

Auslegung eines vollfarbsteuerbaren High-Power-LED-Moduls

*Manfred Scholdt, André Domhardt, Simon Wendel, Uli Lemmer,
Lichttechnisches Institut, Universität Karlsruhe (TH),
Engesserstr. 13, D-76131 Karlsruhe*

Einführung

Auf Grund des verbesserten Lichtstroms heutiger High-Power-LEDs können LED-Module für die Allgemeinbeleuchtung genutzt werden. Da die LED grundlegende Unterschiede zu den klassischen Lampentypen wie Glüh- oder Gasentladungslampen aufweist, müssen beim Bau von LED-Modulen neue Gesichtspunkte beachtet werden. So kann z. B. direkt über den LED-Chip eine Primäroptik gesetzt werden. Mit dieser ist es möglich, das Licht der LED in eine gewünschte Richtung zu lenken. Bei RGB-LEDs folgen daraus jedoch Farbmischproblematiken, die gelöst werden müssen. Darüber hinaus besteht eine weitere Herausforderung in der Entwärmung der LEDs. LEDs emittieren keine Wärmestrahlung, daher muss die Wärme über die Leiterplatte abgeführt werden. Bei den hier verwendeten LEDs sind das ca. 87 % der elektrischen Eingangsleistung [1].

Entwurf der Primäroptik

Für das LED-Modul wurden RGB-LEDs verwendet. Dies ermöglicht dem LED-Modul verschiedene Betriebsmöglichkeiten. So kann mit einem Modul sowohl weißes als auch farbiges Licht erzeugt werden. Die Erzeugung des farbigen Lichts mit LEDs ist effizient, da die LEDs direkt Licht der gewünschten Farbe erzeugen, weshalb kein Farbfilter verwendet werden muss. Das weiße Licht entsteht aus einer Farbmischung der drei Primärfarben (Rot, Grün und Blau). Diese Farbmischung funktioniert im Freiraum (ohne Optik) sehr gut, wird aber problematisch, wenn das Licht der LED über eine Primäroptik verteilt wird. Diese Primäroptiken sind jedoch notwendig, um das Licht in einen bestimmten Raumwinkelbereich zu bündeln. So wurde in diesem Fall eine Optik maßgeschneidert [2], die das Licht in einen Winkel von 10° bündelt. Diese Optik ist in Abbildung 1(a) zu sehen. Die Dreiteilung der Optik erfolgte auf Grund der LED-Geometrie, bei der jede LED drei Chips enthält.

Nach der Entwicklung dieser Optik wurde die Lichtverteilung des LED-Moduls simuliert. Das Ergebnis zeigt, dass neben einer engen Bündelung des Lichts auch eine sehr gute Farbmischung realisiert werden konnte. Für die Lichtverteilung innerhalb eines Öffnungswinkels von 10° ist die Simulation sowohl in Echtfarben in Abbildung 1(b), als auch in den xy-Farborten des Farbdreiecks nach der CIE Norm DIN 5033 [3] in Abbildung 1(c) zu sehen.

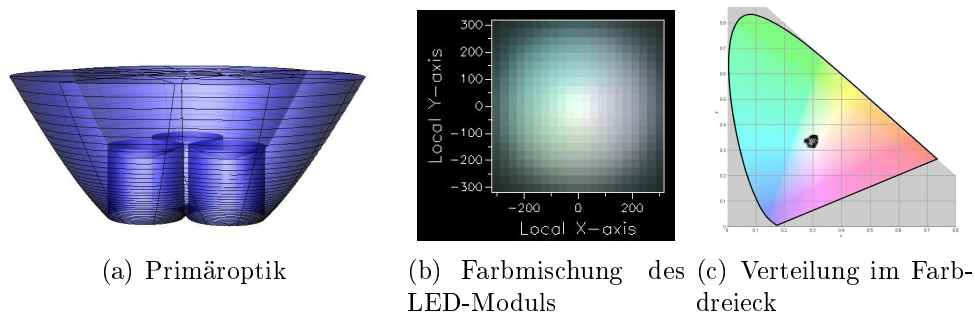


Abbildung 1: Simulation der LED-Platine mit der in a) gezeigten Primäroptik auf einer Empfängerfläche in einem Meter Entfernung. b) zeigt das Ergebnis in Echtfarben und c) die Verteilung im Farbdreieck.

Art der Entwärmung

Es gibt drei grundlegende Möglichkeiten ein LED-Modul zu entwärmen, über die bereits in der anfänglichen Auslegung entschieden werden muss.

1. Passive Kühlung über Kühlkörper
2. Aktive Kühlung über Kühlkörper mit Lüfter
3. Aktive Kühlung über Fluidkühlung (z.B. Wasserkühlung)

Die passive Kühlung erwies sich nach grober Übersichtsrechnung der hohen Verlustleistungsdichten von ca. 3 kW/m^2 als ungeeignet. Ebenso entfiel der aktiv gekühlte Kühlkörper direkt an der Leiterplatte auf Grund des geforderten Anforderungsprofils: Das LED-Modul soll auch bei hohen Umgebungstemperaturen von bis zu 120°C , wie sie beispielsweise in einer Sauna herrschen können, funktionieren. Da ein Kühlkörper jedoch nur gegen seine Umgebungstemperatur kühlen kann [4], würden sich die LEDs mindestens auf 120°C erwärmen. Wenn die LEDs bei diesen Temperaturen betrieben werden, verringert sich der Lichtstrom dieser LEDs um mehr als 70 % gegenüber dem Lichtstrom bei 25°C [1]. Ebenso verringert sich die Lebensdauer¹ der LEDs deutlich. Diese Problematik kann mithilfe von Kühlwasser umgangen werden. So entwärmt sich das LED-Modul gegen die Temperatur des Kühlwassers und kann somit deutlich unterhalb der Umgebungstemperatur betrieben werden. Die höhere Umgebungstemperatur kann dann als eine weitere Verlustleitung betrachtet werden, die über Konvektion auf der Leiterplatte abfällt. Die Entwärmung des Kühlwassers erfolgt schließlich außerhalb der Sauna gegen die Raumtemperatur der Umgebung.

Nach der Festlegung auf die Kühlungsart wurde nach der besten Möglichkeit gesucht, die Wasserkühlung mit der Leiterplatte zu verbinden. So wurde die Firma *SEAG* in das Projekt

¹Die Lebensdauer einer LED definiert sich über dem Zeitpunkt, an dem der Lichtstrom der LED im Vergleich zum Ausgangslichtstrom bei gleicher Temperatur auf 50 % abgefallen ist [5]. Da dieser Prozess kontinuierlich voranschreitet, bedeutet eine geringere Lebensdauer einen schnelleren altersbedingten Rückgang des Lichtstroms der LEDs.

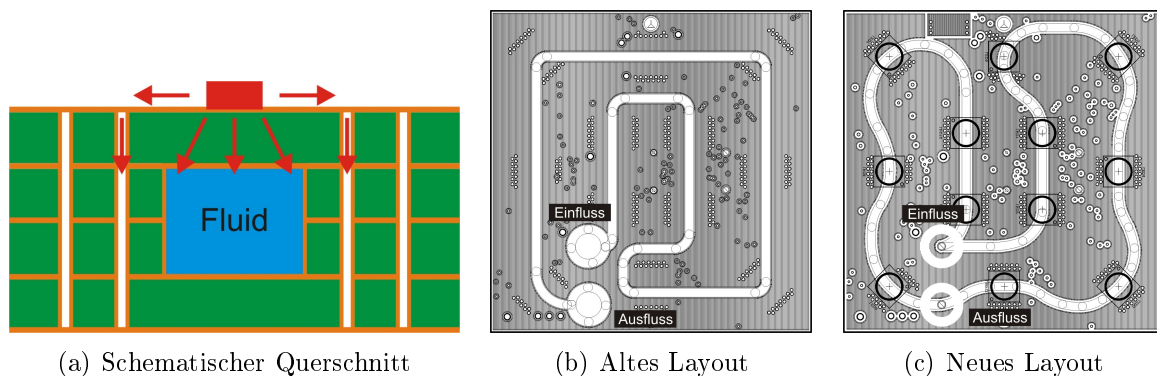


Abbildung 2: a) Zeigt schematisch den Kühlkanal im Querschnitt. b) und c) Das Layout des Kühlkanals in der Leiterplatte

eingebunden, die eine wassergekühlte Leiterplatte entwickelt habt, wie in Abbildung 2(a) zu sehen ist. Diese Leiterplatte enthält einen Wasserkanal mit einem Querschnitt von 2 mm x 2 mm, der in der Leiterplatte verläuft. Die Verlustwärme der LEDs wird über thermische Vias durch die isolierende FR4-Schicht geführt. In der Kanalebene befindet sich eine Kupferschicht, die für einen optimalen Wärmetransport zum Kühlwasser sorgt.

Der Leiterplattenhersteller gab nur den Schichtaufbau vor. Das Layout des Kühlkanals dagegen galt es zu optimieren. Hierbei wurde zunächst ein Kühlkanal entwickelt, der als ein Kühlkreis durch die Leiterplatte verlegt wurde. Dieser war so angeordnet, dass er unter jeder LED verläuft. Dieses Layout wurde jedoch verändert, um einen möglichst geringen hydraulischen Widerstand zu gewährleisten. Als Resultat dieser Überlegungen entstand ein Kanal, der aus zwei getrennte Kreise besteht, die auch möglichst lang gezogene Kurven enthalten. Die beiden Layouts sind in Abbildung 2 zu sehen.

Messung des Moduls

Nach diesen Vorgaben wurde ein Prototyp des fertigen LED-Moduls gebaut. Mit diesem wurde überprüft, ob die thermischen Vorüberlegungen und Berechnungen mit der Messung übereinstimmen. Die Leiterplatte wurde durch eine Standard CPU-Wasserkühlung der Firma

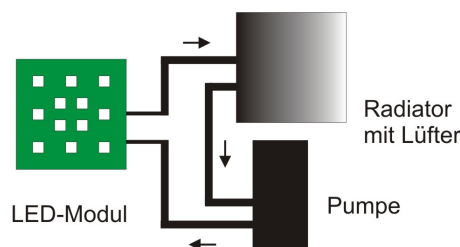


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Wasserkühlung

Innovatek gekühlt. Diese besteht aus einer Wasserpumpe, die einen kleinen Reservetank enthält, einem lüftergeköhlten Radiator und einem Wärmetauscher. Letzterer wurde jedoch nicht benötigt, da das Wasser direkt durch die Leiterplatte fließen soll. Der schematische Aufbau der Kühlung ist in Abbildung 3 zu sehen.

Mit dieser Kühlung wurden nun sowohl Messungen bei Raumtemperatur, als auch bei einer Umgebungstemperatur von ca. 125 °C durchgeführt. Diese Umgebungstemperatur wurde durch den Betrieb des Moduls in einem Laborofen der Firma *Memmert* realisiert. Der Radiator befand sich jedoch weiterhin außerhalb des Ofens und kühlte das Kühlwasser gegen die Raumtemperatur des Messraumes. Gemessen wurden jeweils die Umgebungstemperatur der Leiterplatte, die Raumtemperatur und die Wassertemperatur. Die Chiptemperatur wurde mithilfe des Rückganges des temperaturabhängigen Lichtstromes bestimmt. In Abbildung 4 sind die jeweiligen Temperaturkurven über der Zeit zu sehen, wobei bei der Messung bei Raumtemperatur die Außen- und die Umgebungstemperatur der Leiterplatte übereinstimmen.

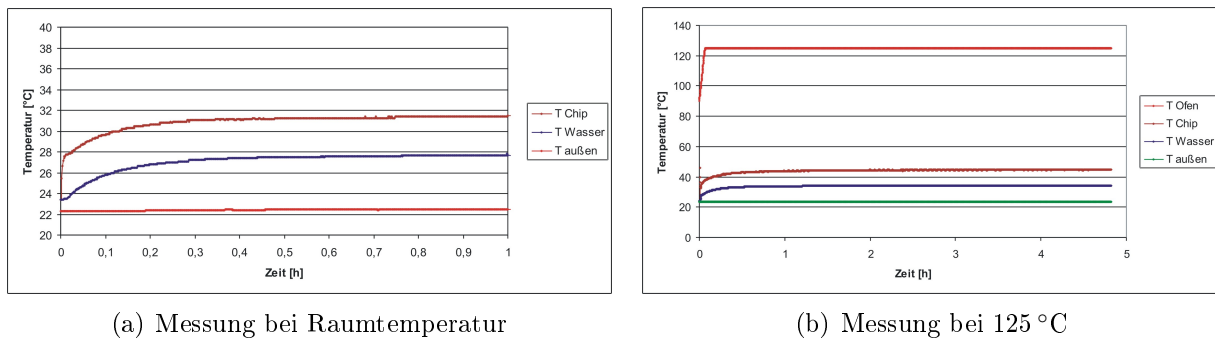


Abbildung 4: Temperaturmessungen des LED-Moduls

Bei der Messung bei Raumtemperatur ergab sich eine Chiptemperatur von ca. 33,2 °C. Mit einer gemessenen Wassertemperatur von 27,7 °C ergibt sich ein Temperaturunterschied zwischen Wasser- und Chiptemperatur von $\Delta T = 5,5$ °C.

Bei der Messung im Ofen erhöhte sich die Wassertemperatur auf 34,1 °C. Diese Erhöhung ist verständlich, da nun neben der elektrischen Verlustleistung auch noch die thermische Leistung der 125 °C Umgebungstemperatur als Verlustleistung vom Wasser abtransportiert werden muss. Diese zusätzliche Leistung wird jedoch vom gleichen Radiator über den Raum gekühlt, weshalb sich im Gleichgewicht das Wasser auf einer höheren Temperatur einpegelt. Die Chiptemperatur stabilisiert sich in diesem Fall bei 44,7 °C, woraus sich ein ΔT zwischen Wasser- und Chiptemperatur von 10,6 °C ergibt. Da die thermische Verlustleistung über Konvektion ins Wasser übergehen, verändert sich die Chiptemperatur näherungsweise linear mit der Wassertemperatur [6]. Würde man nun die Wassertemperatur konstant halten, würden sich die Chips im Vergleich zwischen 23 °C und 125 °C Umgebungstemperatur nur um ca. 5 °C erwärmen.

Dies belegte, dass das LED-Modul auch unter hohen Umgebungstemperaturen temperaturstabil gehalten werden kann. Der Lichtstrom ging im Vergleich zur Messung bei Raumtemperatur nur um 5 % zurück. Diese Ergebnisse gelten jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die

Wassertemperatur im Gleichgewicht stabil gehalten werden kann. Kühlt man das Kühlwasser jedoch nicht, erhöht sich die Wassertemperatur und linear mit dieser auch die Chiptemperatur.

Zusammenfassung

Dieses Modul, dass in einem Gemeinschaftsprojekt mit der Firma *Easytech* (St. Georgen / Schwarzwald) gebaut wurde, kann als wirklicher Einstieg der LED-Technik in die Allgemeinbeleuchtung betrachtet werden. So erreicht dieses Modul bei einer Leistungsaufnahme von ca. 36 W elektrisch einen Lichtstrom von über 1000 lm, was vergleichbar mit einer 100 W Glühlampe ist. Zusätzlich zu diesem Lichtstrom in Weiß, kann das Modul jegliches farbige Licht innerhalb des Farbgamuts der RGB-LEDs erzeugen. Wird das LED-Modul mit den Optiken verwendet, kann der Lichtstrom in einen Raumwinkel von 10° gebündelt werden, was in einer Entfernung von einem Meter eine Beleuchtungsstärke von ca. 4700 lx ergibt.

Weiterhin kann das Modul auch bei sehr hohen Umgebungstemperaturen verwendet werden. So verringert sich der Lichtstrom des LED-Moduls der nach Datenblatt zulässigen Hösttemperatur von 120°C nur um weniger als 5 %. Mit diesen Kühleigenschaften eröffnen sich der LED-Technik weitere attraktive Einsatzmöglichkeiten, wie beispielsweise das Innere einer Sauna in einem Wellness-Bereich. Somit wurde eine Leuchte gebaut, die bei den gängigen Umgebungsbedingungen sowohl für die helle Raumbeleuchtung als auch für die farbige Stimmungsbeleuchtung sorgen kann.

Literatur

- [1] Alder optomechanical corp. *Product Specification* 2007, Version 1.0
- [2] A. Domhardt, U. Roling, S. Weingärtner, U. Lemmer *TIR optics for non-rotationally symmetric illumination design* Proc. SPIE Vol. 7103, 710304 (2008)
- [3] Deutsche Normen *DIN 5033: Farbmessung. Teil 3: Farbmaßzahlen* 1972
- [4] A. Mahlkow *Thermisches Management für SMD-Hochleistungs-Leuchtdioden* 2005
- [5] Osram O.S. *Lebensdauer von LED-Modulen*, [http://www.osram.de/...](http://www.osram.de/)
- [6] M. Wutz *Wärmeabfuhr in der Elektronik* 1991, Vieweg Verlag, Braunschweig