

LED-basierte spektral programmierbare Lichtquelle – Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten

Frank Reifegerste

TU Dresden, Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design, D-01062 Dresden,
Tel.: +49 (0)351 436 - 36296, FAX: - 37183, Email: frank.reifegerste@ifte.de

Einleitung

LED-Bauelemente haben in den letzten Jahren eine stürmische Entwicklung erlebt, die auch weiterhin anhalten wird. Bereits seit längerem finden LED's in Signalanwendungen wie Verkehrsampeln, Hinweisschildern, Rücklichtern und ähnlichem Verwendung und verdrängen hier nach und nach andere Lichtquellen. Seit wenigen Jahren sind die Effizienz und die Lichtausbeute je Bauelement in Bereiche vorgerückt, die den Einsatz in Beleuchtungsanwendungen erlauben. Auch wenn das oft noch nicht ökonomisch sinnvoll ist, finden sich Bereiche, in denen LED's bereits profitabel eingesetzt werden können.

Während man in der Allgemeinbeleuchtung meistens auf eine gute Farbwiedergabe Wert legt und damit ein dem Tageslicht angenähertes breitbandiges Spektrum erwünscht ist, haben konventionelle anorganische LED-Bauelemente prinzipbedingt ein sehr schmalbandiges Spektrum und erzeugen ein nahezu monochromatisches Licht. Zur Verbesserung der Farbwiedergabeeigenschaften wird die Anregung von Leuchtstoffen genutzt, um das Spektrum zu verbreitern. Während der Einsatz von LED in der Allgemeinbeleuchtung durch die noch ungenügende Farbwiedergabe Probleme bereitet, soll hier die Frage verfolgt werden, ob sich gerade durch das schmalbandige Spektrum positive Einsatzmöglichkeiten ableiten lassen. Die steilflankige Charakteristik macht die Bauelemente für Aufgaben attraktiv, bei denen Unterschiede der spektralen Eigenschaften zur Erkennung gewünschter Informationen ausgenutzt werden können.

Neuartige Lichtquelle

Der in diesem Beitrag vorgestellten Entwicklung liegt die Idee zugrunde, die abgegebene Strahlung spektral unterschiedlicher LED optisch zu mischen, um so Spektren mit einer erwünschten Charakteristik zu erzeugen. Neben der spektralen Flankensteilheit eignen sich diese Bauelemente vor allem dadurch, dass sie einfach ansteuerbar sind und sich elektrisch einfach modulieren lassen. Durch Modulation der Intensitäten der Einzel-LED kann ein in den gegebenen Grenzen programmierbares Spektrum erzeugt werden. Eine Prinzipdarstellung der Anordnung zeigt Abbildung 1.

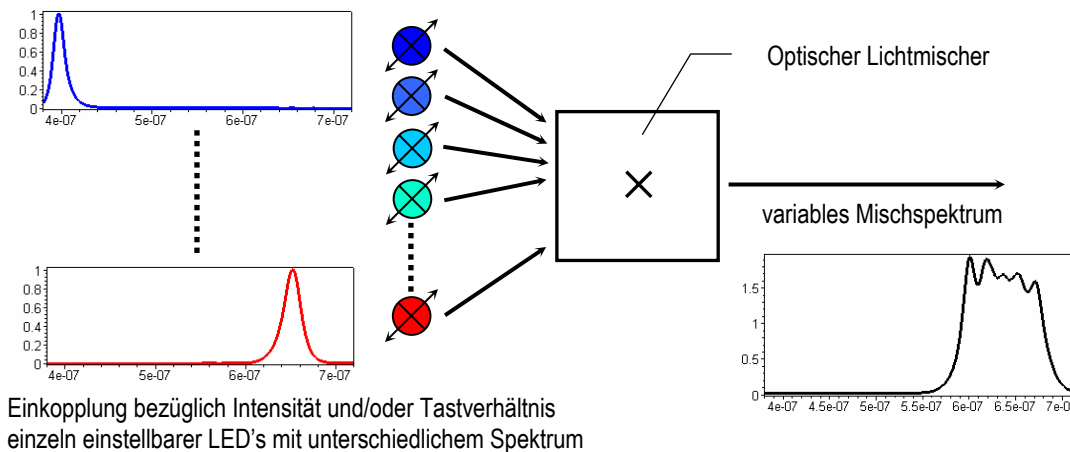


Abbildung 1 - Blockschaltbild der spektral programmierbaren Lichtquelle

Spektrale Spezifikation von LED

Da die untersuchte Anwendung auf der genauen Kenntnis der spektralen Eigenschaften von realen LED-Bauelementen basiert und die Bauelementedatenblätter oftmals darüber nur ungenügende Angaben enthalten, wurden gegenwärtig markt-gängige Bauelemente auf ihre spektralen Eigenschaften untersucht.

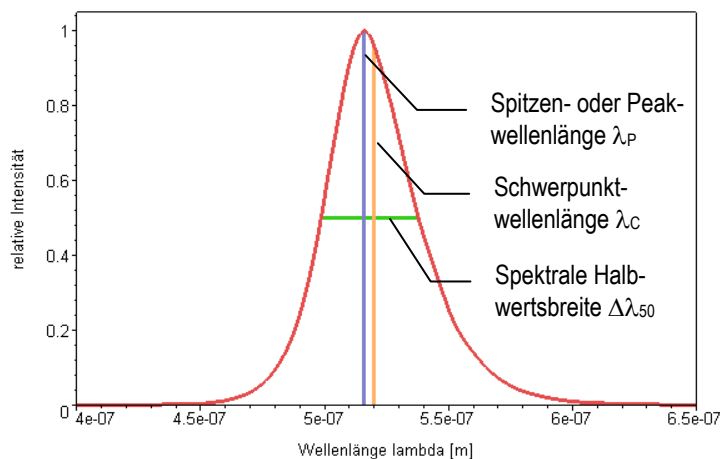


Abbildung 2 - Typisches Spektrum einer LED

Abbildung 2 zeigt ein typisches LED-Spektrum. Die zur Charakterisierung des Spektrums üblichen Kenngrößen sind die Schwerpunktwellenlänge λ_C , die Spitzen- oder Peakwellenlänge λ_P und die Halbwertsbreite $\Delta\lambda_{50}$, gemessen bei 50 % der maximalen Intensität [10]. Gegenwärtig (Stand 6/2007) sind kommerzielle LED-Bauelemente mit Spitzenwellenlängen im Bereich zwischen 255 nm im

Ultravioletten bis zu mehreren Mikrometern im Infraroten verfügbar. Da die Spektren bezüglich ihres Maximums meist asymmetrisch sind, fallen die Spitzenwellenlänge und die Schwerpunktwellenlänge nicht zusammen. Die Halbwertsbreite von sichtbaren LED liegt typischerweise im Bereich von 15 bis 40 nm.

Zu beachten ist, dass sich das Spektrum sowohl mit der Temperatur des Halbleiterübergangs als auch mit dem Betriebsstrom bzw. der Betriebsspannung ändert [4].

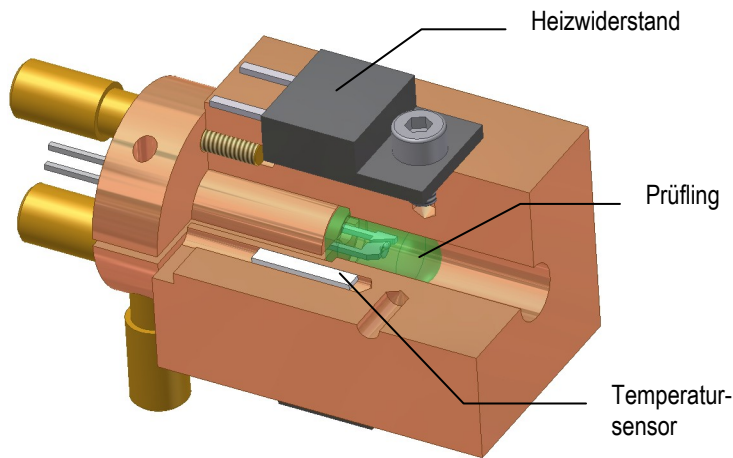


Abbildung 3 - Versuchsaufbau zur Temperierung von Kleinleistungs-LED im T1 $\frac{3}{4}$ Gehäuse mit 5 mm Durchmesser

Zur exakten Spezifizierung dieses Verhaltens wurden Messungen vorgenommen. Dazu wurden zwei Versuchsaufbauten aufgebaut, mit deren Hilfe sich die Bauelemente definiert temperieren und bestromen lassen. Die in Abbildung 3 gezeigte Anordnung ermöglicht die Untersuchung von Kleinleistungs-LED im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 110°C und mit Strömen zwischen 0 und 60 mA.

Der in Abbildung 4 gezeigte Aufbau gestattet darüber hinaus auch den aktiv gekühlten und geheizten Betrieb von Leistungs-LED mit einer Verlustleistung bis 10 W im Temperaturbereich von -10 °C bis 110 °C bei Betriebsströmen zwischen 5 und

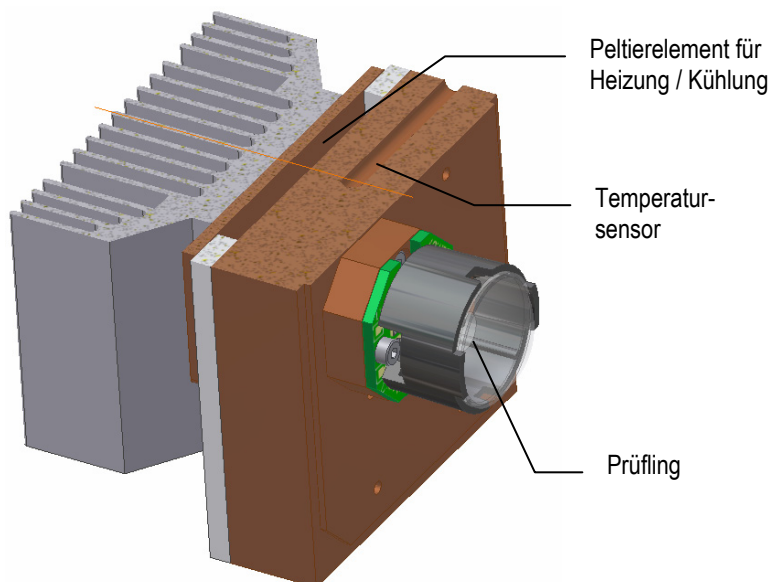


Abbildung 4 - Versuchsaufbau zur Temperierung von Kleinleistungs-LED im T1 $\frac{3}{4}$ Gehäuse mit 5 mm Durchmesser

1500 mA. Durch Modellierung des inneren thermischen Verhaltens der Versuchsaufbauten einschließlich der LED's kann auf die Übertemperatur der Sperrschicht zum thermisch angekoppelten und temperaturgeregelten Bezugssystem geschlossen werden [1],[2]. Die berechnete Übertemperatur bei einem Nennstrom von 20 mA liegt bei 14 K im ersten Versuchsaufbau und typabhängig bei 9 bis 16 K bei 350 mA im zweiten.

Anhand dieser Aufbauten konnten für eine größere Anzahl von verschiedenen LED's strom- und temperaturabhängig Spektren ermittelt und daraus die Abhängigkeiten der Kennwerte bestimmt werden. Tabelle 1 zeigt exemplarisch einige Ergebnisse.

Typ	Betriebsbe- parameter T_{Chip} in K; I in A	Spitzenwellen- länge λ_P in nm	Temperatur- abhängigkeit λ_P in nm je K	Spektrale Halb- wertsbreite $\Delta\lambda_{50}$ in nm	Temperaturabhäng- igkeit der Intensität bei λ_P in % je K
Cree XL7090UVV	35; 0,1	393,6	0,048	15,8	-0,47
Edixeon Opto Co. EDED- 3LA1	33; 0,1	454,8	0,045	21,3	-0,27
Cree XR7090GR	32; 0,1	519,5	0,053	39,0	-0,26
Cree XR7090AM	33; 0,1	588,6	0,15	16,9	-0,74
Cree XR7090RD	33; 0,1	632,1	0,16	17,9	-0,38
Lumileds / Philips Luxeon LXX2-PD12	33; 0,1	632,9	0,16	21,0	-0,52

Tabelle 2 - Experimentell ermittelte Abhängigkeiten verschiedener LED

Wie zu sehen ist, existieren nennenswerte Temperaturabhängigkeiten der Spitzenwellenlängen von bis zu 0,16 nm je Kelvin. Außerdem ist die erreichbare Ausgangsintensität stark temperaturabhängig. Bei Anwendungen, die auf dem spektralen Verhalten von LED basieren, sollten diese Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Es lassen sich folgende Konstruktionsrichtlinien ableiten:

- Um die thermischen Einflüsse zu minimieren ist ein ausreichendes Thermomanagement erforderlich. Die Dioden müssen thermisch gut angekoppelt werden. Der thermische Pfad muss so gestaltet sein, dass an der Diode unabhängig von der Betriebsart ein enger Temperaturbereich des Halbleiterübergangs erzielt werden kann [6]. Das kann idealerweise durch Regelung des thermischen Bezuges erfolgen.
- Werden Bauelemente eingesetzt, deren Spektrum zusätzlich stark vom Strom abhängt, so sollten sie nach Möglichkeit durch Pulsweitenmodulation gesteuert werden [5].

Wenn das Spektrum der Anordnung im Betrieb nicht gemessen werden kann, aber trotzdem höhere Anforderungen an dessen Reproduzierbarkeit gestellt werden, so kann die Strom- und / oder Temperaturabhängigkeit durch eine geeignete Funktion modelliert werden. Wünschenswert hierfür wäre eine physikalisch motivierte Funktion, die in die spektralen Messwerte der Bauelemente eingepasst werden kann und somit die Vorhersage des Spektrums bei den aktuellen Betriebswerten von Strom- und Temperatur ermöglicht. Eine solche Funktion konnte jedoch nicht ausreichend mit den Messwerten realer Bauelemente in Übereinklang gebracht werden. Es wurde deshalb ein anderer Weg gewählt, um Funktionen mit bestimmten Eigenschaften phänomenologisch an die Messwerte anzupassen. Hierfür geeignete Funktionen sollten bestimmten Eigenschaften genügen:

- Die Spitzenwellenlänge und die Amplitude der Funktion sollten direkt interpretierbare Parameter sein,
- die Funktionen sollten die Asymmetrie des Spektrums berücksichtigen,
- die Funktionen sollten stetig und ausreichend stabil sein.

Die in der ersten Spalte von Tabelle 2 dargestellten Funktionen haben sich hierfür als geeignet erwiesen. Sie können durch ein geeignetes Optimierungsverfahren an die Messwerte approximiert werden und gestatten dann die einfache algorithmische Behandlung von LED-Spektren. Die Funktion ‚Split Pearson VII‘ zeigt für die meisten untersuchten LED das den Messwerten ähnlichste Verhalten. Einfacher zu handhaben ist jedoch die Funktion ‚Logistic Power Peak‘, da sie nicht zusammengesetzt ist. Die zweite Spalte von Tabelle 2 sowie Abbildung 5 illustrieren die Anwendung der Funktionen anhand eines konkreten Beispiels.

Funktion	Beispiel Approximation für eine Leistungs-LED Cree XR7090AM bei 100 mA Betriebsstrom und 33 °C Chiptemperatur
Gaussian [3] $I(\lambda) = A \cdot e^{-\ln(2) \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_P}{W}\right)^2}$	$\lambda_P = 586,1 \text{ nm}$ $W = 9,99\text{E-}9$ $A = 0,881$ Gütekriterium der Optimierung: $\chi^2 = 205,9$ Maximale relative Abweichung: $\Delta I_{\max} = 0,144$
Pearson VII [9] $I(\lambda) = \frac{A}{\left(1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_P}{W}\right)^2 \cdot \left(2^{\frac{1}{S}} - 1\right)\right)^S}$	$\lambda_P = 586,3 \text{ nm}$ $W = 8,41\text{E-}9$ $A = 0,984$ $S = 2,625$ Gütekriterium der Optimierung: $\chi^2 = 107,2$ Maximale relative Abweichung: $\Delta I_{\max} = 0,102$
Logistic Power Peak [8] $I(\lambda) = \frac{A}{S} \left(1 + e^{\frac{\lambda - \lambda_P + W \cdot \ln(S)}{W}}\right)^{\frac{-S-1}{S}} \cdot e^{\frac{\lambda - \lambda_P + W \cdot \ln(S)}{W}} \cdot (S+1)^{\frac{S+1}{S}}$	$\lambda_P = 587,4 \text{ nm}$ $W = 6,25\text{E-}9$ $A = 0,933$ $S = 0,475$ Gütekriterium der Optimierung: $\chi^2 = 49,1$ Maximale relative Abweichung: $\Delta I_{\max} = 0,068$
Split Pearson VII [9] $I(\lambda) = \frac{A}{\left(1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_P}{W_N}\right)^2 \cdot \left(2^{\frac{1}{S_N}} - 1\right)\right)^{S_N}}$ mit $[W_N, S_N] = [W_1, S_1]$ für $\lambda < \lambda_P$, $[W_2, S_2]$ sonst	$\lambda_P = 588,6 \text{ nm}$ $W1 = 1,04\text{E-}8$ $A = 0,991$ $W2 = 6,57\text{E-}9$ $S1 = 2,514$ $S2 = 2,442$ Gütekriterium der Optimierung: $\chi^2 = 12,6$ Maximale relative Abweichung: $\Delta I_{\max} = 0,028$
Bedeutung der Parameter: λ_P : Spitzenwellenlänge W: Breitenparameter A: Amplitude S: Formparameter	

Tabelle 2 - Zur Modellierung von LED-Spektren geeignete Funktionen

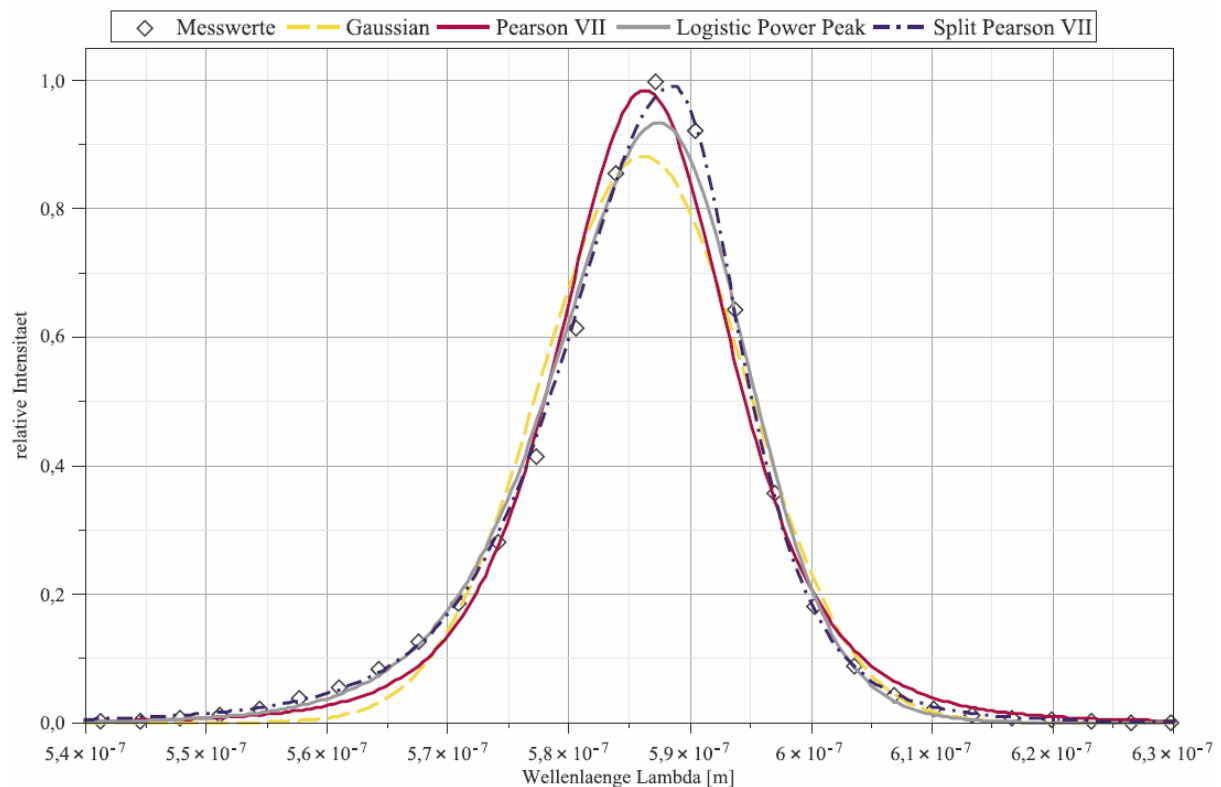


Abbildung 5 – Beispiel: Normierte Darstellung der Funktionen nach Tabelle 2 für eine Leistungs-LED vom Typ Cree XR7090AM bei 100 mA Betriebsstrom und 33°C Chiptemperatur

Durch Berücksichtigung der Strom- und Temperaturabhängigkeiten in den Funktionsparametern dieser Funktionen kann das spektrale Verhalten für beliebige Werte extrapoliert werden. Zukünftige Untersuchungen sollten zeigen, inwieweit die Alterung der Bauelemente nicht nur die Intensität der abgegebenen Strahlung, sondern auch die spektrale Charakteristik verändern.

Konstruktion

Die Funktionsweise und Anwendbarkeit dieses Verfahrens sollte anhand von zwei Demonstratoren verifiziert werden. Der erste Demonstrator gestattet die Ansteuerung von Kleinleistungs-LED an 16 schnellen geregelten Stromquellen mit Strömen bis 60 mA [7]. Die Ansteuerung kann durch Stromsteuerung und / oder durch Pulsweitenmodulation erfolgen. Die Lichtmischung erfolgt mit einer Ulbrichtkugel als Lichtmischkammer. Das Mischlicht kann an einem Durchbruch im Umfang der Kugel abgegriffen werden. Der Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.

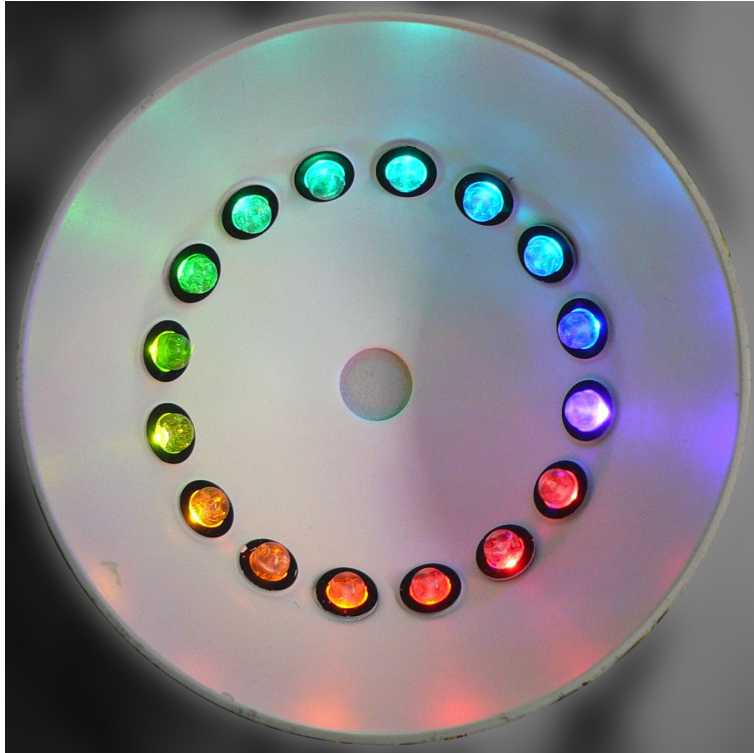


Abbildung 6 - Blick in den geöffneten Demonstrator

Ein zweiter Demonstrator sollte die Einsatzfähigkeit von Leistungsbauelementen in einer für Beleuchtungszwecke einsetzbaren Quelle nachweisen. Aufgrund der schlechteren Verfügbarkeit von Leistungsbauelementen mit unterschiedlichem Spektrum ist gegenwärtig eine weniger feine Abstufung der Einzelspektren möglich. In diesem Aufbau sollten acht verschiedene Leistungs-LED mit Strömen bis jeweils 1,5 A

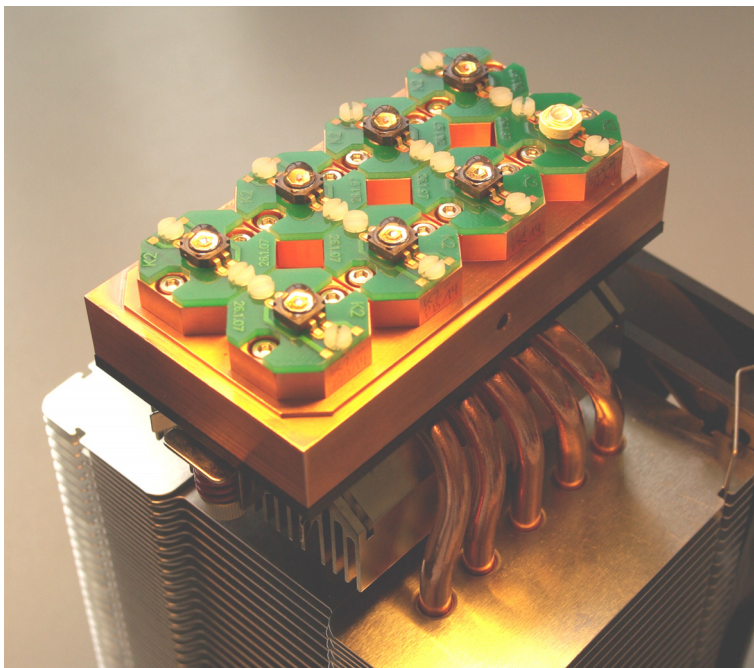


Abbildung 7 Geöffneter Demonstrator für Leistungs-LED

Infolge der kurzen Reaktionszeit der Bauelemente kann das gesamte Spektrum innerhalb von wenigen Mikrosekunden geändert werden.

Durch den Einsatz eines FPGA in der Steuerelektronik wird ein vorhersagbares zeitliches Verhalten mit kleiner Latenzzeit erreicht. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Einheit flexibel in das Betriebsregime übergeordneter Komponenten, beispielsweise die Bildsynchronisation mit einer Kamera einzufügen.

betrieben werden können. Die Ansteuerung kann wiederum durch schnelle geregelte Stromquellen durch Strom- und / oder durch Pulsweitenmodulation erfolgen. Die Quellen sind an einen thermisch geregelten Block angekoppelt. Dadurch kann die Sperrschichttemperatur in kleinen Grenzen gehalten und die thermische Abhängigkeit der Bauelemente minimiert werden. Abbildung 7 zeigt diesen Aufbau.

Die Lichtmischung erfolgt hier durch ein mehrstufiges Ver-

fahren. In einer ersten Stufe wird die Strahlung der Einzel-LED durch eine durch das Prinzip der Totalreflexion arbeitende Optik (TIR-Optik) effizient in mehrere Lichtleiter eingekoppelt. Diese Lichtleiter werden in einem gemeinsamen Lichtleiter zusammengeführt. Die Einzelfasern wurden dabei statistisch gemischt. Dadurch wird die Strahlung der LED vorgemischt. Eine weitere Homogenisierung erfolgt durch einen nachfolgenden Lichtmischstab. Als Auskoppeloptik kann beispielsweise eine Ringlichtquelle angeschlossen werden. Hierdurch sind Auflicht-Hellfeldbeleuchtungen mit guter Homogenität möglich.

Beide Einheiten lassen sich von einem Steuer-PC aus parametrieren oder es können vorher in einem EEPROM abgelegte Spektren abgerufen werden.

Einsatzgebiete

Mit der Verfügbarkeit der beschriebenen Lichtquellen erschließen sich verschiedene Einsatzfälle, bei denen das Verhalten ausgenutzt werden kann. Bisher konnten Anwendungsfälle in den folgenden Gebieten gefunden werden:

1. Kontrastanhebung im Narrow Band Imaging,
2. Erzeugen einer hohen Anzahl von unterschiedlichen Farbkanälen in Verbindung mit einer Graustufenkamera (Multispectral Imaging),
3. Aus Punkt 2: Ableiten einer für eine definierte Erkennungsaufgaben kontrast-optimalen Beleuchtung,
4. Nachstellen von anderen Lichtquellen, beispielsweise zur Abmusterung von Körperfarben,
5. Simulation thermischer Quellen mit unterschiedlicher Farbtemperatur. Eine Nachbildung eines Spektrums ist in Abbildung 8 stellvertretend dargestellt.

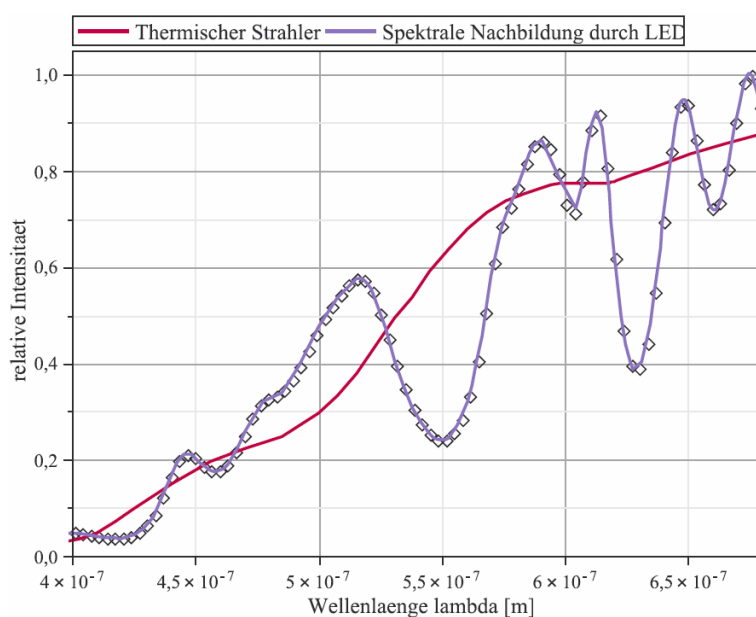


Abbildung 8 – Beispielapplikation: Nachbildung eines thermischen Strahlers

Die beschriebenen Demonstratoren verstehen sich als Aufbauten zum praktischen Nachweis der Funktionsfähigkeit dieser neuen Technik. Sie sollen die praktische Erprobung solcher spektral programmierbaren Lichtquellen ermöglichen. Dadurch lassen sich sicherlich noch weitere Anwendungsfälle erschließen.

Zusammenfassung

Durch das schmalbandige Spektrum eignen sich LED als Beleuchtungsquelle für spektrometrische Verfahren. Durch die geeignete elektrische Ansteuerung von mehreren unterschiedlichen LED lässt sich eine spektral programmierbare Lichtquelle aufbauen. Am Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design der TU Dresden wurden zwei solcher Lichtquellenanordnungen entwickelt. Durch den Einsatz von Kleinleistungs-LED lässt sich eine spektral fein abgestufte Quelle mit geringer Ausgangsleistung aufbauen. Durch Einsatz von Leistungs-LED wird eine spektral weniger fein gestufte Lichtquelle zur Objektbeleuchtung möglich. Beide Quellen lassen sich in sehr kurzer Zeit spektral umprogrammieren. Dadurch leiten sich neue Anwendungen ab.

Quellen

- [1] Agilent Technologies: Thermal Resistance Values for LED Lamps - Application Brief I-002. 11/1999.
- [2] Agilent Technologies: LED Lamp Thermal Properties - Application Brief A04. 1/2001.
- [3] GAINES, J. M.: Modelling of multichip LED packages for illumination. In: Lighting Research & Technology 38, 2006.
- [4] HONG, E.; NADENDRAN, N.: A method for Projecting Useful Life of LED Lighting Systems. In: Proceedings of SPIE 5187, SPIE, 2003.
- [5] OTT, H.; PLÖTZ, L.; BYRNE, M.: Dimming InGaN LEDs, OSRAM Opto Semiconductor. 2003.
- [6] PETROSKI, J.: Thermal Challenges Facing New Generation Light Emitting Diodes (LEDs) for Lighting Applications. In: Solid State Lighting II, Proceedings of SPIE 4776, 2002.
- [7] REIFEGERSTE, F.: LED-basierte Lichtquelle mit programmierbarem Spektrum. In: F&M 114, 3/2006.
- [8] <http://www.systat.com/products/tablecurve2d/help/?sec=1188> (27.6.2007).
- [9] WOJDYR, M. et al: <http://www.unipress.waw.pl/fityk/doc/fitykhelp.pdf> (28.6.2007).
- [10] ZVEI: Begriffe für LED - LED definitions / Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie. Frankfurt : Fachverbände Leuchten und Lampen - Technische Arbeitsgruppe LED Beleuchtung, 7/2004.