

LED in der Leuchte: Betrachtung anhand eines Downlight

Dr.-Ing. Ales Markytan, OSRAM OS GmbH Leibnitzstraße 4, 93055 Regensburg

Dipl.-Ing. Christoph Neureuther, OSRAM OS GmbH Leibnitzstraße 4, 93055 Regensburg

Dipl.-Ing. Rainer Nolte, TU Ilmenau, FG Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau

Durch die rasante Entwicklung der LED-Technologie in den letzten Jahren erkämpft sich die moderne Lichtquelle Akzeptanz und einen immer größeren Raum in der Lichttechnik.

Aus den verschiedenen Applikationen in der allgemeinen Beleuchtung wurde ein LED-Downlight ausgewählt, ein Referenzdesign aufgebaut, analysiert und der konventionellen Technik gegenüber gestellt. Der Abstrahlwinkel bei beiden Leuchten ist ebenfalls vergleichbar.

Der Durchmesser des Downlights wird auf 260 mm definiert. Es entspricht einer konventionellen Leuchte mit 2 x 18 W CFL (z. B. Fa. Spittler Lichttechnik). Die Höhe der LED Leuchte wird so niedrig wie möglich gehalten. Als Lichtquelle werden 37 High-power LEDs Golden Dragon Plus verwendet, um eine vergleichbare Anschlussleistung zu erzielen.

Es wird ein optisches Design mit einer am Markt befindlichen konventionellen Linse verwendet. Von den Linsen und der Leuchte wurden die Effizienzen und die LVK ermittelt.

Das thermische Management (passende Kühlkörper) wurde für den Downlight entsprechend ausgelegt und das elektrische Design wird mittels FR4 und thermischer Vias realisiert. Die LEDs werden in mehreren Stromkreisen verschalten, um dadurch die LVK verändern zu können.

Durch die Messungen am Goniofotometer wurden die UGR-Werte von dem LED-Downlight ermittelt.

Mechanisches Design

Das aufgebaute Referenzdesign enthält 37 LEDs und wurde in einem symmetrischen Abstand 35 mm horizontal und vertikal aufgeteilt. Die Leiterplatte hat einen Durchmesser von 260 mm, siehe Abb. 1. Die geometrischen Abmessungen sind dem Bild 2 zu entnehmen.

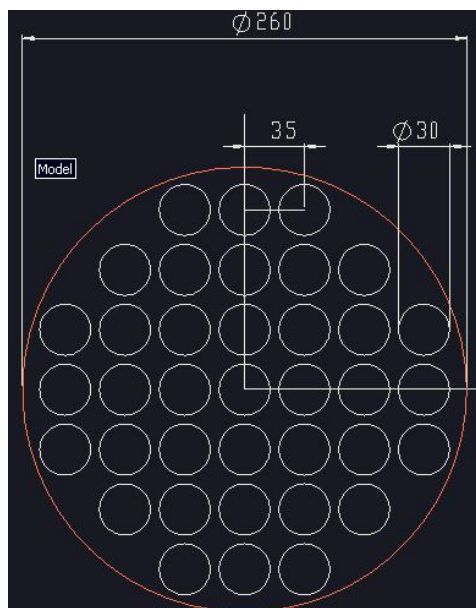


Abb.: 1

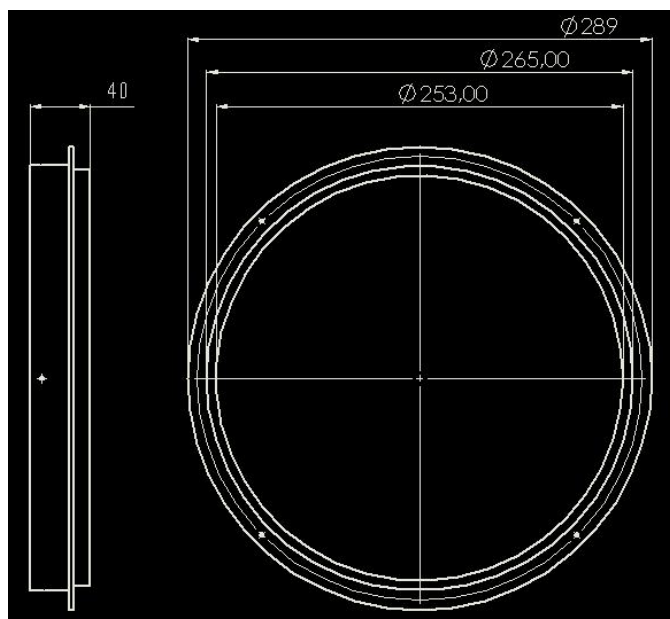


Abb. 2:

Optisches Design & Lichttechnik des LED Downlight

Das aufgebaute Downlight wurde mit LED Golden Dragon plus realisiert. Als sekundäres optisches Element wurden Linsen von der Firma Ledil Titanium M $\pm 13^\circ$, Titanium W $\pm 35^\circ$ verwendet. Die verwendeten Linsen wurden auf Ihre Effizienz und Abstrahlcharakteristik überprüft.



Abb. 3: LCW W5AM Golden Dragon Plus

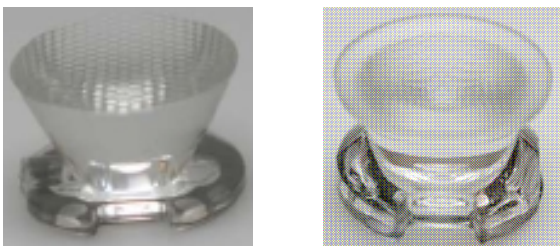


Abb. 4: Verwendete Linsen (Titanium M $\pm 13^\circ$ und Titanium W $\pm 35^\circ$) www.ledil.fi

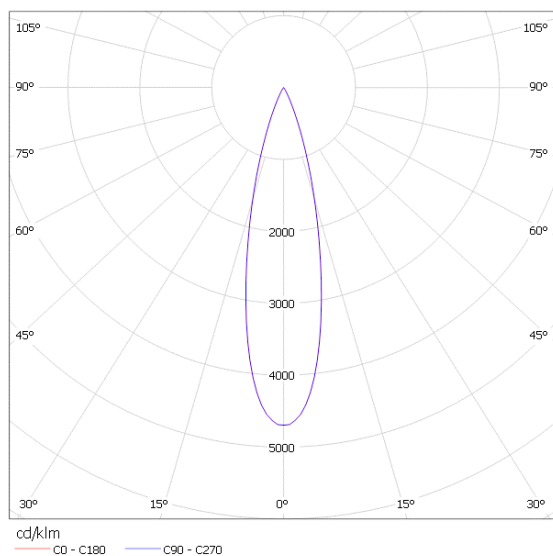
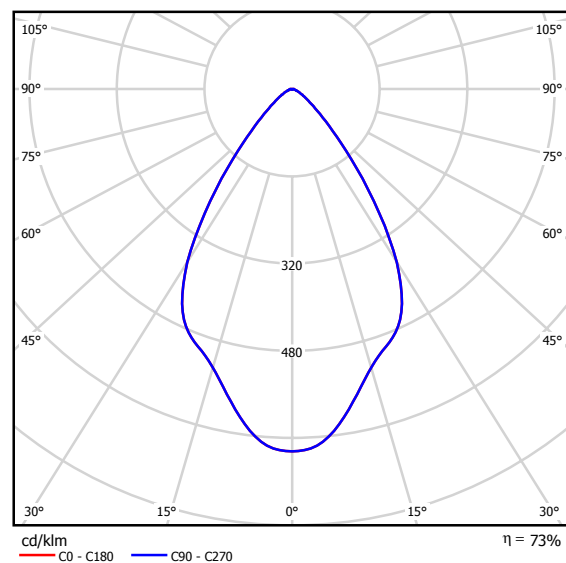


Abb. 5 Titanium M (Effizienz 91%)



TITANIUM W (Effizienz 73 %)

Die lichttechnischen Messungen wurden an der TU Ilmenau durchgeführt.

Um den Leuchtenwirkungsgrad des Downlights zu bestimmen, wurde die Platine mit den LEDs und dem Kühlkörper ohne der Optik und der Abdeckung im thermischen Gleichgewicht im Goniophotometer vermessen. Der gesamte Lichtstrom der Platine beträgt **3632 lm**. Die zweite Messung erfolgte mit der Optik und der Abdeckung. Bei Titanium M beträgt der Lichtstromwert **3305 lm** und bei Titanium W **2651 lm**. Anhand der Messungen wurde festgestellt, dass die richtige Auswahl der Linse für den Leuchtenwirkungsgrad entscheidend ist.

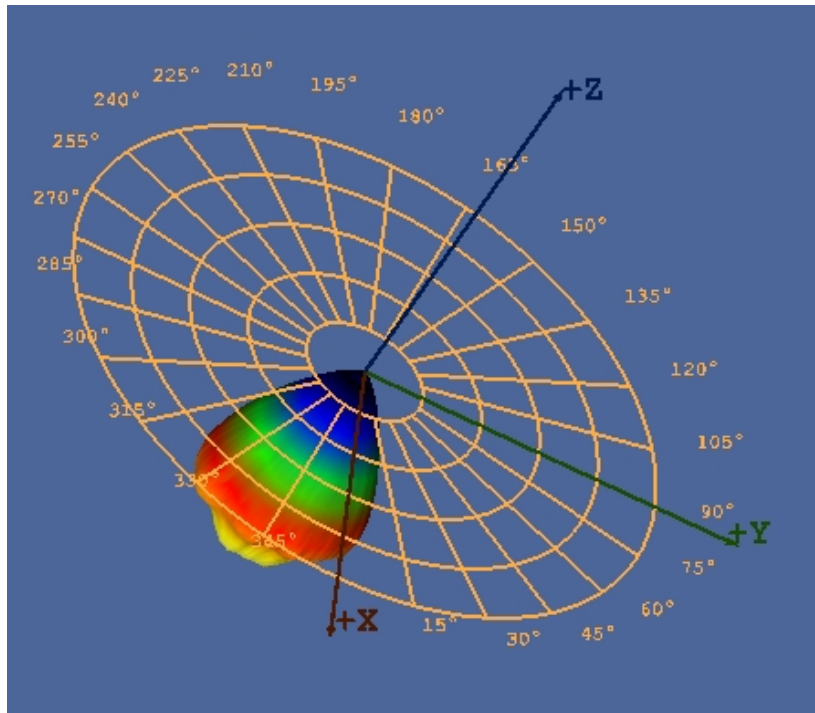


Abb.: 6 LVK in 3D Darstellung (Programm Fa. ILEXA)

Bei der Abschätzung der Leuchteneffizienz und des Lichtstroms kann man folgendermaßen vorgehen.

Bei 37 LEDs GD Plus LUW W5AM 116 lm at 350 mA
 Typ. color Temperature 6500 K
 Total luminous flux 116 lm x 37 = 4292 lm at T_j 25°C
 Total luminous flux with Thermal correction (Coeff. 0.85)
 $4292 \text{ lm} \times 0.85 = 3648.2 \text{ lm}$
 Optical efficiency 91 % Lenses Titanium M
 $3648.2 \times 0.91 = 3319.8 \text{ lm}$
 Total power Fixture 45.5 W (with ballast)
 $T_{\text{ambient}} = 25^\circ \text{C}$

Lichtausbeute:

73 lm/W

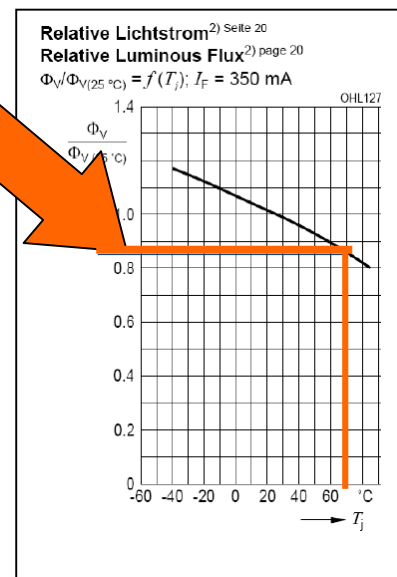


Abb.: 7 Abschätzung des Lichtstroms bei unterschiedlichen T_j

Thermische Auslegung der LED Leuchte

Um die LED Leuchte im sicheren Temperaturbereich zu betreiben, muss man die Kühlkörper folgendermaßen auslegen.

$$T_j \text{ max} = 125 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$T_a \text{ max} = 50 \text{ } ^\circ \text{C}$$

N = Anzahl der LED auf der Platine

$$P_{LED} = U_f (\text{Typ.}) \times I_f = 3.2 \text{ V} \times 0.350 \text{ mA} = 1,12 \text{ W}$$

$$P_{tot} = 1,12 \text{ W} \times 37 = 41,44 \text{ W}$$

$$R_{th JA} = (T_J - T_A) / P_{tot} \implies (125 \text{ } ^\circ \text{C} - 50 \text{ } ^\circ \text{C}) / 41,44 \text{ W} = 1,81 \text{ K/W}$$

$$R_{th JS} = 6,5 \text{ K/W GD plus}$$

$$R_{th SB} = 9,7 \text{ K/W FR4 mit thermischen Vias* und PAD 1500 ST Berquist}$$

$$R_{th JB} = (R_{th JS} + R_{th SB}) / N \implies (6,5 \text{ K/W} + 9,7 \text{ K/W}) / 37 = 0,44 \text{ K/W}$$

$$R_{th BA} = R_{th JA} - R_{th JB} = 1,81 \text{ K/W} - 0,44 \text{ K/W} = 1,37 \text{ K/W}$$

$$\text{Horizontale Anordnung 20 \%} \implies 1,37 \text{ K/W} \times 0,8 = 1,1 \text{ K/W}$$

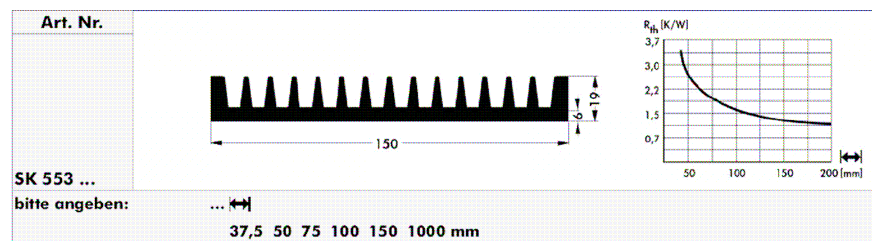


Abb.: 8 Abgeschätzter Kühlkörper Fischer Elektronik

*Thermische Vias = Thermische Durchkontaktierung, die einen thermischen Pfad mit niedrigen R_{th} bilden, der die Wärme von der Platinenoberseite, auf der die Led platziert ist, zur Kühlung auf die Rückseite führt.

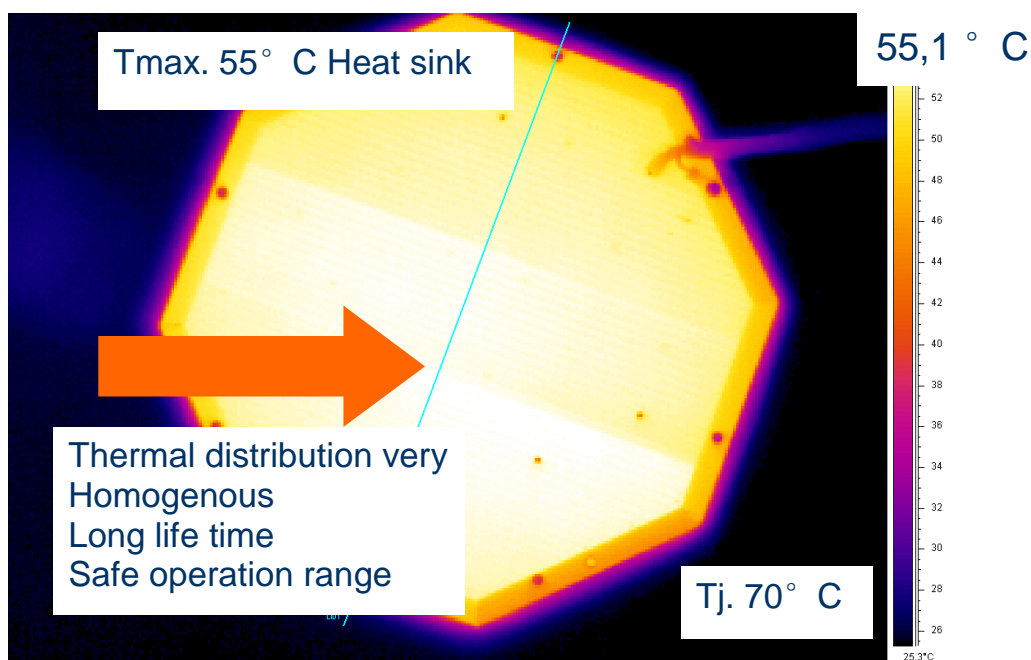


Abb.: 9 Gemessene Temperaturverteilung am Kühlkörper

Lichttechnische Untersuchungen am CFL Downlight

Es wurden lichttechnische Kennwerte wie die LVK und der Leuchtenwirkungsgrad ermittelt.

Gleichzeitig wurde die Lichtausbeute des gesamten Systems bewertet. Um festzustellen, wie die Lichtstromanteile in der Leuchte aufgeteilt werden und die LVK beeinflusst wird, wurde ein Reflektor mit schwarzer Farbe gespritzt.

Bei der Lichtstrommessung der 2 CFL Lampen 18W/OSRAM DULUX D/E mit Vorschaltgerät DULUX D/E 18 W 2 QTP-T/E 2x18 wurde ein Lichtstrom von **2475 lm** bei 38,6 W gemessen. Das entspricht der Lichtausbeute der beiden CFL Lampen von **62,5 lm/W**. Der gesamte Lichtstrom aus der Leuchte wurde mit **1774 lm** gemessen. Dies entspricht einem Leuchtenwirkungsgrad von **72 %**

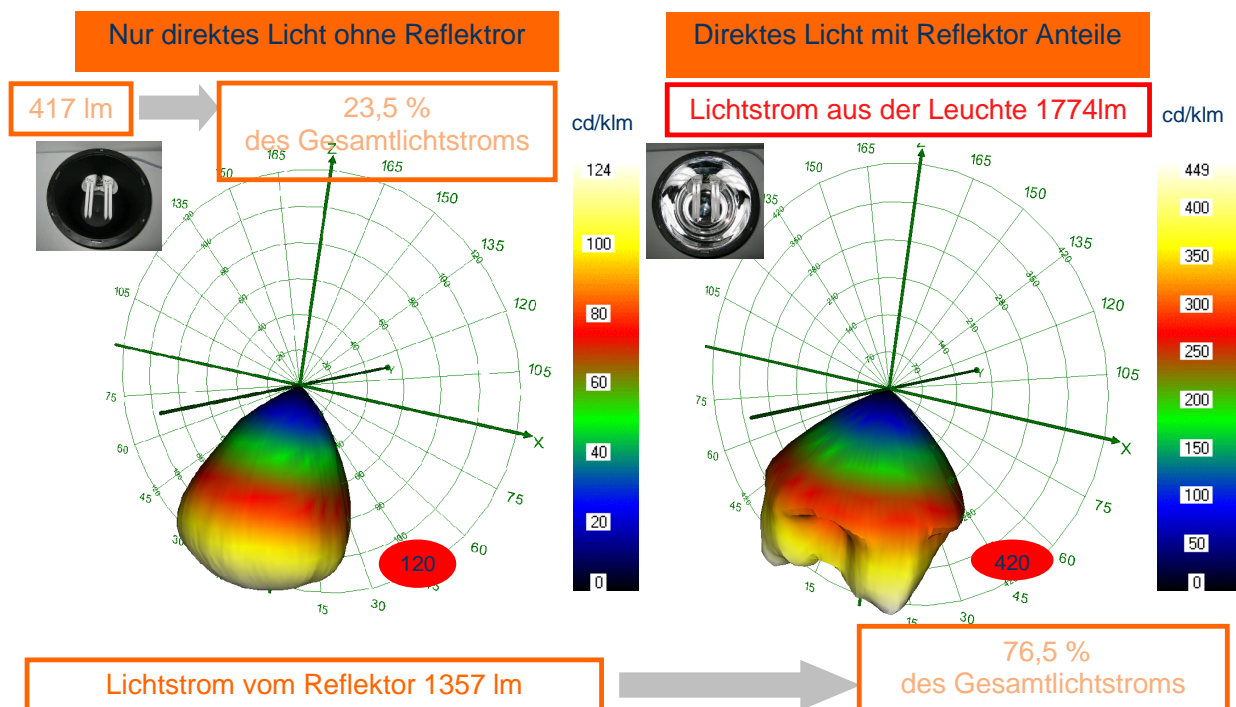


Abb.:10 Beispiel von der Lichtstromaufteilung in einem CFL Downlight der Fa. Spittler Lichttechnik

Lichtausbeute der Leuchte mit CFL:

45,9 lm/W

Zur Bewertung der beiden Systeme könnte man den Parameter **Lichtausbeute** wie bei den Lichtquellen verwenden. Dazu hätte man einen Abstrahlwinkel definieren müssen um neue Leuchtenklassen zu definieren.

Bei einem gleichen Lichtstrom von **1774 lm** könnte man die Anzahl der LED von 37 auf **15** reduzieren.

Thermische Messungen am Downlight

In Rahmen des Vergleiches zwischen den Technologien wurden thermische Messungen am konventionellen Downlight (Alu-Reflektor) durchgeführt. Die maximale Temperatur wurde mit 120 °C am Kolben gemessen. Aus der Abb. 12 sieht man deutlich, dass nicht nur die LED sondern auch die CFL eine Temperaturabhängigkeit aufweist. Bei 70°C Umgebungstemperatur hat man bei der CFL nur 65 % des maximal möglichen Lichtstroms.

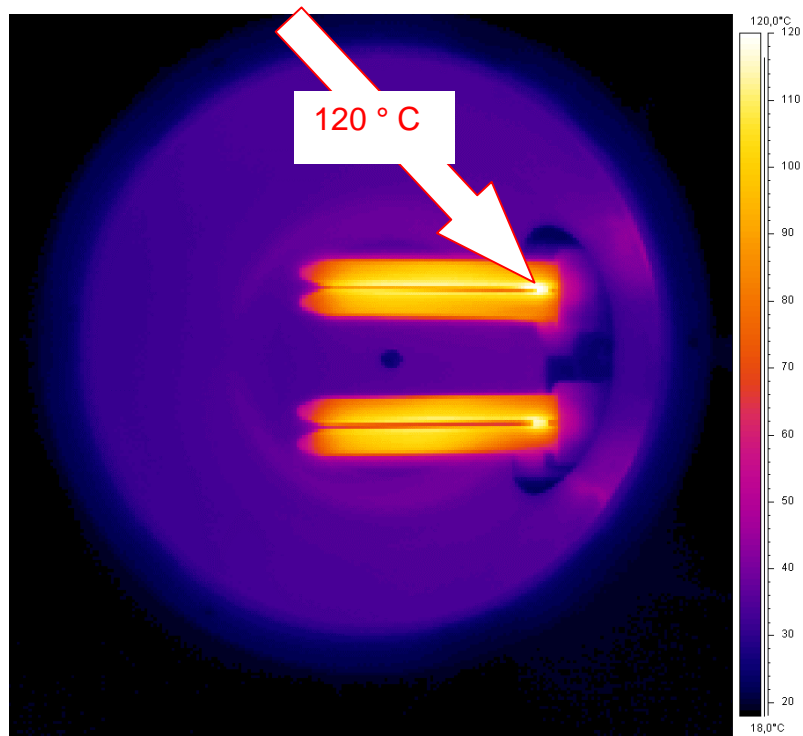


Abb. 11 Wärmeverteilung am CFL Downlight

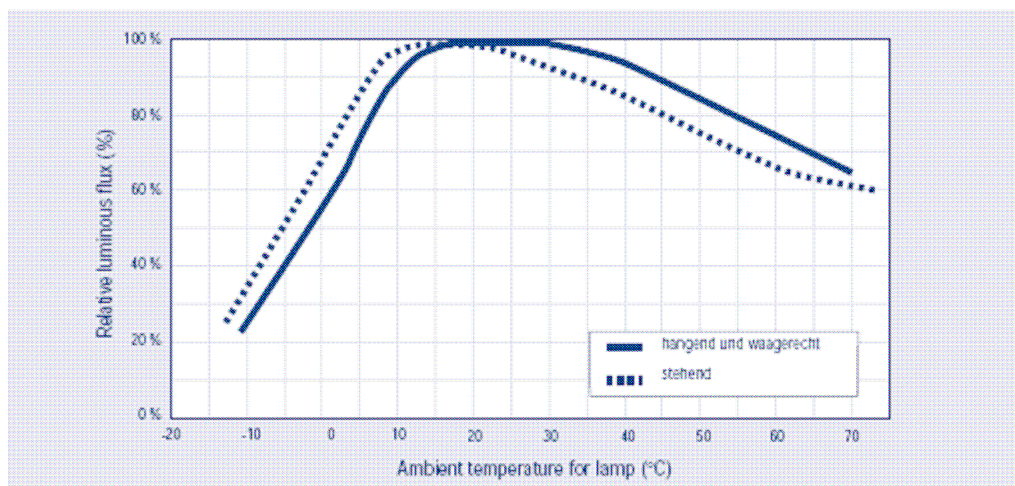


Abb. 12 Temperaturabhängigkeit der CFL DULUX allgemein T/E Lampe

Blendungsbewertung durch das UGR System

Das Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen (UGR-Verfahren) wurde eingeführt, als die LED in der Beleuchtung noch keine Rolle spielte. Es wurde vor allem an Leuchten mit großen, gleichmäßig leuchtenden Flächen auf der Basis von Leuchtstofflampen verifiziert. Betrachtet man dagegen eine einzelne LED, so ist hier die leuchtende Fläche um Größenordnungen geringer und die Leuchtdichte um einen bedeutenden Faktor größer. Wie in /1/ gezeigt wird, bedeutet eine Halbierung der Lichtaustrittsfläche bei einer gleichzeitigen Verdopplung der Leuchtenleuchtdichte eine Erhöhung des UGR-Wertes um ca. 2,4. Für den Einsatz der LED bedeutet dies also, dass zur Vermeidung der Direktblendung die Leuchtdichte verkleinert, die Lichtaustrittsöffnung vergrößert, eine möglichst gleichmäßige Leuchtdichteverteilung auf der Leuchtenoberfläche und eine tiefstrahlende Lichtstärkeverteilung realisiert werden sollte. Insbesondere eine gleichmäßige Leuchtdichteverteilung fällt bei der Verwendung von mehreren LEDs nicht leicht, da der Einsatz von streuenden Abdeckscheiben die Form der Lichtstärkeverteilung in Richtung breitstrahlend beeinflusst.

Mit der verwendeten Linse Titanium W mit einem Durchmesser von 26mm existiert auf der Leuchte noch eine relativ große Ungleichmäßigkeit in der Leuchtdichteverteilung, die berechneten UGR-Werte in Tabelle 1 sind jedoch so gering, dass von einer blendfreien Leuchte ausgegangen werden kann. Lässt man die Optik weg, dann steigen die berechneten UGR-Werte dramatisch an (Tabelle 2), wobei das UGR-Verfahren für diesen Fall keine Gültigkeit mehr besitzt (jede LED müsste als Einzelleuchte betrachtet werden und wäre dann deutlich kleiner als die geforderte Mindestgröße des Raumwinkels von 0,0003 sr) und die Blendwirkung noch größer sein wird.

Offen bleibt auch die Frage, was passiert, wenn jemand unter kleinen Blendwinkeln direkt in die LEDs schaut.

Hier besteht also Handlungsbedarf, das UGR-System entweder auf die Besonderheiten von LED Leuchten zu erweitern oder ein neues Bewertungssystem zu schaffen.

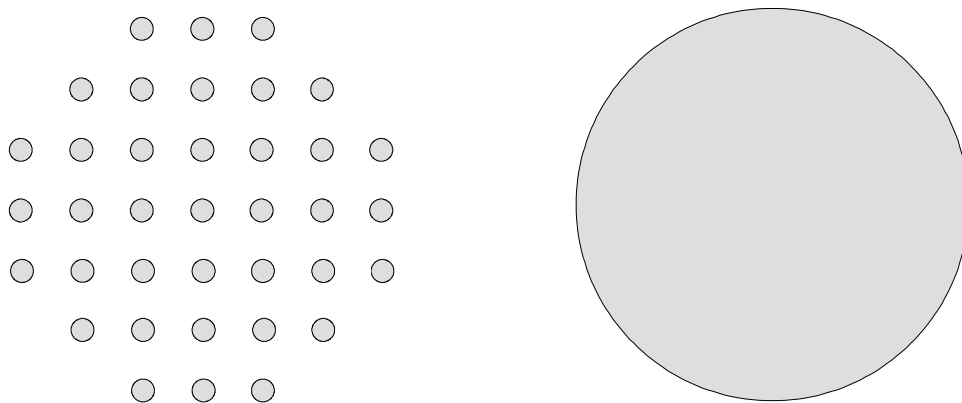


Abb. 13 Untersuchte Größe der leuchtenden Fläche der Linse der LED $d=5\text{mm}$, sekundäre Linse 26 mm, Streuscheibe 260 mm.

Leuchtende Fläche von LED Linse $\times 37 = 0,00072631 \text{ m}^2$

Leuchtende Fläche von LED und sekundäre Linse $\times 37 = 0,01961 \text{ m}^2$

Leuchtende Fläche von LED und Abdeckscheibe $= 0,0531 \text{ m}^2$

Glare Evaluation According to UGR											
ρ Ceiling		70	70	50	50	30	70	70	50	50	30
ρ Walls		50	30	50	30	30	50	30	50	30	30
ρ Floor		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Room Size X Y		Viewing direction at right angles to lamp axis					Viewing direction parallel to lamp axis				
2H	2H	6.4	7.2	6.7	7.4	7.6	6.4	7.2	6.7	7.4	7.6
	3H	6.4	7.1	6.7	7.3	7.6	6.4	7.1	6.7	7.3	7.6
	4H	6.4	7.0	6.7	7.3	7.5	6.4	7.0	6.7	7.3	7.5
	6H	6.3	6.9	6.7	7.2	7.5	6.3	6.9	6.7	7.2	7.5
	8H	6.3	6.9	6.6	7.2	7.5	6.3	6.9	6.6	7.2	7.5
	12H	6.3	6.8	6.6	7.1	7.4	6.3	6.8	6.6	7.1	7.4
4H	2H	6.4	7.0	6.7	7.3	7.5	6.4	7.0	6.7	7.3	7.5
	3H	6.4	6.9	6.7	7.2	7.5	6.4	6.9	6.7	7.2	7.5
	4H	6.3	6.8	6.7	7.1	7.5	6.3	6.8	6.7	7.1	7.5
	6H	6.3	6.7	6.7	7.1	7.4	6.3	6.7	6.7	7.1	7.4
	8H	6.3	6.6	6.7	7.0	7.4	6.3	6.6	6.7	7.0	7.4
	12H	6.3	6.6	6.7	7.0	7.4	6.3	6.6	6.7	7.0	7.4
8H	4H	6.3	6.6	6.7	7.0	7.4	6.3	6.6	6.7	7.0	7.4
	6H	6.2	6.5	6.7	6.9	7.3	6.2	6.5	6.7	6.9	7.3
	8H	6.2	6.4	6.7	6.9	7.3	6.2	6.4	6.7	6.9	7.3
	12H	6.2	6.3	6.6	6.8	7.3	6.2	6.3	6.6	6.8	7.3
12H	4H	6.2	6.5	6.7	6.9	7.3	6.2	6.5	6.7	6.9	7.3
	6H	6.2	6.4	6.6	6.8	7.3	6.2	6.4	6.6	6.8	7.3
	8H	6.2	6.3	6.6	6.8	7.3	6.2	6.3	6.6	6.8	7.3
Variation of the observer position for the luminaire distances S											
S = 1.0H		+3.8 / -6.9					+3.8 / -6.9				
S = 1.5H		+6.4 / -11.3					+6.4 / -11.3				
S = 2.0H		+8.4 / -15.1					+8.4 / -15.1				
Standard table		BK00					BK00				
Correction Summand		-9.4					-9.4				
Corrected Glare Indices referring to 3648lm Total Luminous Flux											

Tab. 1 UGR Werte des LED Downlights mit einem Abstrahlwinkel von $\pm 35^\circ$
(angenommener Durchmesser der leuchtenden Fläche 260 mm)

Glare Evaluation According to UGR											
ρ Ceiling		70	70	50	50	30	70	70	50	50	30
ρ Walls		50	30	50	30	30	50	30	50	30	30
ρ Floor		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Room Size X Y		Viewing direction at right angles to lamp axis					Viewing direction parallel to lamp axis				
2H	2H	22.5	24.1	22.9	24.3	24.6	22.5	24.1	22.9	24.3	24.6
	3H	25.6	27.0	26.0	27.3	27.6	25.6	27.0	26.0	27.3	27.6
	4H	27.1	28.5	27.5	28.8	29.1	27.1	28.5	27.5	28.8	29.1
	6H	28.4	29.6	28.8	30.0	30.3	28.4	29.6	28.8	30.0	30.3
	8H	28.8	30.0	29.2	30.3	30.7	28.8	30.0	29.2	30.3	30.7
	12H	29.0	30.1	29.4	30.5	30.8	29.0	30.1	29.4	30.5	30.8
4H	2H	23.5	24.8	23.8	25.1	25.4	23.5	24.8	23.8	25.1	25.4
	3H	26.8	28.0	27.2	28.3	28.7	26.8	28.0	27.2	28.3	28.7
	4H	28.5	29.5	28.9	29.9	30.3	28.5	29.5	28.9	29.9	30.3
	6H	29.9	30.8	30.3	31.2	31.6	29.9	30.8	30.3	31.2	31.6
	8H	30.3	31.2	30.8	31.6	32.0	30.3	31.2	30.8	31.6	32.0
	12H	30.6	31.4	31.0	31.8	32.2	30.6	31.4	31.0	31.8	32.2
8H	4H	29.1	30.0	29.6	30.4	30.8	29.1	30.0	29.6	30.4	30.8
	6H	30.7	31.4	31.1	31.8	32.3	30.7	31.4	31.1	31.8	32.3
	8H	31.2	31.8	31.7	32.3	32.8	31.2	31.8	31.7	32.3	32.8
	12H	31.6	32.1	32.1	32.6	33.1	31.6	32.1	32.1	32.6	33.1
12H	4H	29.2	30.0	29.7	30.4	30.9	29.2	30.0	29.7	30.4	30.9
	6H	30.8	31.5	31.3	31.9	32.4	30.8	31.5	31.3	31.9	32.4
	8H	31.4	32.0	31.9	32.4	33.0	31.4	32.0	31.9	32.4	33.0
Variation of the observer position for the luminaire distances S											
S = 1.0H		+0.1 / -0.1					+0.1 / -0.1				
S = 1.5H		+0.1 / -0.1					+0.1 / -0.1				
S = 2.0H		+0.2 / -0.3					+0.2 / -0.3				
Standard table		BK10					BK10				
Correction Summand		10.3					10.3				
Corrected Glare Indices referring to 3632lm Total Luminous Flux											

Tab. 2 UGR Werte des LED Downlights mit Abstrahlwinkel $\pm 85^\circ$ ohne
Blendungsbegrenzung (angenommener Durchmesser der leuchtenden Fläche 260 mm)

Elektronik

Die richtige Auswahl der elektronischen Komponenten einer LED basierten Leuchte ist hinsichtlich Energieeffizienz, Kosten und Lebensdauer des Gesamtsystems ein wichtiger Faktor.

Zwei getrennte Leiterplatten kommen im vorgestellten Downlight zum Einsatz:

- die LED Platine
- und
- die Vorschalt elektronik.

Aufgrund der relativ großen Platinenfläche wird FR4 Leiterplattenmaterial für die **LED Platine** als kostengünstige Alternative zu teuren Metallkernplatinen verwendet. Die FR4 Lösung mit thermischen Vias hat einen nur geringfügig höheren thermischen Widerstand als die Lösung mit einer Metallkernplatine. Es fehlt ihr allerdings die notwendige elektrische Isolation zwischen dem Heat Slug der LED und dem Kühlkörper. Diese Isolation muss durch ein isolierendes, thermisch leitendes Interface realisiert werden (in diesem Fall aus der Sil Pad – Reihe der Fa. Bergquist). Um den Wärmewiderstand zu reduzieren, wurde eine Dicke von 0.8 mm mit 35 µm Kupferauflage gewählt.

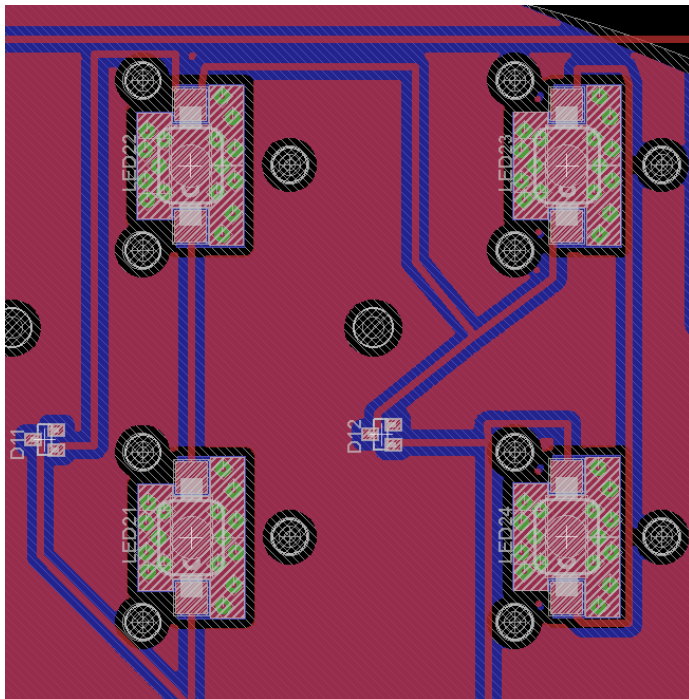


Abb. 14 Board Layout mit LED Thermal Vias Pad Design

Die LED sind auf der Leiterplatte in Reihe geschaltet. Um einen Ausfall der gesamten Reihe bei Einzelausfall einer LED zu verhindern, wurden immer zwei LED mit einer Zenerdiode antiparallel geschaltet. Bei Ausfall einer LED (open lead) wird die Zenerspannung überschritten und die Diode leitet und überbrückt damit den eventuellen offenen Kontakt der LED.

Als Steckverbinder zur Platine wurden hermaphroditische SMD Steckverbinder (Fa. Tyco) gewählt. Verbinder mit Kontaktstiften sind nicht geeignet, da diese auf der Platinenunterseite hervorstehen würden und die thermische Anbindung und elektrische Isolation verhindern würden. Die Kontaktstifte würden einen Luftspalt zwischen Platinenunterseite und Kühlkörper erzeugen und könnten die elektrische Isolation durchstoßen.

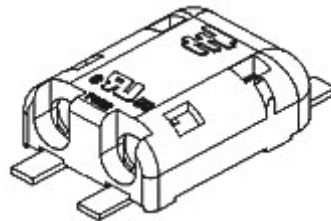
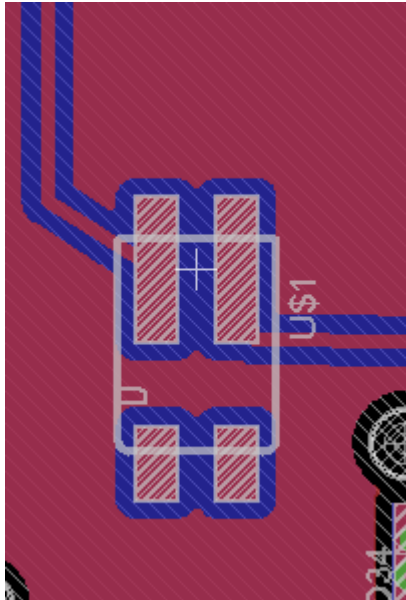


Abb. 15 SMD Steckverbinder Board Layout und Zeichnung

Die **Vorschaltелеktronik** besteht aus einer von Retronic und Supertex entwickelten Treiberschaltung, die die LED mit 350 mA Konstantstrom betreibt. Bei einer typischen Vorwärtsspannung der LED von 3.2 V entspricht dies 1.1 W pro LED.

Technische Daten des Vorschaltgeräts:

Eingangsspannung: 92-265VAC

LED-Spannung: 80-148V

LED-Strom: 350mA

Leistung: 52W maximal (entspricht 148V/350mA)

Die Schaltung besteht aus einem Leistungsfaktorkorrekturfilter, auch Power Factor Correction (im folgenden PFC-Stufe) genannt, mit nachgeschaltetem Tiefsetzer HV9910 von Supertex und Schnittstelle zur Dimmung. Eine neuere Variante dieser Schaltung verwendet den neueren HV9961, der eine Stromtoleranz von 4% ermöglicht. Die PFC Stufe ist für Beleuchtungseinrichtungen mit Schaltnetzteil (Klasse C nach EN 61000-3-2) ab 25 W Leistung notwendig.

Der Wirkungsgrad der verwendeten Elektronik liegt bei ca. 90% mit einem Power Factor > 0.97. Der LED Treiberbaustein verwendet die Pulsweitenmodulation (PWM) zum Dimmen der LED. Die PWM Dimmung ermöglicht eine hinsichtlich Farbort stabilere Dimmung als über eine lineare Dimmung des Betriebsstroms, da die Stromdichteabhängigkeit der Farborts dadurch ausgeschlossen wird. Die Ansteuerung erfolgt über eine 1..10V-Schnittstelle, die intern in ein PWM-Signal umgewandelt wird. Das Verhältnis der PWM Frequenz zu Schaltfrequenz muss hinsichtlich Flickerfrequenz und Dynamikbereich der Dimmung abgestimmt werden.

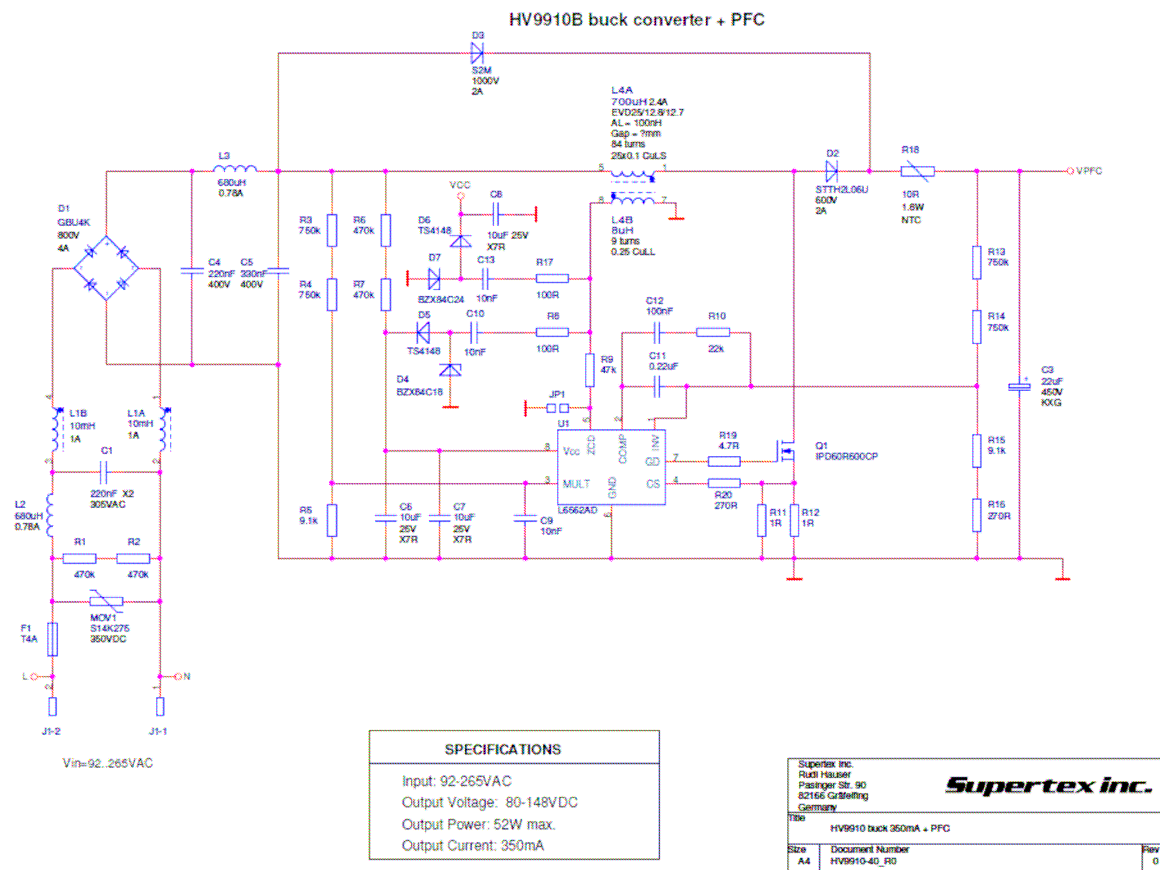
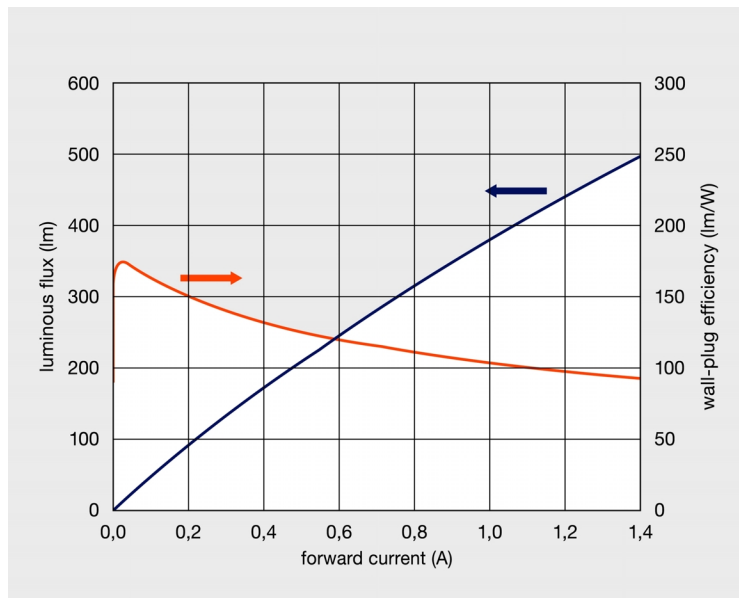


Abb.16 Schemazeichnung der Treiberschaltung

Fazit:

Im Gegensatz zur CFL bleibt die Effizienz der Leuchte bei geeigneter Wahl des Vorschaltgerätes auch im gedimmten Zustand erhalten. Bei Verzicht auf die Farbortkonstanz kann bei linearer Stromdimmung die Effizienz des Systems sogar steigen, da die thermischen Verluste geringer werden und die Effizienz der LED bei Abnahme der Stromdichte bis zu einem bestimmten Punkt steigt (siehe Abbildung 17).



© OSRAM Opto Semiconductors

Abb. 17 Lichtstrom und Wall Plug Effizienz, OSRAM Opto Semiconductors

Für Anwendungen mit häufigen Schaltzyklen für die Leuchte spielt die LED ihre Vorteile des sofort verfügbaren Lichtstroms und der dadurch nicht beeinträchtigten Lebensdauer besonders gut aus.

Wie die durchgeführten Untersuchungen zeigen, ist die LED-Downlight Ausführung deutlich effizienter (73 lm/W zu 45,9 lm/W) als die CFL Variante. Die Lichtausbeute kann man als einen geeigneten Bewertungsparameter verwenden. Wobei der Abstrahlungswinkel mit zu definieren ist.

Die geometrischen Abmessungen zeigen eine deutliche Reduktion in der Höhe (3,5 cm bei LED Downlight zu 17 cm in der CFL Ausführung).

Bei einem thermisch gut ausgelegten System betreibt man die LED im sicheren Bereich. Man sieht, dass nicht nur die LED, sondern auch die CFL eine Temperaturabhängigkeit aufweist.

Wo noch viel Forschungsbedarf besteht, ist die Entwicklung eines passenden Blendungsbewertungssystems, da das zurzeit geltende UGR-System nicht ausreichend ist.

Wir wollen uns bei der Firma Spittler Lichttechnik für das zur Verfügung gestellte CFL Downlight bedanken.

Literatur:

- /1/ LiTG Publikation 20:2003: Das UGR-Verfahren zur Bewertung der Direktblendung der künstlichen Beleuchtung in Innenräumen
- /2/ Applikation Guide Downlight OSRAM OS SSL AE LED
- /3/ Johannes Krückeberg, Hochleistung LEDs in der Praxis
- /4/ Rainer Huber, Thermal Management Workshop, V-Ing. – Tagung 29. – 30. März 2007