicklung berücksichtigt werden. Diese Schritte wurden am konkreten Beispiel einer LED-Spotleuchte aufgezeigt.

LITERATUR

- [1] Tarbeyeuskaya, A., Herbold, C., Hornberg, A., Neumann, C., Schierz, C.: *Optimal thermal management of LED lighting systems regarding efficiency and cost*. In: Proc. of CIE Session 2013, France.
- [2] Cree, Inc.: *Product Family Data Sheet - Cree® XLamp® XM-L2 LEDs*.
- [3] Skiba, R.: *Taschenbuch Arbeitssicherheit*. Erich-Schmidt-Verlag, 2005, S. 466-468.
- [4] Savija, I., Culham, J. R., Yovanovich, M. M.: *Review of Thermal Conductance Models for Joints Incorporating Enhancement Materials*. In: Journal of Thermophysics and Heat Transfer 17 (1), 2003.
- [5] Kaplan, H.: *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*. In: SPIE Press, 2007.
- [6] Yunus, M., Srihari, K., Pitarresi, J. M., Primavera, A.: *Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints*. In: Microelectronics Reliability 43, 2003, S. 2077–2086.