

Auslegung eines Thermomanagements für die Ausleuchtung von Firmenlogos mit extrem lichtstarken LEDs

Dipl.-Ing. Y. Kern, Dr. R. Hennig, NEL Neotechnik Elektroanlagen Leipzig GmbH

Einleitung

Den thermischen Anforderungen von Hochleistungs-LEDs wird vielfach nicht genug Beachtung geschenkt, obwohl auch diese spürbar heiß werden können. Kühlkörper basieren auf dem Prinzip der Wärmekonvektion und sind mittlerweile sehr ausgereift. Sie werden für vielfältigste Anwendungen konstruiert und mittlerweile auch zur Kühlung von LEDs herangezogen. Da jedoch bisher keine gesicherten Angaben für die passive Kühlung von sehr kompakt aufgebauten Anlagen, wie sie in der Lichtwerbung vorkommen, vorliegen, wurde eine Messreihe entwickelt, die zukünftig die Dimensionierung des Kühlkörpers erleichtern soll.

Auslöser der Untersuchungen

Die Gelegenheit für dieses Projekt ergab sich auf eine spezielle Kundenanfrage hin, bei der das bekannte Firmensignet der gekreuzten Schwerter für die Meißener Porzellanmanufaktur in einer stark leuchtenden Variante mit funkelndem Erscheinungsbild konzipiert werden sollte. Es folgte der Aufbau eines Musters mit geringer Bautiefe, ausgestattet mit einer für Spanntuch- und Diakästen vorgesehenen kompakten und sehr leistungsstarken Lichtquelle, vor die eine Stahlplatte mit einer durchgesteckten Acrylglaskombination gesetzt wurde. Die flächige warmweiße Hinterleuchtung und das pyramidenförmig strukturierte Acryl schaffen eine hohe Brillanz und empfinden das sanfte Schillern der Glasur des Meißener Porzellans gut nach.

Somit wird ein edles Erscheinungsbild in Showrooms, Boutiquen, auf Messen u.Ä. geschaffen. Ein deutlich besseres Kontrastverhältnis auch in der Tagesanmutung ermöglicht diesen Einsatz im Indoor-Bereich in Gebäuden mit hohem Tageslichtkoeffizienten.



Bilder 1-3: Firmensignet Meißener Schwerter

Steigerung der Oberflächenleuchtdichte

Das erste Muster gewährte aufgrund erster thermischer Abschätzungen verbunden mit einem hohen Sicherheitsfaktor noch Zwischenräume zwischen den LED-Streifen. Messungen der Oberflächenleuchtdichte an 15 Punkten der Schwerter erbrachten einen Mittelwert von ca. 30 000 cd/m².

Nachdem der ursprünglich gewählte LED-Streifen nicht nur in schmalere Ausführung mit dichter gepackten LEDs konzipiert wurde, sondern zudem die LED-Streifen abstandslos aneinandergesetzt wurden, war es möglich, auf gleichbleibender Grundfläche die mittlere Leuchtdichte weiter auf ca. 50 000 cd/m² zu steigern.

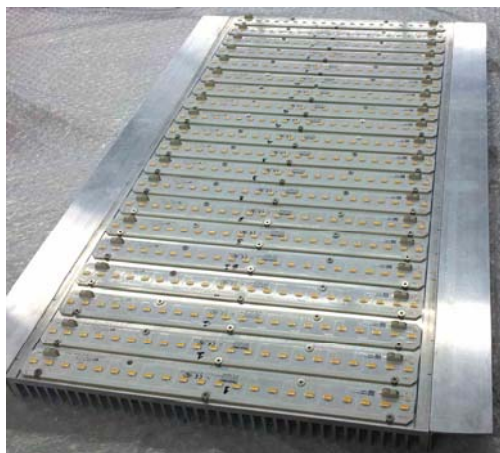


Bild 4: 50k-Hochleistungsstrahler

Dabei kommt bereits die Frage auf, bis hin zu welchen Größenordnungen man die Leuchtdichte durch Erhöhung der Packungsdichte weiter steigern kann und ob diese geradlinig dem Gesetz der einfachen Summation folgt. In den Datenblättern verschiedener Hersteller von Hochleistungs-LEDs finden sich keine konkreten Angaben dazu, wie viele LED-Streifen man tatsächlich nebeneinander betreiben kann, ohne einen größeren Abfall des Lichtflusses und eine merkliche Verkürzung der Betriebszeit bei einer LD80 hinnehmen zu müssen.

Problemstellung Thermomanagement

Im Zuge der Alterung von LEDs sinkt die Lichtausbeute. Sowohl thermische Schwankungen im Raum wie auch hohe Chiptemperaturen verringern die Lebensdauer merklich. Die Temperatur am Chip beeinflusst Lichtausbeute, -farbe und Vorwärtsspannung. Doch auch die Umgebungstemperatur und die Eigenerwärmung bei fließendem Strom wirken auf die T_C -Temperatur ein. Bei der LED wird nicht die gesamte elektrische Energie in Lichtleistung, sondern auch zu einem großen Anteil in Verlustwärme umgewandelt. Das Ziel liegt also darin, den Temperaturhaushalt möglichst gering und homogen (bezogen auf den Chip) zu halten.

Somit stellte sich die Frage nach einem thermischen Management zum nachhaltigen Schutz der technischen Komponenten vor Überhitzung. Eine probate Methode ist die passive Kühlung, die die Wärme auf eine größere Fläche verteilt und rückseitig von der LED wegleitet. Abgesehen vom energetischen Aspekt kann so auch eine geringe Bautiefe des Leuchtkastens entsprechend den Forderungen durch Architekten im Bereich Lichtwerbung und Beschilderung gewährleistet werden. Der Verzicht auf bewegliche Bauteile schließt gegenüber der aktiven Kühlung eine anfällige Fehlerquelle aus. Aktive Kühlungen sind leistungsfähiger, weisen jedoch oft einen höheren Verschmutzungsgrad auf und lassen sich schwerer säubern als Kühlrippen. Ist ein Lüfter erst einmal festgefahren, zieht dies teilweise gravierende Folgeschäden von der Zerstörung der LED bis hin zur Auslösung eines Brandes nach sich.

Kühlkörper gibt es in sehr vielen verschiedenen Ausprägungen. Für unsere Zwecke wurden zum einen eine einfache Aluminiumplatte ohne weitere Struktur und zum anderen ein kompakter Kühlkörper aus dem gleichen Material mit einer Vielzahl kleiner Kühlrippen

zur Vergrößerung der Oberfläche ausgewählt. Aluminium hat einen niedrigen spezifischen Wärmewiderstand und eignet sich somit sehr gut zur Wärmeleitung.

Luft hingegen stellt einen schlechten Leiter dar, weswegen Luftspalte möglichst zu vermeiden sind. Da jedoch keine Leiterplatte bzw. kein Kühlkörper exakt plan ist, erfolgte der Auftrag von Wärmeleitpaste zur Verbesserung des Wärmeübergangs durch Verdrängung der zwischenliegenden Luft. Je nach Güte der Wärmeleitpaste lässt sich der Effekt noch verstärken. So sind hochwertige Pasten bspw. mit sehr gut wärmeleitenden Silberpartikeln versetzt.

Entwicklung des Messaufbaus

Es gibt kein standardisiertes und allgemein anerkanntes Verfahren des experimentellen Aufbaus und der Durchführung der zur Entwicklung eines Thermomanagements notwendigen Messungen, was zunächst eine grundlegende Planung erforderlich machte. Zur zahlenmäßigen Erfassung der Wärmeabführung wurde eine Messreihe zusammengestellt, die vier LED-Systeme in drei unterschiedlichen Lichtfarben in verschiedenen Kühlungsszenarien vergleicht. Der Betrieb ohne jegliche Kühlung wurde dem mit zwei verschiedenen Kühlkörpern gegenübergestellt. In einem weiteren Messdurchlauf wurde zusätzlich mit Wärmeleitpaste gearbeitet. Die untersuchten LEDs stammen von zwei verschiedenen hier nicht weiter genannten Firmen. Damit ergibt sich folgende Matrix mit 45 Kombinationen:

LED	Hersteller	Hersteller 1						Hersteller 2	
	Typbezeichnung	a		b			c		d
	Lichtfarbe	830	840	830	840	850	830	840	830 850
Kühlung	keine Kühlung								
	AL-Platte								
	AL-Platte + Paste								
	Kühlkörper								
	Kühlkörper + Paste								

Tabelle 1: Kombinationsmöglichkeiten aus LED-Typ und Kühlung

Die Entwicklung einer Messsystematik wurde unternommen, um unterschiedliche LEDs und Kühlungen schematisch einordnen und Messungen priorisieren bzw. weglassen zu

können. Ziel ist es, anhand dieser Matrix auch neu hinzukommende LED-Leisten in ihrer Wärmeentwicklung und den Bedarf an Kühlung abschätzen zu können.

Zur Durchführung des Versuchs wurde ein System aus Stativen aufgebaut, um den Abstand der Lichtquelle vom Diffusor und dem sich dahinter befindenden Leuchtdichtemessgerät zugunsten einer guten Reproduzierbarkeit konstant bei 30 cm zu halten und dem Aufbau eine gewisse Stabilität zu verleihen.



Bilder 5 und 6: Versuchsaufbau mit eingespannter LED-Leiste

Es fand eine fortschreitende Versuchsverbesserung statt. Zur Reduktion von Temperaturschwankungen durch geöffnete Türen wurde ein Vorhang angebracht sowie eine Einhausung gegen Luftzug um den Messaufbau herum aufgebaut.

Der t_C -Punkt ist ein künstlich geschaffener Referenzpunkt der LED-Hersteller, da die Junction-Temperatur nicht direkt an der Sperrschicht gemessen werden kann. Unter Berücksichtigung der thermischen Widerstände des spezifischen Aufbaus kann somit auch durch die indirekte Messung auf der LED-Platte auf die Temperatur am Chip geschlossen werden. Diese Messung dient ebenfalls der Feststellung, welche Temperaturreerven noch vorhanden sind bzw. bis zu welcher Umgebungstemperatur die LED eingesetzt werden kann, ohne Schaden aufgrund der Wärmeentwicklung während des Betriebs zu nehmen.

Ein bereits vorhandenes Temperaturmessgerät zur Erfassung der Umgebungsleuchtdichte erwies sich aufgrund seiner Positionierung im Raum sowie aufgrund fehlender Nachkommastellen als zu ungenau. Auch die stabförmige Messspitze des Thermometers zur Erfassung der T_C -Temperatur war nicht exakt genug auf der LED-Platte fixierbar. Beide Geräte wurden durch ein Messgerät mit der Fähigkeit der parallelen Aufnahme

beider Werte ersetzt. Auch der t_c -Punkt kann trotz seiner geringen geometrischen Größe besser erreicht werden; zur Unterstützung der Fixierung waren jedoch Klemmen bzw. Klebebänder notwendig.

Zur experimentellen Nachprüfung der Genauigkeit der beiden Messfühler wurden diese eng aneinander zwischen große Volumen an wärmeisolierendem Polystyrol gelegt. Die Differenz zwischen den beiden Sonden lag bei $\Delta T \leq 0,05$ Grad, was als hinreichend genau für die Messreihen zur Lösung unserer Aufgabenstellung zu betrachten ist.

Ergebnisse

Nachfolgende Tabelle stellt die obersten bei einer Messung aufgetretenen Temperaturen den laut Datenblatt höchstens erlaubten gegenüber. Das Erreichen der maximal zulässigen T_c -Temperatur am Gehäuse bedeutet, dass die Junction-Temperatur im Inneren im kritischen Bereich angelangt ist. Die T_c -Temperaturen sind jedoch von der Umgebungstemperatur abhängig und daher nur bedingt aussagekräftig. Der Versuchsstand befand sich in einem Raum, in dem minimal 16,2 und maximal 28,2 Grad herrschten. Somit eignet sich diese Aufstellung dennoch, um grob abschätzen zu können, ob die Gefahr der Schädigung beim Langzeitbetrieb besteht. So wurden selbst ohne Kühlung die von der Firma 1 aufgestellten Grenztemperaturen nicht erreicht. Dies geschah jedoch selbst unter Verwendung eines Kühlkörpers und der Paste bei den beiden Leisten des anderen Herstellers. Die Auswahl eines effektiveren Kühlkörpers ist unabdingbar.

LED-Typ	a		b			c		d	
	830	840	830	840	850	830	840	830	850
$T_{c \max}$ Datenblatt [°C]	80		85			85		65	
$T_{c \max}$ ohne Kühlung [°C]	52,8	57,0	69,5	60,1	62,5	68,6	65,2	85,9	84
$T_{c \max}$ AL-Platte [°C]		52,4							
$T_{c \max}$ Al-Platte + Paste [°C]		51,5		61,4			66,5		
$T_{c \max}$ Kühlkörper [°C]		49,6							
$T_{c \max}$ Kühlkörper + Paste [°C]	49,6	49,4	59,4	61,0	57,0	56,3	54,0	71,1	66,5

Tabelle 2: Gegenüberstellung maximal zulässiger und erzielter T_c -Temperaturen

Wesentlich besser geeignet zur Beurteilung der thermischen Entwicklung ist hingegen die Bildung der Differenz aus T_c - und Umgebungstemperatur. Die nachfolgende Grafik verdeutlicht, inwieweit sich die unterschiedlichen LED-Typen ohne Kühlung in Bezug auf die Differenztemperatur unterscheiden. Die Aufzeichnung sämtlicher Messwerte erfolgte

ab einer Betriebsdauer von zwei Stunden, um gewährleisten zu können, dass sich das System im eingeschwungenen Zustand befand.

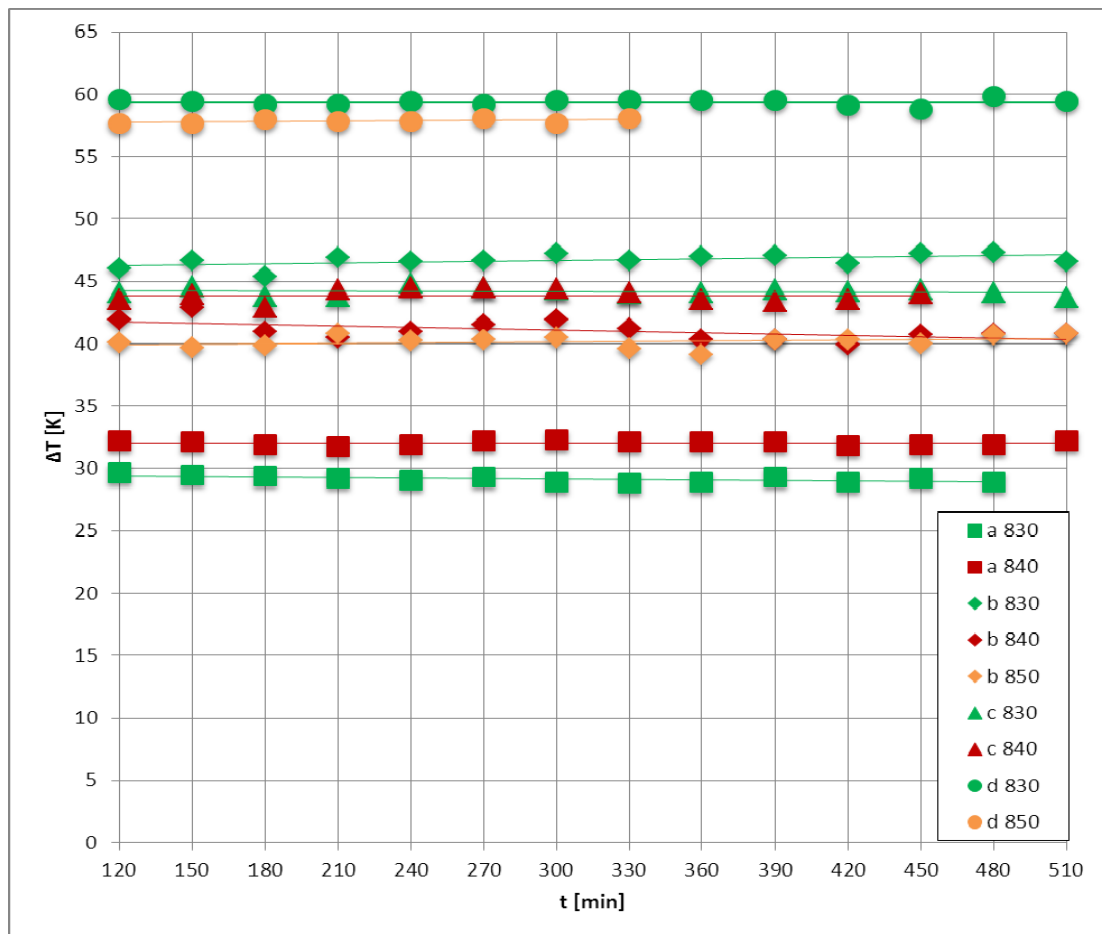


Bild 7: Differenztemperaturen ΔT aller LED-Typen ohne Kühlung

Die unterschiedlichen Kühszenarien wurden nachfolgend stichprobenartig durchgemessen. Zur Veranschaulichung, welchen Einfluss die vier Kühloptionen haben, wurde beispielhaft ein Vergleich für den LED-Typ a 840 aufgestellt.

Ein Rückgang der Differenztemperatur war bei beiden Kühlkörpertypen ersichtlich. Das Auftragen von Wärmeleitpaste trug zu einer weiteren Verbesserung des Wärmeübergangs bei. So konnte in der effektivsten Kombination von beidem ein Rückgang der Differenztemperatur um über 8 K verzeichnet werden.

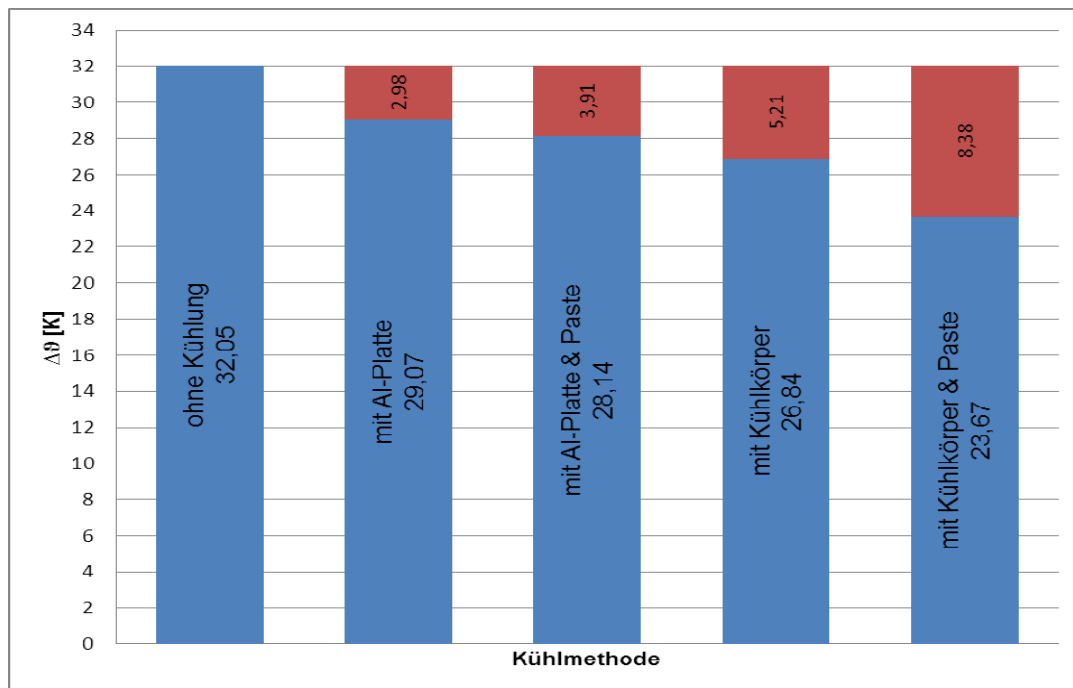


Bild 8: Einfluß der Kühlung bei LED-Typ a 840

Nach Einsatz der Zusammenstellung mit der stärksten Kühlwirkung (Kühlkörper und Paste) ergibt sich somit für ein für alle LED-Typen weitaus besseres Bild.

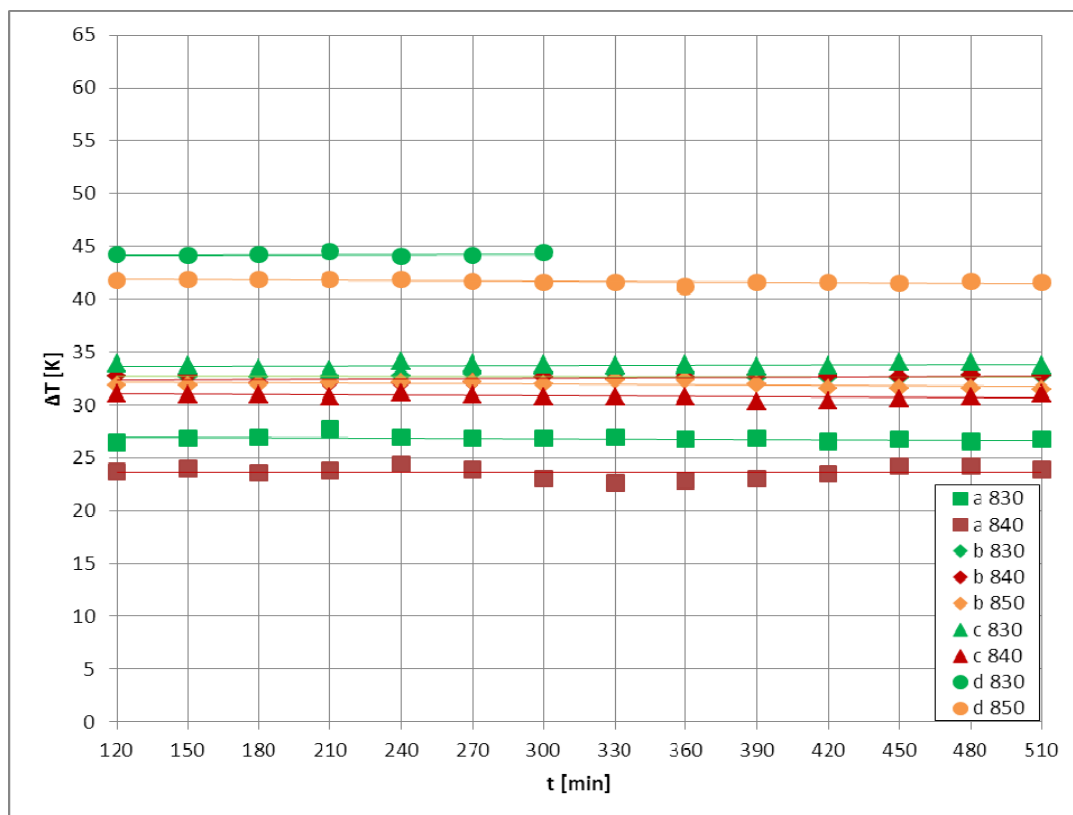


Bild 9: Differenztemperaturen ΔT aller LED-Typen mit Kühlkörper und Paste

Bei der Gegenüberstellung sämtlicher untersuchter LED-Typen im ungekühlten sowie im mit Kühlkörper und Paste ausgestatteten Zustand wird ersichtlich, dass der stärkste Temperaturrückgang durch Kühlung bei den beiden LEDs von Anbieter 2 stattfand. Die verbleibende mittlere Differenztemperatur liegt jedoch immer noch weit über den gekühlten LEDs von Hersteller 1 und übertrifft bis auf eine Ausnahme sogar die Mittelwerte der ungekühlten d-Typen. Die Module d 830 und d 850 mögen zwar lichtstärker sein als die der Marktbegleiter, für temperaturkritische Anwendungen oder geringe Bautiefen besitzen sie die schlechtere Eignung.

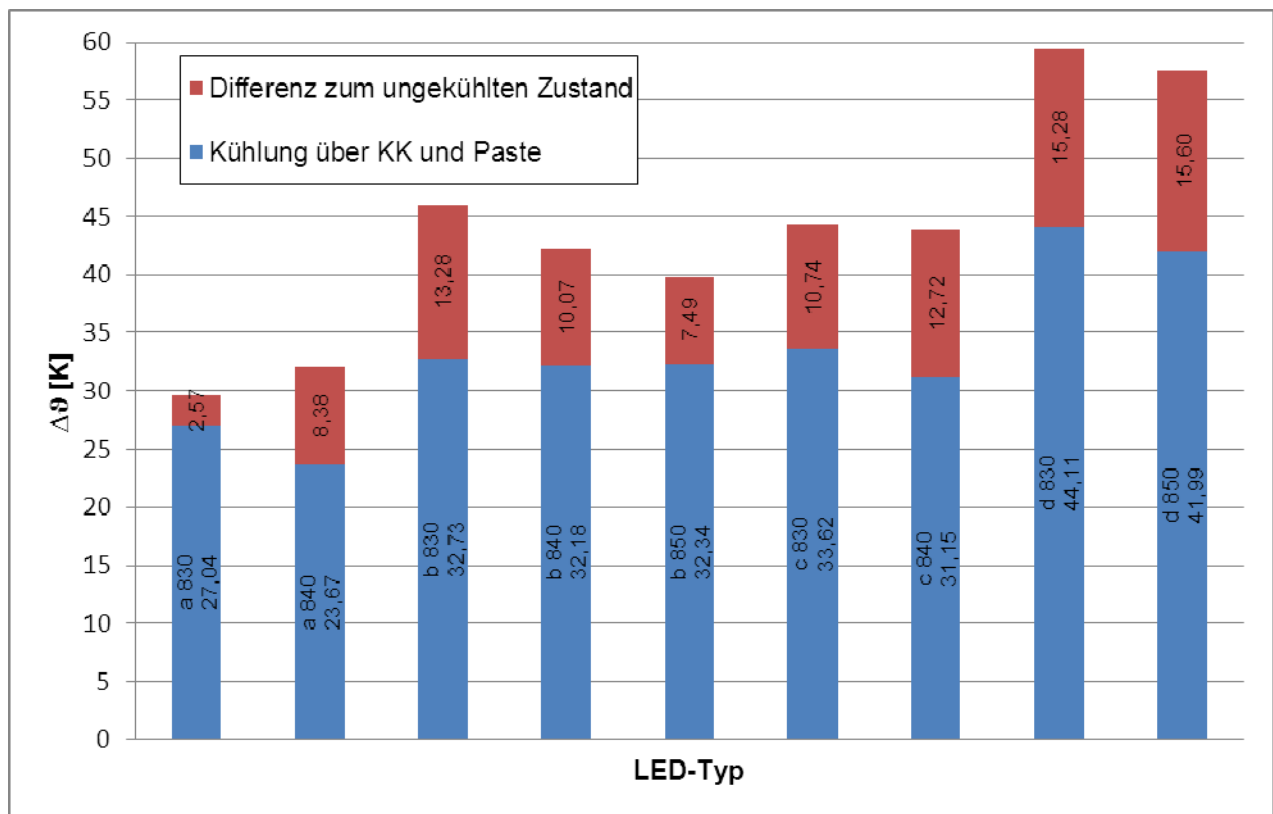


Bild 10: Gegenüberstellung aller LED-Module im ungekühlten sowie im effektivsten gekühlten Zustand

Es kam zudem zu keinem gravierenden Unterschieden zwischen der b-Serie und den LEDs der c-Leisten mit integriertem Notlicht. Die Notlicht-LEDs lassen sich separat ansteuern, was jedoch von unserer Seite nicht geschah, weswegen die c-Module als weitestgehend äquivalent zu erst genanntem Typ angesehen werden können.

Zur Überprüfung des Verhaltens bei Verwendung mehrerer LED-Leisten wurde der sich aus zwanzig auf einem Kühlkörper mit Paste aufgeschraubten Streifen vom Typ b 840 zusammensetzende 50k-Strahler ausgemessen. Die Messung fand unter recht extremen Bedingungen bei einer Umgebungstemperatur von bis zu 31,5°C statt. Die mittlere Temperaturdifferenz im eingeschwungenen Zustand lag bei 42,4 K und lag somit um 1,5 K

höher als $\Delta T_{\text{mittel}} = 40,9 \text{ K}$ bei einer vorherigen Messung mit gängigeren Raumtemperaturen von ca. 23°C . Hier war jedoch auch noch keine Kühlpaste aufgetragen.



Bilder 11 und 12: Messaufbau 50k-Hochleistungsstrahler

Selbst unter diesen überdurchschnittlichen Voraussetzungen wurde der im Datenblatt angegebene Grenzwert von 85°C nicht erreicht.

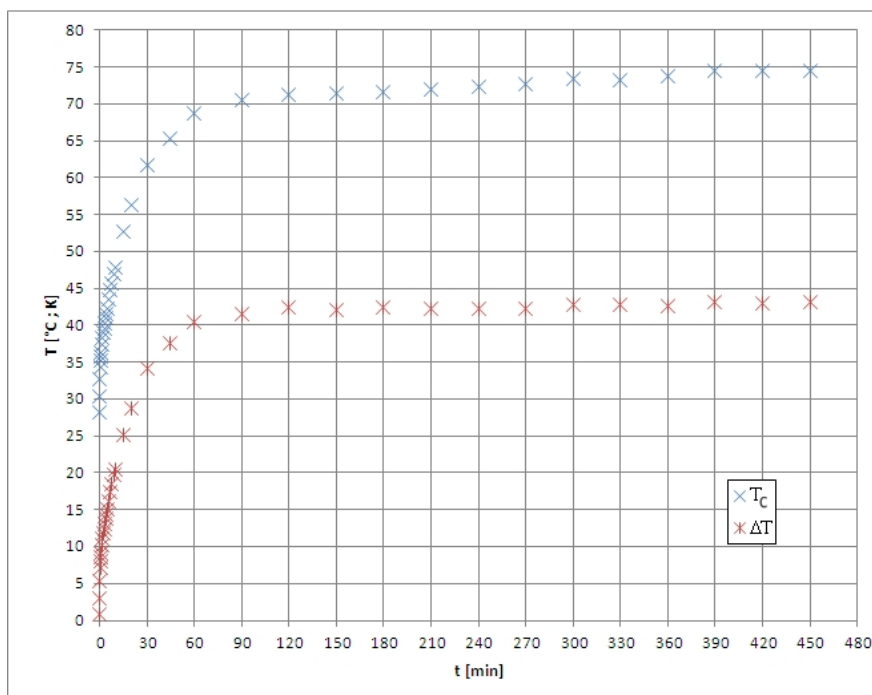


Bild 13: Verläufe der Temperatur des 50k-Strahlers am t_c -Punkt und der Differenztemperatur

Im Vergleich zu einer einzeln gemessenen Leiste desselben Typs mit $\Delta T_{\text{mittel}} = 32,5 \text{ K}$ im eingeschwungenen Zustand erhöhte sich der Mittelwert beim Strahler um knapp 10 Grad.

Dabei ist jedoch anzumerken, dass die verwendeten Kühlkörper einen abweichenden Aufbau haben.

Unterschiedliche Bautiefen der Lichtwerbeanlage wurden durch die schrittweise Änderung des Abstandes zwischen Diffusor und Hochleistungsstrahler simuliert. Wie erwartet sank die gemessene Leuchtdichte mit zunehmender Entfernung.

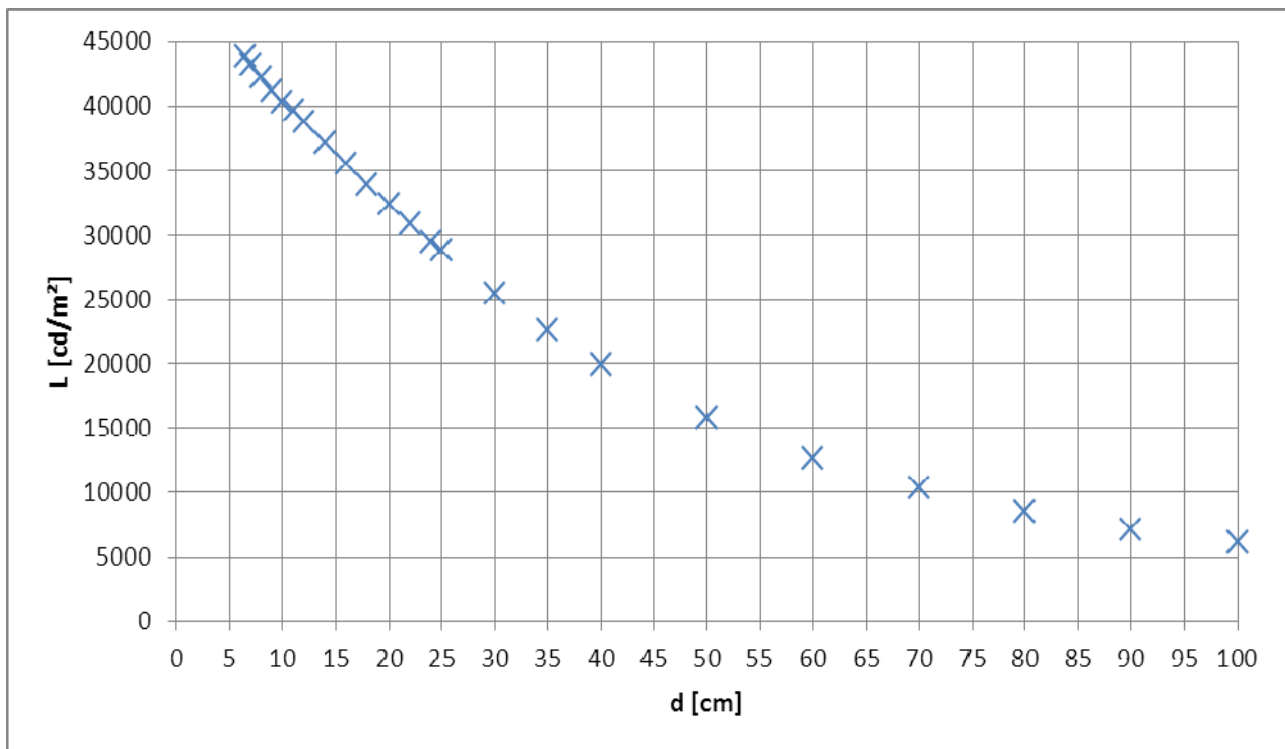


Bild 14: Distanzabhängigkeit der Leuchtdichte

Steuerung der Eingangsparameter

Der Betrieb mit höherem elektrischem Strom erhöht zwar den Lichtstrom, jedoch ebenfalls die Temperatur in der LED was zu einer vorzeitigen Alterung führt. Sowohl in Bezug auf die Schonung der LED wie auf mögliche Energieeinsparungen erschien es sinnvoll, den Einfluss einer Absenkung der Stromstärke auf Leuchtdichte und Differenztemperatur zu untersuchen.

Sämtliche Messungen der LEDs von Firma 1 wurden in der Betriebsart mit hohem Output mit einem Vorwärtsstrom von 350 mA (bei $I = 300$ mA ist der Betrieb auf hohe Effizienz ausgerichtet) durchgeführt. Stellvertretend wurde ein ungekühlter LED-Typ herausgegriffen und der Strom nun beginnend bei 350 mA in Schritten von 50 mA über

mehrere Messungen bis hin zu 100 mA gesenkt. Mit abnehmender Leistung sank gleichsam ΔT (Differenz zwischen T_C -Temperatur und Umgebungstemperatur).

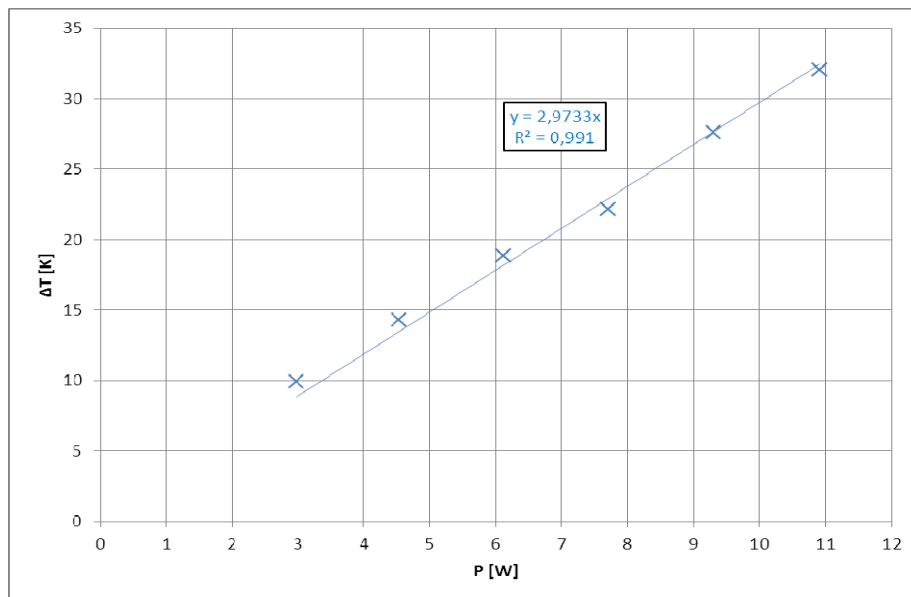


Bild 15: P- ΔT -Diagramm zur Stromabsenkung

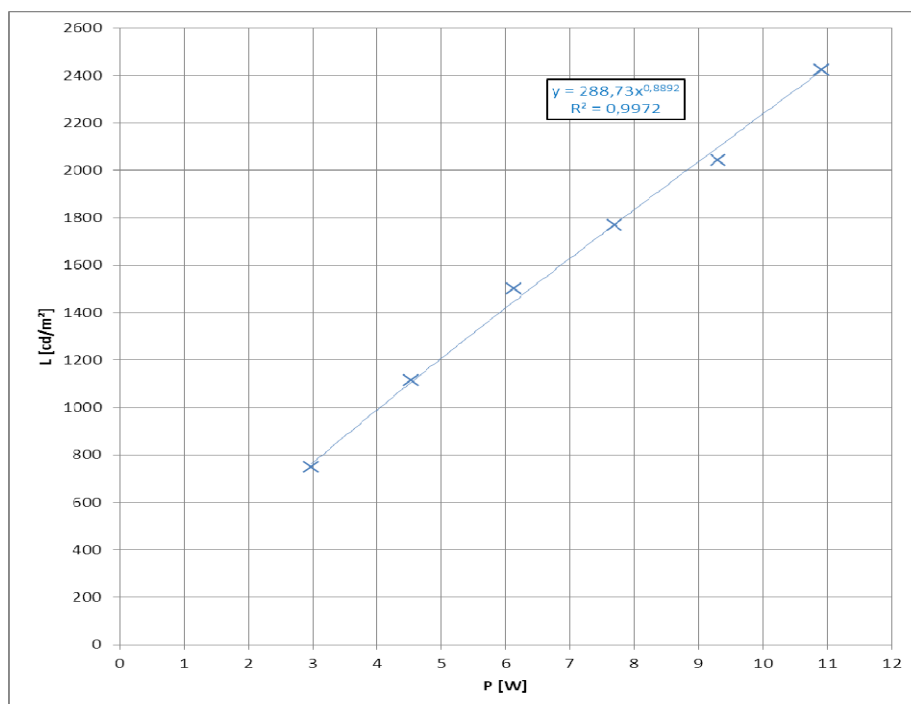


Bild 16: P-L-Diagramm zur Stromabsenkung

Analog war bei Leistungsrückgang auch eine Abnahme der Leuchtdichte zu verzeichnen. Aufgrund dieses linearen Zusammenhangs ist es einfach einzustufen, in welcher

Größenordnung eine Stromabsenkung durchzuführen ist, um eine spezifische Leuchtdichte zu erzielen. Somit können zukünftige Leuchtreklamen sowohl einfach an die Umgebungsleuchtdichte angepasst werden als auch den immer größeren Ansprüchen an den Immissionsschutz gerecht werden.

Reproduzierbarkeit und Reliabilität der Messungen

Reproduzierbarkeit beschreibt den grundlegenden Anspruch an eine wissenschaftliche Untersuchung unter gleichen Versuchsbedingungen (im Rahmen des zu erwartenden Messfehlers) gleiche Ergebnisse zu erlangen.

Zur Überprüfung der Stabilität wurde eine der Messungen herangezogen und zu fünf verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt. Die Auswahl fiel auf die Variante der mit Kühlkörper und Paste versehenen a 840-Leiste, da bei einem ersten Durchgang erhebliche Schwankungen in den Messergebnissen zu verzeichnen waren.

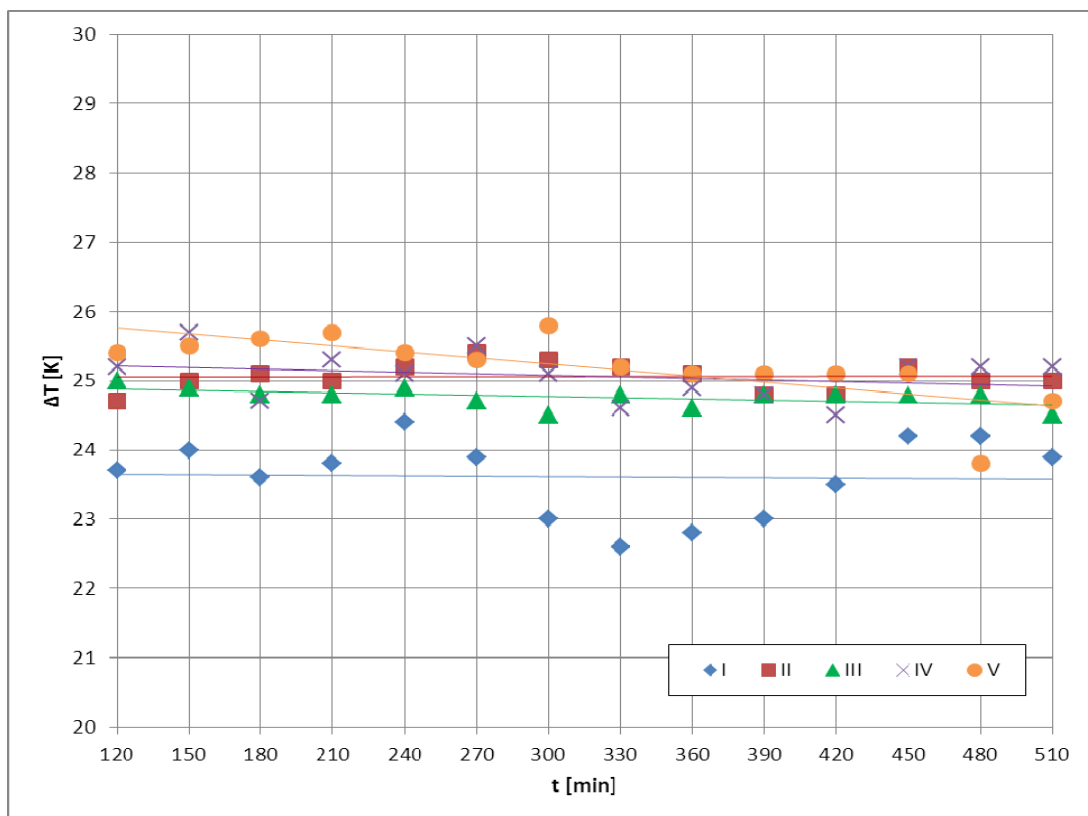


Bild 17: Messungen zur Reproduzierbarkeit – a 840 mit Kühlkörper und Paste

Nachfolgend wurde der Mittelwert der Messungen II bis V gebildet und dargestellt. Da am Tag der Messung I durch eine defekte Heizung erhebliche Temperaturschwankungen im Raum herrschten, wurde der Erstversuch vernachlässigt. Zum Vergleich wurde der Mittelwert jedoch zusätzlich unter Einbeziehung von Messung I gebildet und liefert erwartungsgemäß einen schlechteren Regressionskoeffizienten.

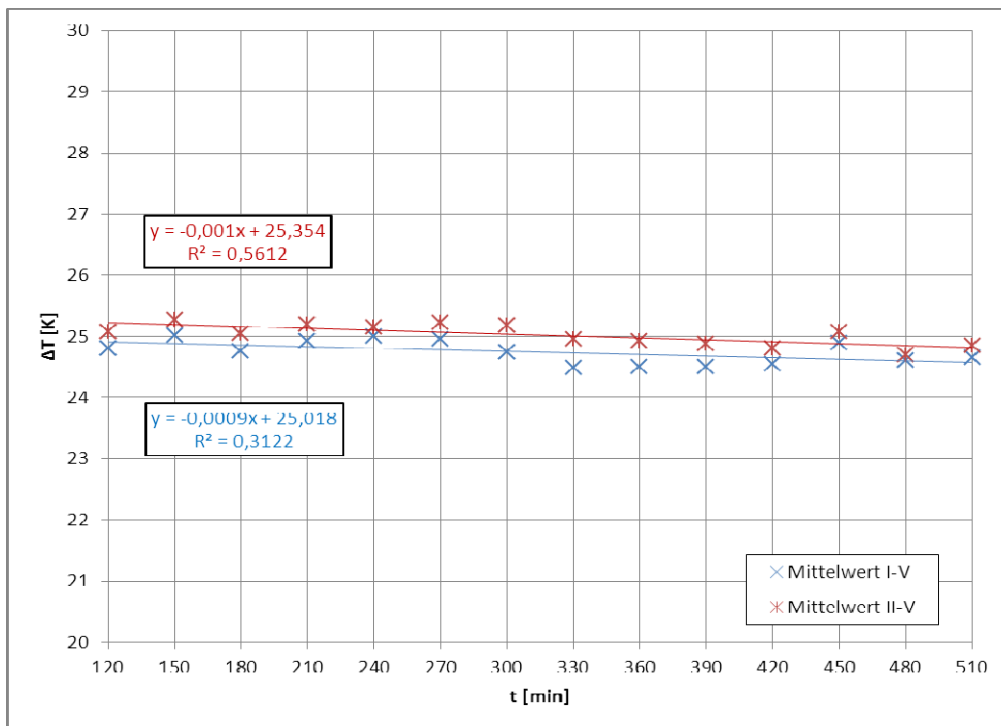


Bild 18: Messungen zur Reproduzierbarkeit - Mittelwerte a 840 mit Kühlkörper und Paste

Basierend auf der Systematisierung in der Aufnahme der Messwerte wurde erwartet, anhand des verwendeten LED-Typs und der jeweils angebrachten Kühlung die Ergebnisse noch nicht getätigter Messungen bereits so verlässlich abschätzen zu können, dass bereits erkennbar sei, welche Kühlung als ausreichend einzustufen sei bzw. ob überhaupt eine Wärmeabführung notwendig sei. Auch die maximal in der Umgebung zulässigen Temperaturen sollten so bereits grob zu beziffern sein.

Zur Erbringung des Nachweises der Äquivalenz der Messwerte wurden die Differenztemperaturen für zwei LED-/Kühlkörperkombinationen anhand bereits vorhandener Daten anderer Aufbauten mathematisch prognostiziert. Den Beleg der Anwendbarkeit dieser Methode brachten die nachträglich durchgeführten Messungen. Die

Differenz zwischen Erwartungswert und tatsächlicher Messung liegt im Mittel bei 1,38 Grad.

Die LED-Streifen von Hersteller 2 verfügen über zwei t_c -Punkte am Gehäuse. Zur Überprüfung dessen, ob Messungen an beiden Punkten die gleichen Ergebnisse erbringen, wurde anhand mehrmaliger Versuchswiederholung mit wechselnder Anbringung des Sensors eine mittlere Abweichung von 1,31 K zwischen den beiden Punkten in Erfahrung gebracht.

Da eine Abhängigkeit zwischen dem Lichtstrom φ und der Leuchtdichte besteht, fand als eine weitere Maßnahme zur Überprüfung der Reliabilität die Aufstellung eines L- φ -Diagrammes statt. Die Werte für den Lichtstrom wurden dabei den Datenblättern der Hersteller entnommen, die Leuchtdichten im Versuch gemessen. Dabei können die Angaben beider Seiten von Messfehlern behaftet sein. Die Erkennbarkeit der Korrelation zwischen den beiden lichttechnischen Größen durch Bildung einer Geraden hingegen stellt einen Nachweis für die Verlässlichkeit unserer Messungen dar.

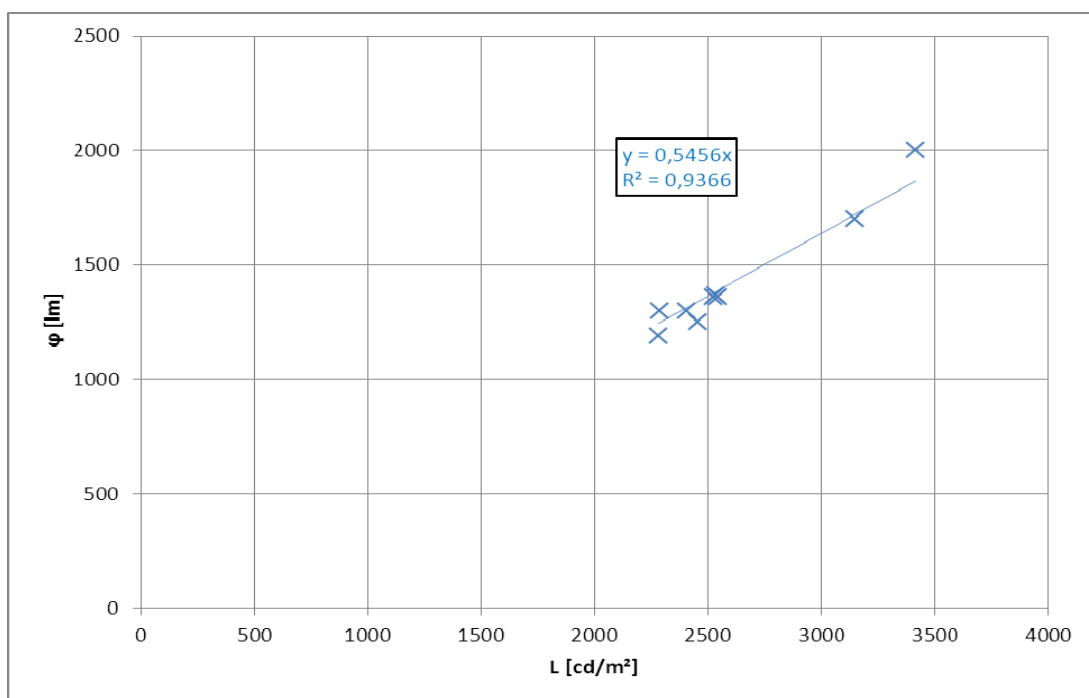


Bild 19: L- φ -Diagramm

Die beiden Module von Anbieter 2 verfügen nicht nur laut Datenblatt über einen höheren Lichtstrom, auch die an der Diffusorscheibe gemessene Oberflächenleuchtdichte übertraf die eingeschungenen Leuchtdichtewerte sämtlicher Leisten des Marktbegleiters.

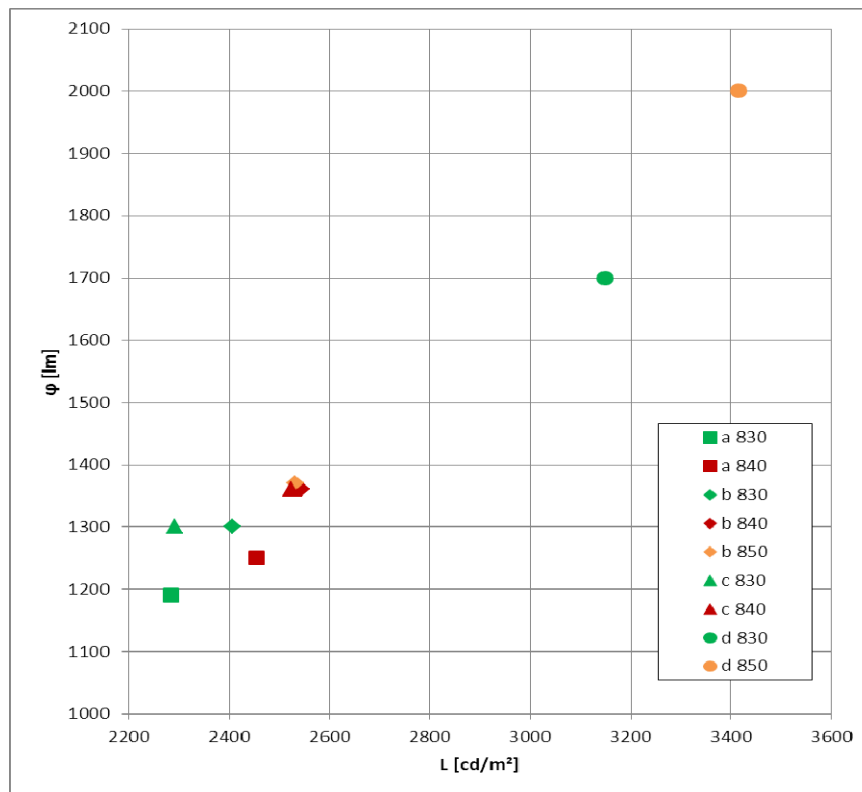


Bild 20: Detailansicht L- ϕ -Diagramm

Da die Angaben der Hersteller für den Lichtstrom auf eine konkrete Temperatur bezogen werden, müssten diese Werte für ϕ zur besseren Genauigkeit an unsere Messungen temperaturangepasst werden.

An dieser wie an vielen anderen Stellen kommt jedoch die Frage danach auf, inwieweit diese höhere Genauigkeit für uns als Unternehmen noch relevant ist und einen Nutzen birgt.

Fazit

Über den Verlauf der Versuche hinweg konnten stets weitere Verbesserungen in Bezug auf dessen Aufbau, die verwendeten Messgeräte und die Herangehensweise gemacht werden, um Sicherheit in der Durchführung zu gewinnen und die Genauigkeit der ermittelten Messwerte erhöhen zu können.

Auf Grundlage der gesammelten Daten lassen sich bei Materialwechsel (z.B. durch Lieferengpässe) auch alternative Hochleistungs-LED-Leisten systematisch in ihrem Temperaturverhalten abschätzen. So ist die Dimensionierung einer Kühlung für weitere Applikationen in Zukunft exakter und schneller durchführbar.

Abgesehen vom technisch-funktionellen Aufbau wurden auch Änderungen am System durch die Anpassung von Primärparametern wie der Stromstärke untersucht. So kann ein energieeffizienter Einsatz durch Anpassung der Helligkeit an die Umgebungsleuchtdichte über die Dimmung bzw. andere Steuerungen gewährleistet werden.

Der Betrieb der 30k-Variante des Hochleistungsstrahlers in kompakter Bauform kann für den Einbau in Bereichen mit Brandschutzklasse A1 oder auch in durch Schattenfuge hinterlüfteten Nischen als gesichert betrachtet werden.

Die nächsten Leistungsklassen stehen bereits in den Startlöchern. Erhöhte Packungsdichten und leistungsstärkere LED-Typen ermöglichen nicht nur einen Nachfolger mit einer Oberflächenleuchtdichte von 50.000 cd/m² sondern auch die bisher nur theoretisch existente 80k-Variante.