

# silence**lights.**

silence lights. GbR  
Hochleistungs-LED Lichttechnik

**Entwicklung, Herstellung und Praxistests einer  
Hochleistungs-LED Innenraumleuchte**

Abschlussbericht über ein Projekt,  
gefördert unter dem Az: 27246 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

**silence lights. GbR  
Hochleistungs-LED Lichttechnik**

## **Entwicklung, Herstellung und Praxistests einer Hochleistungs-LED Innenraumleuchte**

**Abschlussbericht über ein Projekt,  
gefördert unter dem Az: 27246 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>27246</b>	Referat	<b>22</b>	Fördersumme	<b>123.014,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Entwicklung und Prototyping einer Hochleistungs-LED-Innenraumleuchte mit optimierter Farbwiedergabe</b>			
<b>Stichworte</b>		Produkt Energie, Beleuchtung			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
<b>24 Monate</b>		<b>14.05.2009</b>		<b>Mai 2011</b>	
Zwischenberichte				Projektphase(n) <b>8</b>	
<b>Bewilligungsempfänger</b>		silence lights. GbR		Tel 06162/9692967	
		Klingerweg 30		Fax 06162/9692943	
		64853 Otzberg		Projektleitung	
				R. Haschert	
				Bearbeiter	
				R. Haschert	
<b>Kooperationspartner</b>		Technische Universität Darmstadt Fachbereich 18 Elektrotechnik und Informationstechnik (ETIT) Institut für Elektromechanische Konstruktionen (EMK) Fachgebiet Lichttechnik Hochschulstraße 4a 64289 Darmstadt			
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer modularen Innenraumleuchte mit energieeffizienten Hochleistungs-LEDs. Auch wenn bereits einige Hochleistungs-LED Innenraumleuchten auf dem Markt zu finden sind, gibt es keine Leuchte, welche als Ersatz für konventionelle Leuchten mit Leuchtstoffröhren, Kompaktleuchtstofflampen oder Halogenlampen eingesetzt werden könnten. Ein weiteres Ziel ist die Untersuchung des Farbwiedergabeindex (CRI). Denn nach aktuellen Erkenntnissen stellt sich die Frage, ob dieser überhaupt auf die LED anwendbar ist. Wir werden versuchen zu klären, wie hoch der CRI für Innenraumleuchten auf LED-Basis sein muss.					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
<b>Aufgaben silence lights. GbR</b>			<b>Aufgaben TU Darmstadt</b>		
Recherche: EU-Vorgaben, Arbeitsplatzbeleuchtung			Recherche Farbwiedergabe-Forschung		
Entwicklung modulares Gehäuse			Probanden-Tests zur Farbwiedergabe		
Technische Tests: Wirkungsgrade, Abstrahlcharakteristik			Begleitende lichttechnische Messungen		
Erstellung Steuerungskonzept			Erstellung Steuerungskonzept		
Pflichtenheft erstellen			Pflichtenheft erstellen		
Bau der Prototypen für Tests			Begleitende lichttechnische Messungen		
Entwicklung modulares Zubehör, TÜV-GS und CE			Tests in Büroräumen		
Dauertest: Aufbau, technische Überwachung; erste Vertriebsaktivitäten			Dauertest: Lichttechnische Messungen		
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

### **Ergebnisse und Diskussion**

Nach ausführlichen Recherchen zu aktuellen und geplanten Richtlinien für Kunstlicht am Arbeitsplatz, Anforderungen an die Funktionalität der Beleuchtung (Steuerbarkeit) sowie dem Erfassen von verbreiteten Bauformen von Arbeitsplatz-Leuchten konnte ein modulares Leuchtensystem entwickelt werden, welches in vielen Bereichen einsetzbar ist. Wobei das Augenmerk im Speziellen auf dem Ersatz bestehender Leuchten ohne große Umbaumaßnahmen an Decken oder der bestehenden Verkabelung lag. Ein weiterer Basispfeiler der Entwicklung war die Recherche bezüglich der aktuellen Farbwiedergabe-Definitionen und deren Anwendbarkeit auf LEDs.

Zur Überprüfung und Anpassung der ermittelten Daten wurden Probanden-Tests zur Definition des Begriffes »Farbwiedergabe« durchgeführt.

Mit den ermittelten Basisdaten konnten LEDs ausgewählt, modulare Systeme konzipiert, angepasste Vorschaltgeräte entwickelt und Steuerungssysteme ausgewertet und hergestellt werden.

Das Ergebnis der Entwicklung ist ein modulares Leuchtensystem, welches bestehenden Leuchten im Bezug auf die Umweltverträglichkeit und Rentabilität weit überlegen ist.

Durch den Einsatz dieses Systems könne bis über 60% Energie und CO<sub>2</sub> gegenüber der Leuchtstofftechnik eingespart werden. Nicht bezifferbar ist die Entlastung der Umwelt durch das gänzliche Ausbleiben von Schwermetallen bei der Entsorgung der Leuchtstoffröhren.

Durch die geringe Nachfrage von Steuerungssystemen ist der kommende Schritt sicherlich deren Verbreitung voranzutreiben, da durch diese noch mehr Energie, CO<sub>2</sub> und Sondermüll eingespart werden kann.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Aufgrund der Verzögerungen und der im Vorhaben definierten Langzeittest im Projekt wird mit der Öffentlichkeitsarbeit erst im Ende 2012 begonnen.

### **Fazit**

Die Ergebnisse des Projektes sind sehr aufschlussreich und liefern eine gute Basis für kommende Entwicklungen. Die aus dem Projekt hervorgegangene modulare Leuchtenserie kann in vielen Punkten Zeichen setzen. Sowohl im Bezug auf die Leuchteneffizienz als auch im Bezug auf die Rentabilität. Durch das während der Projektlaufzeit entwickelte neue Konzept des »Baugruppenträgers« können für fast jede Anwendung angepasste Leuchten geliefert werden, was gerade für den Ersatz von bestehenden Installationen von großem Vorteil ist.

Aufgrund des Laborumbaus am Fachgebiet Lichttechnik und der vollständigen Auslastung der Firma silence light. GbR entstand eine erhebliche Verzögerung im Zeitplan. Jedoch war es uns sehr wichtig alle möglichen Aspekte zu betrachten um am Ende ein wirklich vermarktbare Produkt zu erhalten und nicht nur ein Labormuster.

Leider besteht auch aktuell noch nicht die Möglichkeit eine TÜV Abnahme zu erhalten, da sich im Bezug auf die »Norm für Photobiologische Sicherheit« (EN 62471) noch zu keinem endgültigem Übereinkommen mit dem »TÜV SÜD Product Service« gekommen ist.

Die Installation in den Räumen der Sparkasse Dieburg bleibt weiterhin bestehen. Über eine Ausweitung der Installation über sämtliche Büroräume des Gebäudes wird bereits verhandelt.

Die Vermarktung ist ein generelles Problem bei der LED-Technik, welches hauptsächlich an den Investitionskosten oder an schlechten Erfahrungen mit LED-Leuchten »Made in China« scheitert.

Leider bedarf es viel Zeit einen Kunden davon zu überzeugen, dass er mit dieser neuen Technik bares Geld sparen kann. Viele Kunden wirtschaften nach dem Dogma des Investitionspreises und nicht nach Amortisationszeiten.

# Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt .....	03
Inhaltsverzeichnis .....	05
Literatur- und Bildverzeichnis .....	06
Erläuterungen zu Abkürzungen SI-Einheiten und Begriffen .....	07
Zusammenfassung .....	08
Einleitung .....	09
Hauptteil.....	11
Entwicklung modulares Gehäuse .....	12
Entwicklung LED-Leiterplatte .....	15
Probanden-Tests zur Farbwiedergabe .....	19
Entwicklung Vorschaltgeräte .....	21
Lichttechnische Messungen, Simulationen und Aufbau von Prototypen .....	25
Steuerkonzept und Dimmung .....	27
Herstellung der Gehäuse.....	32
Modulares Zubehör .....	34
TÜV-Prüfung der Prototypen .....	35
Tests in Büroräumen .....	36
Ergebnisse der Dauertests .....	41
Fazit .....	43

## Literatur– und Bildverzeichnis

- [Tex01] Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR) ASR A3.4, Wolters Kluwer Deutschland GmbH, 2012
- [Tex02] SGS Germany GmbH  
<http://www.sgs-cqe.de/en/pruefung-photobiologische-sicherheit.html>
- [Bod04] Bodrogi P, Csuti P, Horváth P, Schanda J, Why does the CIE Colour Rendering Index fail for white RGB LED light sources?. Proc. CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment, Tokyo, 2004.
- [Bod11] P. Bodrogi, S. Brückner, T. Q. Khanh, Ordinal scale based description of colour rendering, Color Research and Application, Vol. 36, Nr. 4, 2011.
- [CIE87] Commission Internationale de l'Éclairage, International Lighting Vocabulary (a joint CIE/IEC Publication), Publ. CIE 17.4-1987, 1987.
- [CIE95] Commission Internationale de l'Éclairage, Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, Publ. CIE 13.3-1995, 1995.
- [CIE07] Commission Internationale de l'Éclairage, Colour rendering of white LED light sources, Publ. CIE 177:2007, 2007.
- [Dav05] Davis W, Ohno Y, Toward an improved color rendering metric, Proc. SPIE 5941, 59411G.1-59411G.8, 2005.
- [Luo06] M. R. Luo, G. Cui, Ch. Li, Uniform Colour Spaces Based on CIECAM02 Colour Appearance Model, Color Res Appl 31, S. 320-330, 2006.
- [Sag06] Sagawa K. Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any level including mesopic vision. Ophthalmic & Physiological Optics 26: 240–245, 2006.
- [Abb. 19] AL9910 Calculator, Diodes Inc.  
[http://www.diodes.com/\\_files/calculators/WEB\\_AL9910%20Calculator%20r07.xls](http://www.diodes.com/_files/calculators/WEB_AL9910%20Calculator%20r07.xls)
- [Abb. 42] Design Guide - CapSense™ Buttons with CSD, Seite 1, Cypress Semiconductor by Mark Lee, 2008
- [Abb. 43] Design Guide - CapSense™ Buttons with CSD, Seite 3, Cypress Semiconductor by Mark Lee, 2008
- [Abb. 58] CP12197\_EVA-D, Ledil Oy  
<http://www.ledil.fi/node/2/p/3481>
- [Abb. 59] C12480\_MIRELLA-50-S-PIN, Ledil Oy  
<http://ledil.fi/node/2/p/4719>
- [Abb. 68] PLC-60 series, MEAN WELL Enterprises Co., Ltd.  
<http://www.meanwell.com/search/plc-60/default.htm>
- [Abb. 69] LPF-60 series, MEAN WELL Enterprises Co., Ltd.  
<http://www.meanwell.com/search/LPF-60/default.htm>

## Erläuterungen zu Abkürzungen SI–Einheiten und Begriffen

### Abkürzungen

LED	Light-Emitting-Diode
CCT	Correlated Color Temperature (in Kelvin)
CRI	Color Rendering Index (ohne Einheit)
PWM	Pulse-width modulation (Pulsweiten Modulation)
LVK	Lichtstärkeverteilungskurve
CFL	Compact Fluorescent Lamp (Kompakt Leuchtstofflampe)
PF	Powerfactor
SMD	surface-mounted device (Elektronisch Bauteile für die Oberflächenmontage)
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit

### SI-Einheiten

lm	lumen	Lichtstrom
lx	lux	Beleuchtungsstärke
cd	candela	Lichtstärke
W	Watt	Elektrische Leistung
K	Kelvin	Hier: Farbtemperatur
Hz	Herz	Frequenz

### Zusammengesetzte Einheiten

$W/m^2 \cdot nm$	spektraler Strahlungsfluss
lm/W	Lichtausbeute (Effizienz)
€/klm	Rentabilität (Euro pro 1.000 lumen)
Em[lx]	mittlere Beleuchtungsstärke

## Zusammenfassung

Nach ausführlichen Recherchen zu aktuellen und geplanten Richtlinien für Kunstlicht am Arbeitsplatz, Anforderungen an die Funktionalität der Beleuchtung (Steuerbarkeit) sowie dem Erfassen von verbreiteten Bauformen von Arbeitsplatz-Leuchten konnte ein modulares Leuchtensystem entwickelt werden, welches in vielen Bereichen einsetzbar ist. Wobei das Augenmerk im Speziellen auf dem Ersatz bestehender Leuchten ohne große Umbaumaßnahmen an Decken oder der bestehenden Verkabelung lag. Ein weiterer Basispfeiler der Entwicklung war die Recherche bezüglich der aktuellen Farbwiedergabe-Definitionen und deren Anwendbarkeit auf LEDs. Zur Überprüfung und Anpassung der ermittelten Daten wurden Probanden-Tests zur Definition des Begriffes »Farbwiedergabe« durchgeführt.

Mit den ermittelten Basisdaten konnten LEDs ausgewählt, modulare Systeme konzipiert, angepasste Vorschaltgeräte entwickelt und Steuerungssysteme ausgewertet und hergestellt werden.

Das Ergebnis der Entwicklung ist ein modulares Leuchtensystem, welches bestehenden Leuchten im Bezug auf die Umweltverträglichkeit und Rentabilität weit überlegen ist.

Durch den Einsatz dieses Systems könnte bis über 60% Energie und CO<sub>2</sub> gegenüber der Leuchtstofftechnik eingespart werden. Nicht bezifferbar ist die Entlastung der Umwelt durch das gänzliche Ausbleiben von Schwermetallen, welches bei der Entsorgung von Leuchtstofflampen freigesetzt werden kann.

Durch die geringe Nachfrage von Steuerungssystemen ist der kommende Schritt sicherlich deren Verbreitung voranzutreiben, da durch ausgereifte Steuerungssysteme noch mehr Energie, CO<sub>2</sub> und Sondermüll eingespart werden kann.

**Möglich wurde dieses Projekt durch die Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 27246 sowie durch die Kooperation mit dem Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt.**



## Einleitung

Energiesparen; CO<sub>2</sub> Reduktion. Nur zwei Schlagwörter, welche für jeden Wirtschaftsbetrieb mehr und mehr an Bedeutung gewinnen. Nicht nur alleine unsere Umwelt profitiert mittlerweile von Energieeffizienz und langlebiger Technik, sondern auch die Jahresbilanz, denn Energie ist zu einem knappen Gut geworden, dessen Preis noch weit vom Maximum entfernt ist.

Mit dem Fortschritt der LED-Technik bietet es sich an, eine Hochleistungs-LED Leuchte für die allgemeine Innenraumbeleuchtung, insbesondere für Büro und Gewerberäume zu entwickeln. Bei der derzeitigen Entwicklung des Energiepreises und der trotz des Einsatzes neuer Technik weiter zunehmenden Umweltverschmutzung, ist es wichtiger denn je, nicht nur nach neuen, effizienten und sauberen Energiequellen zu suchen, sondern auch den Verbrauch von Energie drastisch einzuschränken. Wenn dieses Vorhaben gelingt, werden auch Energiequellen interessant, welche zwar weniger Energie liefern als fossile Brennstoffe, im Gegenzug jedoch die CO<sub>2</sub> Emissionen stark reduzieren können.

Zur Zeit gibt es keine Hochleistungs-LED Innenraumleuchten, welche allen Anforderungen für die Allgemeinbeleuchtung gerecht werden könnten. Bei unserer Recherche sind wir zwar auf einige LED-Innenraumleuchten gestoßen, jedoch können nahezu alle gefundenen Produkte als generelle Innenraumbeleuchtung ausgeschlossen werden.

Dies hat mehrere Gründe. Der erste und wichtigste ist die geringe Lichtleistung und Effizienz der verwendeten LEDs. Ein weiterer wichtiger Grund ist das fehlende thermische Design der Gehäuse. Durch die geringe Priorität, welche dem Gehäuse als Kühlkörper zugestanden wird, verlieren die verarbeiteten LEDs erheblich an Lichtleistung. Und nicht zuletzt ist zu nennen, dass alle gefundenen Produkte über eine nicht annähernd ausreichende Farbwiedergabe, welche für Innenraumbeleuchtungen gefordert wird, verfügen.

Weitere Recherchen haben ergeben, dass die zurzeit verfügbaren LED-Innenraumleuchten von renommierten Herstellern für kleine und mittlere Unternehmen schlichtweg zu teuer sind. Das PreisLeistungsverhältnis ist, einfach ausgedrückt, miserabel. Unserer Ansicht nach, werden drei Typen von Innenraumleuchten benötigt:

1. Innenraumleuchte mit höchstmöglicher Effizienz bei akzeptabler Farbwiedergabe und Farbtemperatur.
2. Innenraumleuchte mit höchstmöglicher Farbwiedergabe bei akzeptabler Effizienz.
3. Innenraumleuchte mit angemessener Effizienz und Farbwiedergabe bei bestmöglichem Preis.

Im Zuge dieser Förderung möchten wir ein neues Grundkonzept für eine modulare Hochleistungs-LED Innenraumleuchte entwickeln. Dieses Konzept soll die drei obigen Anforderungen durch die Verwendung verschiedener LED-Typen erfüllen können. Kleine und mittlere Unternehmen benötigen Leuchten mit möglichst niedrigen Investitionskosten, das Gewerbe und die Industrie benötigt Leuchten mit hohen Anforderungen an die Farbwiedergabe und Effizienz. Jedoch kann schon jetzt gesagt werden, dass durch den Einsatz der LED-Technik die Wartungs- und Energiekosten in allen drei Anforderungsbereichen drastisch gesenkt werden können. Der modulare Aufbau des Gehäuses wird eine Nutzung in vielen Anwendungsbereichen zulassen und gleichzeitig die Investitionskosten für alle drei Anforderungsprofile senken.

Ziel des Projektes ist es ein Modulares Leuchtenmodul für vielseitige Einsatzzwecke in Büros, Industriehallen und Verkaufsräumen zu entwickeln. Durch diese modulare Bauweise kann die Leuchte in einem Gebäude für verschiedenste Zwecke genutzt werden und somit eine Reduktion der Investitionskosten für den Kunden bewirken. Durch angepasste Befestigungs- und Verbindungselemente und Blenden soll das Leuchtenmodul bis zu fünf verschiedene »Leuchten« ergeben. Das Leuchtenmodul soll zusätzlich durch Auswahl von verschiedenen LED-Typen und die Anpassung der Elektronik bis zu drei verschiedene Versionen (Preisklassen) ergeben.

Darunter eine kostengünstige Version, mit Inkaufnahme einer etwas schlechteren Energieeffizienz für einen niedrigen Verkaufspreis. Das Kostenlimit für diese Version soll 250,00 € nicht überschreiten. Des weiteren eine energieeffiziente Version mit höchstmöglicher Energieeffizienz bei Inkaufnahme eines höheren Verkaufspreises. Die Leuchteneffizienz soll einen Wert von 80 lm/W bei 60°C nicht unterschreiten. Optional soll eine »High-CRI« Version mit einem CRI > 80 entwickelt werden. Hierbei wird versucht den höchstmöglichen CRI bei Inkaufnahme einer niedrigeren Effizienz und eines höheren Verkaufspreises gegenüber den beiden anderen Versionen. Zusätzlich soll diese Version eine »Intelligenz« erhalten um das Licht nach Vorgaben selbst anzupassen (Sensorik).

Ein weiteres Ziel im Projekt ist die Entwicklung einer neuartigen, nicht auf dem Markt verfügbaren Stromversorgungseinheit. Diese könnte einen enormen Mehrwert bedeuten, da ein Einsatz in bestehenden Leuchten denkbar ist. Für diese Stromversorgungseinheit soll auf erprobte Topologien zurückgegriffen werden um eine hohe Langzeitstabilität zu gewährleisten. Wie auch die Leuchte, soll auch die Stromversorgung modular sein. Dies könnte beispielsweise durch die Einplanung eines Steckplatzes für ein Modul mit Mikroprozessor für erweiterte Steuer- und Regelaufgaben durch Benutzer und/oder Sensoren erreicht werden.

Die Stromversorgungseinheit sollte so entworfen werden, dass die Bestückung unterschiedlicher Bauteile möglich ist. Somit kann eine Anpassung der Elektronik an die geforderte elektrische Leistung erfolgen. Die angestrebte Effizienz liegt bei ca. 95%. Die Implementierung einer (aktiven) Phasenkorrektur (PFC) zur Kompensation von Blindleistung (auch bei kleinen Leistungsklassen  $\leq 30\text{W}$ ) sehen wir als sehr wichtig an.

Generell sollten Arbeitsstätten-Richtlinien für künstliche Beleuchtung erfüllt werden. Auch der Erhalt eines TÜV/GS Zeichens oder eines gleichwertigen Zertifikats ist angestrebt.

Ein allgemeines Ziel dieses Projektes ist es neue Erkenntnisse über die reelle Auswirkung des CRI-Farbwiedergabeindex durch Testreihen an verschiedenen Personen zu gewinnen.

Die bis zu drei verschiedenen Prototypen-Leuchten sollen vermessen und bewertet werden. Für Praxistests sollen 5-15 Leuchten hergestellt und in den Geschäftsräumen der Sparkasse Dieburg montiert werden. Somit versuchen wir die Akzeptanz über den Einsatz der LED-Technologie als Allgemeinbeleuchtung zu ermitteln. Als wirtschaftliches Ziel und Endergebnis dieses Projektes erwarten wir eine vermarktungsfähige Innenraumleuchten-Serie für diverse Einsatzgebiete.

Die Aufgaben der »silence lights. GbR« umfasst folgende Punkte:

- Recherche: EU-Vorgaben, Arbeitsplatzbeleuchtung
- Entwicklung modulares Gehäuse
- Technische Tests: Wirkungsgrade, Abstrahlcharakteristik
- Erstellung Steuerungskonzept
- Bau der Prototypen für Tests
- Entwicklung modulares Zubehör, TÜV-GS und CE
- Dauertest: Aufbau, technische Überwachung; erste Vertriebsaktivitäten

Die TU-Darmstadt wird sich mit folgenden Aspekten auseinandersetzen:

- Recherche Farbwiedergabe-Forschung
- Probanden-Tests zur Farbwiedergabe
- Begleitende lichttechnische Messungen
- Erstellung Steuerungskonzepte
- Tests in Büroräumen
- Dauertest: Lichttechnische Messungen

## Hauptteil

### Recherche EU-Vorgaben zur Arbeitsplatzbeleuchtung

Die Beleuchtungsnorm für Arbeitsplätze »DIN EN 12464-1« ist immer noch in der aktuellen Version gültig. Gravierende Änderungen sind laut des ZVEI in nächster Zeit nicht vorgesehen. Die Grundlagen der Arbeitsstätten-Richtlinie ASR 7/3 der Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution bauen ebenfalls auf der DIN EN 12464-1 auf. Im Leitfaden »Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR) ASR A3.4 Beleuchtung« wird auf den Bezug zur »DIN EN 12464-1:2003 Beleuchtung von Arbeitsstätten« mit folgendem Wortlaut hingewiesen:

*Die Anforderungen dieser ASR weichen in Einzelfällen von Normen, insbesondere von DIN EN 12464-1:2003 Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen sowie DIN EN 12464-2:2007 – Teil 2: Beleuchtung im Freien ab. Die DIN EN 12464 Teil 1 und 2 legen Planungsgrundlagen für Beleuchtungsanlagen fest, berücksichtigen aber nicht die Anforderungen, die an Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit zu stellen sind. [Tex01]*

Nach unserer Recherche kann jedoch gesagt werden, dass die oben beschriebenen Abweichungen von den einschlägigen Normen vernachlässigbar sind. Bei Prüfung der Einhaltung der geforderten Beleuchtungsstärken in der Praxis zeigte unsere Recherche, dass die Vorgaben teilweise bereits bei der Planung der Beleuchtungsanlagen nicht berücksichtigt wurden. Durch die Degeneration konventioneller Leuchtmittel nimmt die Beleuchtungsstärke proportional mit dem Lichtstrom über die Lebensdauer ab. Da in vielen Betrieben Leuchtmittel erst ausgewechselt werden, wenn diese total ausfallen kommt es häufig vor, dass die geforderten Beleuchtungsstärken aufgrund der Alterung der Leuchtmittel nicht mehr eingehalten werden. In vielen größeren Betrieben werden die Leuchtmittel oft zyklisch gewechselt um diesen Effekt zu kompensieren. Somit wird die Anforderung an die Beleuchtungsstärke generell eingehalten.

Eine genaue messtechnische Überprüfung der geforderten Beleuchtungsstärken gestaltet sich jedoch als recht schwierig, da eine Vielzahl von Messpunkten benötigt wird um die mittlere Beleuchtungsstärke auszurechnen, welche die Basis in den Normen und Richtlinien ist.

Die mittlere Beleuchtungsstärke wird hauptsächlich in Kombination mit der Gleichmäßigkeit für die Planung verwendet. Für korrekte Simulationen ist es wichtig die zu verwendende Leuchte auf einem Goniophotometer zu vermessen. Diese Daten können in einer Software eingelesen werden und somit kann ein Raum dann nach den einschlägigen Normen berechnet werden. Elemente im Raum selbst können zu Abweichungen von der Berechnung führen, wenn diese nicht mit eingerechnet wurden. Auch der effektive Reflektionsgrad von Wänden, Boden und der Decke kann in der Praxis zu Abweichungen führen.

Trotz aller theoretisch möglichen Abweichungen kann abschließend kann gesagt werden, dass die Planungswerte eines erfahrenen Lichtplaners sich mit messbaren Größen in der Praxis gut decken.

### Recherche zur Farbwiedergabe-Forschung

Neben dem Lichtstrom (gemessen in Lumen) und der ähnlichsten Farbtemperatur (engl. correlated colour temperature, CCT, gemessen in Kelvin) ist der Farbwiedergabeindex die dritt wichtigste Kenngröße zur Beschreibung weißer Lichtquellen. Ein wichtiges Arbeitspaket der TU Darmstadt umfasst die Aufarbeitung des aktuellen wissenschaftlichen Standes zum Thema Farbwiedergabedefinition.

Der in der Industrie akzeptierte und angewendete Standard zur Beschreibung der Farbwiedergabeeigenschaften einer Lichtquelle ist der CIE Colour Rendering Index (CRI) [CIE95]. Er simuliert die Beleuchtung von 8 verschiedenen Testfarben mit der zu testenden Lichtquelle und einer passenden Referenzlichtquelle. In einem zweiten Schritt werden die Farbunterschiede zwischen der Erscheinung unter Test- und Referenzlichtquelle bewertet. Eine sehr gute Lichtquelle weist keine Farbunterschiede auf, in diesem Fall wird ein Indexwert von  $R_a=100$  zugeordnet (Maximalwert).

Verschiedene Untersuchungen zeigen Schwächen des CIE CRI Algorithmus [CIE07, Bod04]. Dies betrifft vor allem die teilweise fehlerhafte „Einsortierung“ von farbigen und weißen LEDs auf der CRI-Skala. Bei der Entwicklung des aktuellen CIE CRI in den 1960er Jahren waren nur Glühlampen und Leuchtstofflampen verfügbar, noch keine LEDs.

Zum einen wird innerhalb der CIE international innerhalb des Technical Committees TC 1-69 an einer Neudefinition des Farbwiedergabeindex gearbeitet. Das ist nicht Schwerpunkt dieses Projektes. Zum anderen sind auch Vorschläge abseits der traditionellen Farbwiedergabe-Definition verfügbar. Als Beispiele seien hier die Color Quality Scale (CQS) [Dav05] der amerikanischen NIST und der Color Flattery Index von Judd genannt. Validierende visuelle Versuche zeigen jedoch, dass diese Ansätze nicht gut zur Beschreibung der Farbwiedergabe im Sinn der traditionellen CIE-Wortdefinition [CIE87] geeignet sind.

Für dieses Projekt wurde der Weg gewählt, eigene visuelle Versuche zur Farbwiedergabe durchzuführen. Auf diesem Weg werden Fragestellungen geklärt, die speziell für die Entwicklung einer Innenraumleuchte auf LED-Basis wichtig sind.

### Entwicklung modulares Gehäuse

Das Gehäuse, besonders wenn es gleichzeitig zur Entwärmung der LED-Module dient, ist eine der wichtigsten Komponenten einer Hochleistungs-LED Leuchte. Aus diesem Grund haben wir in dessen Entwicklung viel Zeit investiert. Ziel war es ein Gehäuse zu entwickeln, welches zum einen alle technischen Anforderungen erfüllt und zum anderen den Preis der Leuchte nicht durch hohe Material- und Bearbeitungskosten unattraktiv für den Markt macht. Nach ausführlichen Recherchen zur Einbeziehung von Hoch-Wärmeleitenden Kunststoffen als Basismaterial für den Kühlkörper stellte sich heraus, dass diese sogar zum Großteil teurer und schwerer sind als Aluminiumlegierungen. Auch wenn durchaus Kunststoffe oder Nicht-Metalle verfügbar sind, welche sogar bessere thermische Eigenschaften als Aluminiumlegierungen aufweisen, waren diese meist mechanisch schwierig zu bearbeiten (z.B. Keramik oder Graphit). Aus diesem Grund griffen wir auch bei diesem Gehäuse auf die Aluminiumlegierung AlMgSi1 zurück, aus der ein Großteil unserer Leuchtgehäuse gefertigt wird.

Der Ursprüngliche Aufbau (Abb. 01) sollte aus einem »LED-Gehäuse« zur Entwärmung der LEDs und einem thermisch isolierten »Netzteilgehäuse« bestehen und somit ähnlich dem von uns patentierten Prinzip entsprechen, welches wir bereits erfolgreich bei unseren Straßenleuchten und Großflächenleuchten anwenden. Für das Netzteilgehäuse recherchierten wir unter der Einbe-

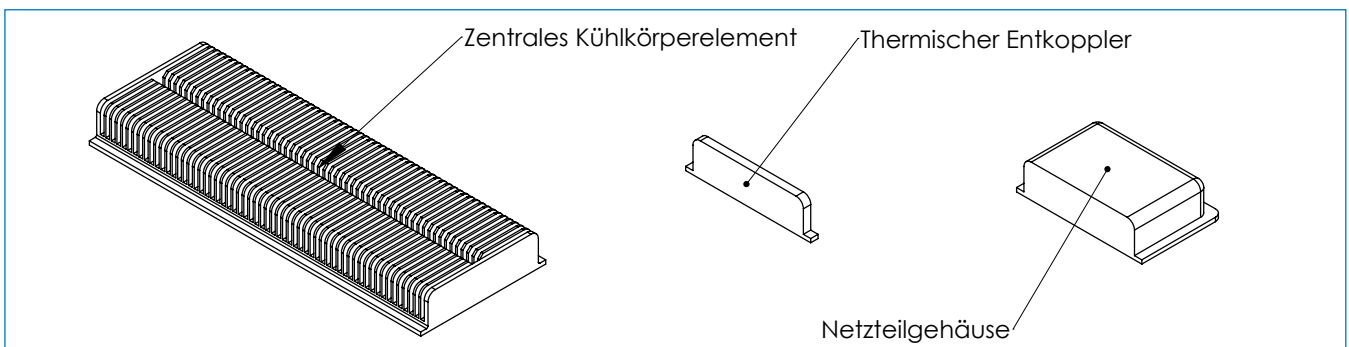


Abb. 01: Gehäuseelemente der Leuchte (Auszug aus bewilligtem Antrag)

ziehung von Composite Materialien (wie z.B. Carbonfiber). Hier stellte sich jedoch heraus, dass dieser Aufbau für Innenraumleuchten weder nötig noch geeignet ist.

Nach ausführlichen Vorabkalkulationen und Abschätzungen der Kühlleistung des im Antrag dargestellten LED-Gehäuses (Abb. 01, Zentrales Kühlkörperelement) zeigte sich, dass diese massive Ausführung zwar eine überragende Kühlleistung aufweist, jedoch im Bezug auf Materialkosten sowie Kosten für die Bearbeitung in keinem Verhältnis zum Einsatzzweck steht.

Da im Innenraum meist keine großen Anforderungen an die Schutzart gestellt wird, konnten wir auch auf das beschriebene thermisch entkoppelte Netzteilgehäuse verzichten.

Während der Vorabkalkulationen entwickelten wir ein neues Modulkonzept, welches auf einer Kombination aus den Materialien Aluminium und einfachem, pulverbeschichtetem Stahlblech beruht (Abb. 02 und Abb. 03). Aufgrund der geringen Kosten für Stahlblech und dessen einfa-



Abb. 02: LED-Modul und Netzteil im Baugruppenträger (Rückseite)



Abb. 03: LED-Module im Baugruppenträger (Vorderseite)

cher Verformbarkeit ist es möglich viele verschiedene »Baugruppenträger« auch schon in kleinen Stückzahlen herzustellen. Auch die Farbgebung kann mittels Pulverbeschichtung einfach angepasst werden.

Am einfachsten lassen sich mit diesen »Baugruppenträgern« Deckeinbauleuchten realisieren, wie es auch bei der Testinstallation in den Räumlichkeiten der Sparkasse Dieburg der Fall ist. Durch eine Abkantung der Seiten des Stahlbleches wird die nötige Stabilität gewährleistet. Der im Antrag dargestellte Aufbau (Abb. 04) hingegen würde zusätzlich zu dem massiven Kühlkörperelement mit Netzteilgehäuse noch eine Art Blende benötigen um die Leuchte in diversen Deckensystemen einsetzen zu können.

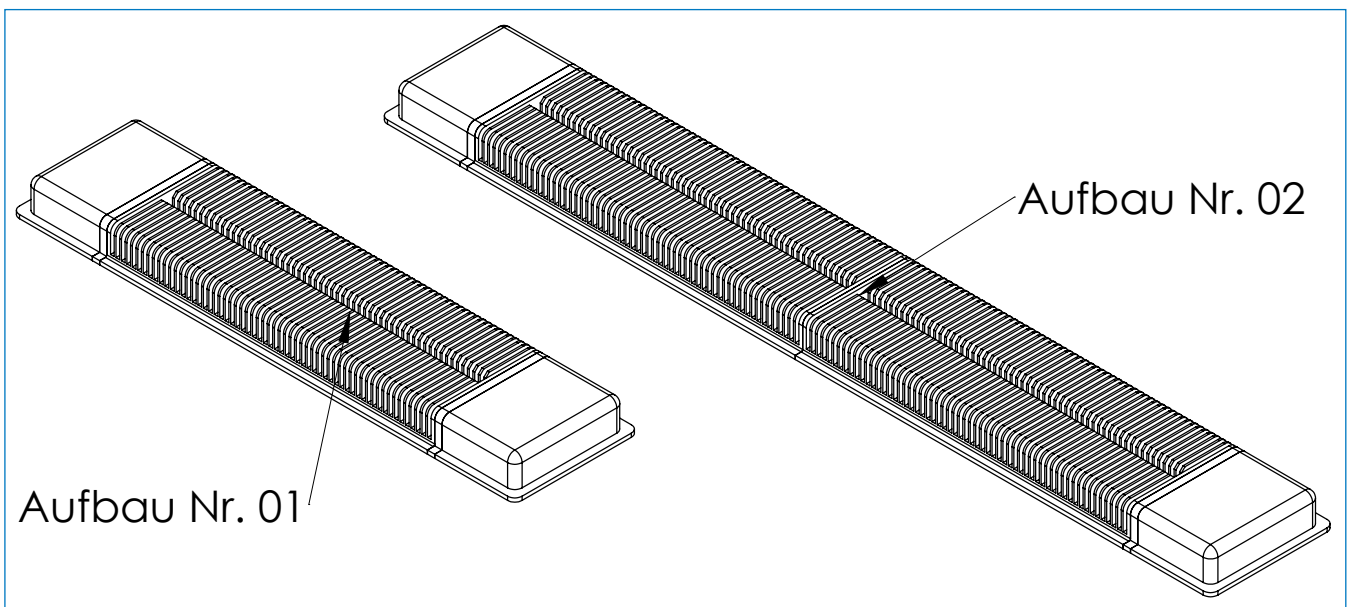


Abb. 04: Kombinationsmöglichkeiten der in Abb.01 dargestellten Einzelkomponente (Auszug aus bewilligtem Antrag)

Das zentrale LED-Modul (Abb. 05 und Abb. 06) lässt sich auch in kleinen Stückzahlen herstellen, da der Materialaufwand und die Fertigungskosten verhältnismäßig gering sind. Durch den modularen Aufbau werden auch Lagerhaltungskosten minimiert, somit kann eine Vielzahl von Leuchten angeboten werden, ohne jede Leuchte komplett lagern zu müssen. Lediglich der Baugruppenträger muss auf den jeweiligen Einsatzzweck angepasst werden (Abb. 07). Als thermischer Isolator dient bei diesem Aufbau die Luft.

Somit ist auch hier das Netzteil thermisch entkoppelt. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch diesen modularen Aufbau sogar mehrere Leuchten an ein Netzteil angeschlossen werden können. Dies reduziert nicht nur die Kosten, sondern steigert auch die Effizienz der Netzteile, da größere Leistungen effizienter transformiert werden können. Bei hohen Umgebungstemperaturen besteht auch die Möglichkeit eine aktive Kühlung an den LED-Modulen anzubringen. Dies sollte jedoch nur bei äußerster Notwendigkeit in Betracht gezogen werden, da Lüfter unerwünschte Geräusche erzeugen können.

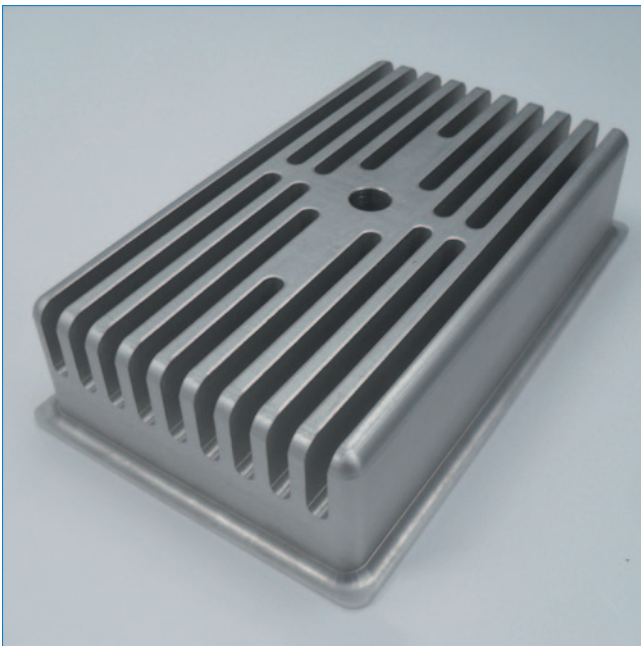


Abb. 05: LED-Modulgehäuse, Rohteil (Rückseite mit Kühlrippen)

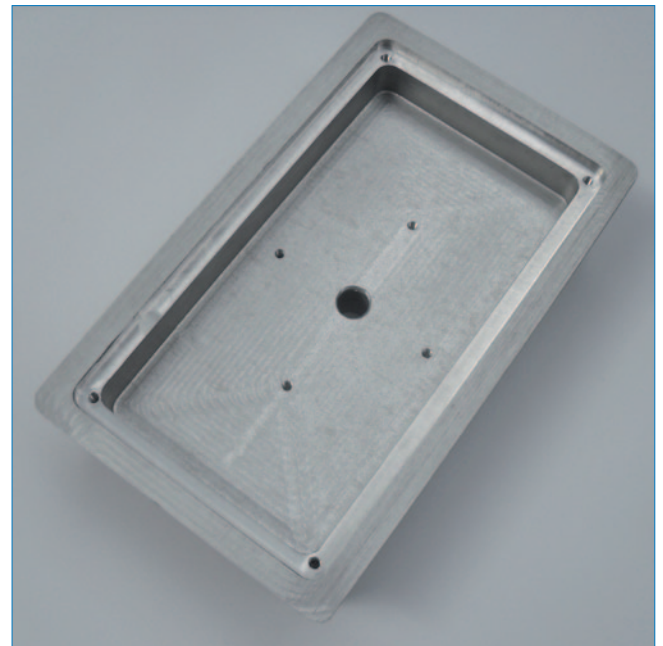


Abb. 06: LED-Modulgehäuse, Rohteil (Vorderseite)



Abb. 07: Baugruppenträger für modulare Paneldecken mit drei LED-Modulen

## Entwicklung LED-Leiterplatte

Die Auswahl des richtigen LED-Typs war ein weiterer wichtiger Faktor. Außer einer hohen Effizienz sollte die LED zusätzlich eine hohe Rentabilität aufweisen. Unter Rentabilität ist das Verhältnis vom Preis zum erbrachten Lichtstrom zu verstehen. Da der Lichtstrom in den Datenblättern der LED-Hersteller oftmals bei 25°C LED-Temperatur angegeben wird, was in der Praxis mit einer passiven Kühlung nicht erreichbar ist, hat die TU-Darmstadt einige aktuelle LED-Typen für dieses Projekt lichttechnisch vermessen. Durch die Ergebnisse der Messung (Abb. 08 - Abb. 11) konnten wir einen LED-Typ für dieses Projekt ermitteln. Zum Einsatz kommt der LED-Typ »XM-L« der Firma Cree Inc..

Trotz des hohen CRI der Osram LED, stand diese LED nicht zur Diskussion, da sie in allen anderen wichtigen Werten weit hinter dem Stand der Technik liegt, wie aus den folgenden Diagrammen hervor geht. Zur Anpassung des CRI, beziehungsweise des Licht-Spektrums, wurden Messungen mit weißen LEDs in Kombination mit farbigen LEDs durchgeführt.

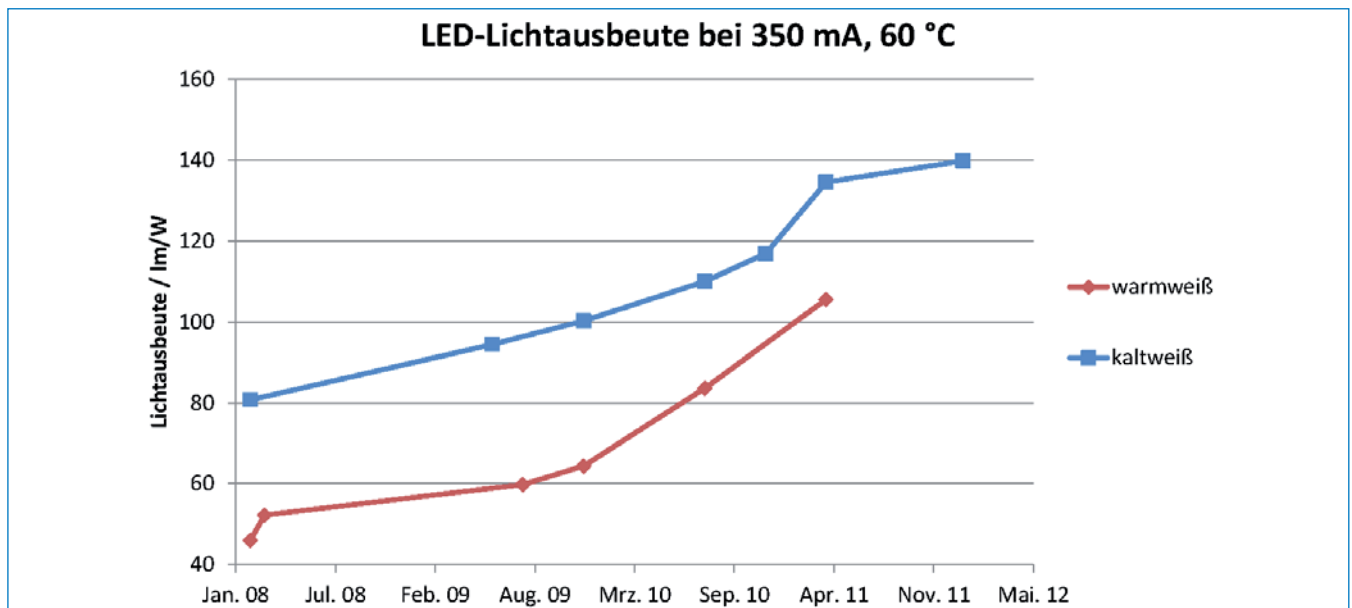


Abb. 08: Entwicklung der Lichtausbeute weißer LEDs in den letzten Jahren. (Messwerte der TU-Darmstadt unter realistischen Betriebsbedingungen von 350 mA Konstantstrom und 60 °C Kühlkörpertemperatur.)

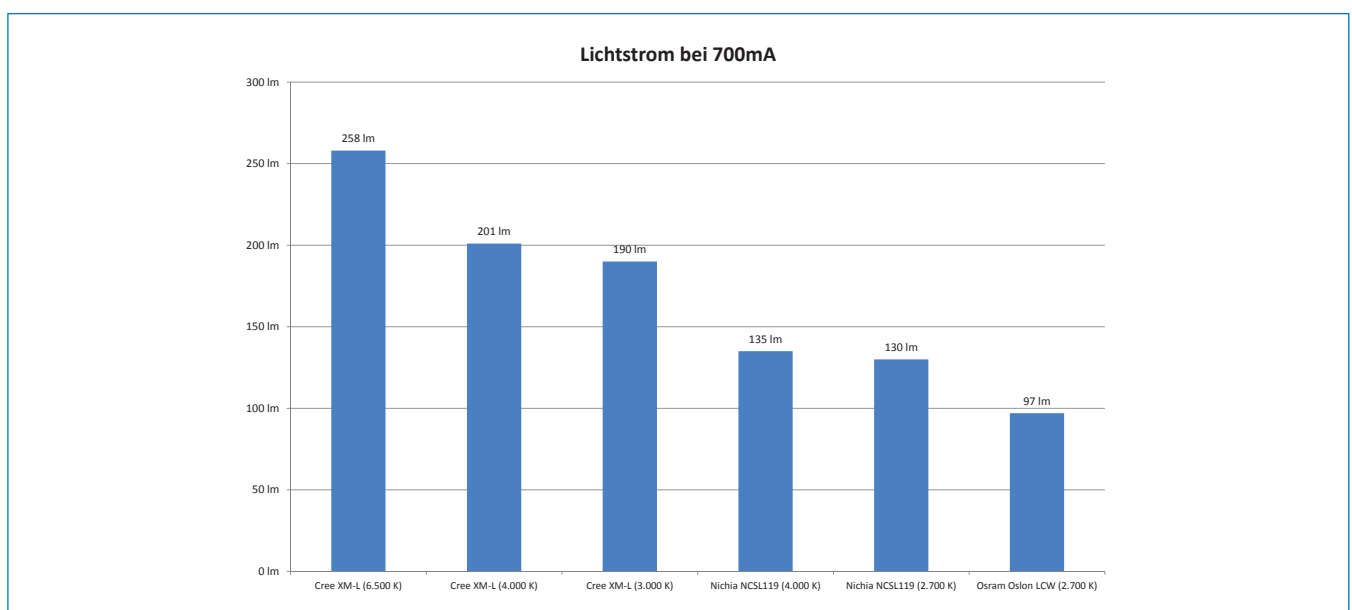


Abb. 09: Auszug aus den Messdaten zur Evaluierung des LED-Typs (Lichtstrom bei 700 mA Konstantstrom und 60 °C Kühlkörpertemperatur.)

Für das Layout der Leiterplatte auf welche die LEDs bestückt werden, mussten noch mögliche Anschlussstypen diskutiert werden. Hier kommen zum einen sogenannte »Lötpads« in Frage, welche die günstigste Alternative sind, da es sich hierbei um einfache Kupferflächen handelt, auf welche bei der Herstellung der Leiterplatte kein Schutzlack aufgebracht wird.

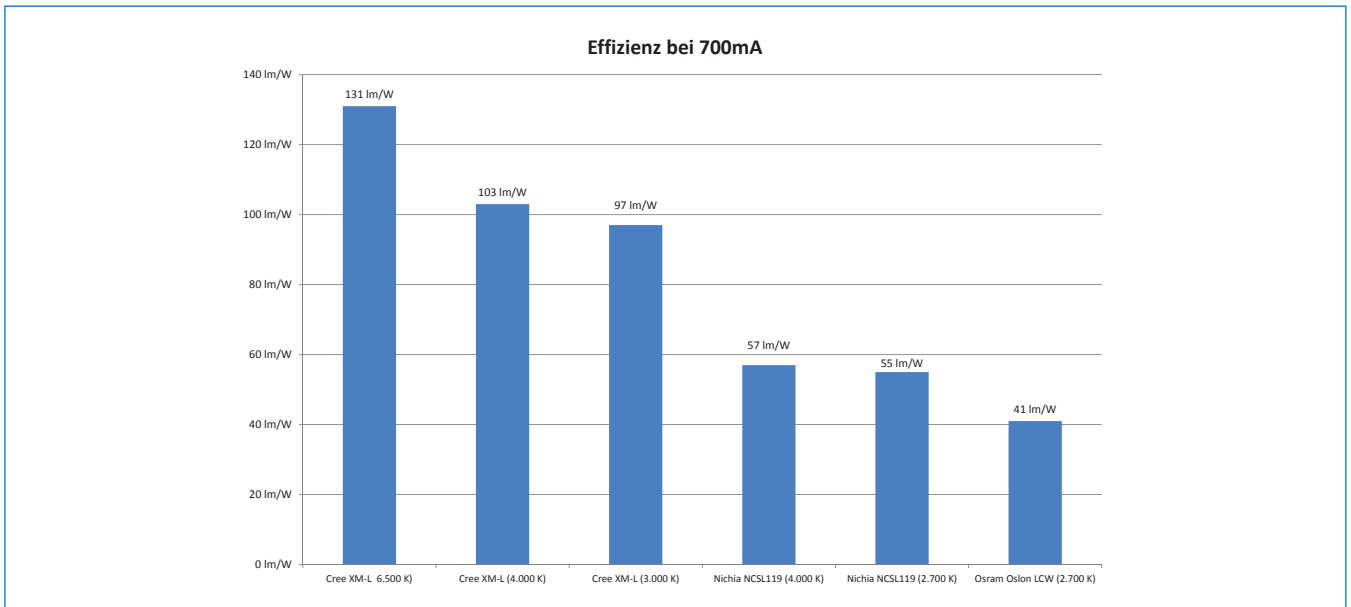


Abb. 10: Auszug aus den Messdaten zur Evaluierung des LED-Typs (Effizienz bei 700 mA Konstantstrom und 60 °C Kühlkörpertemperatur.)

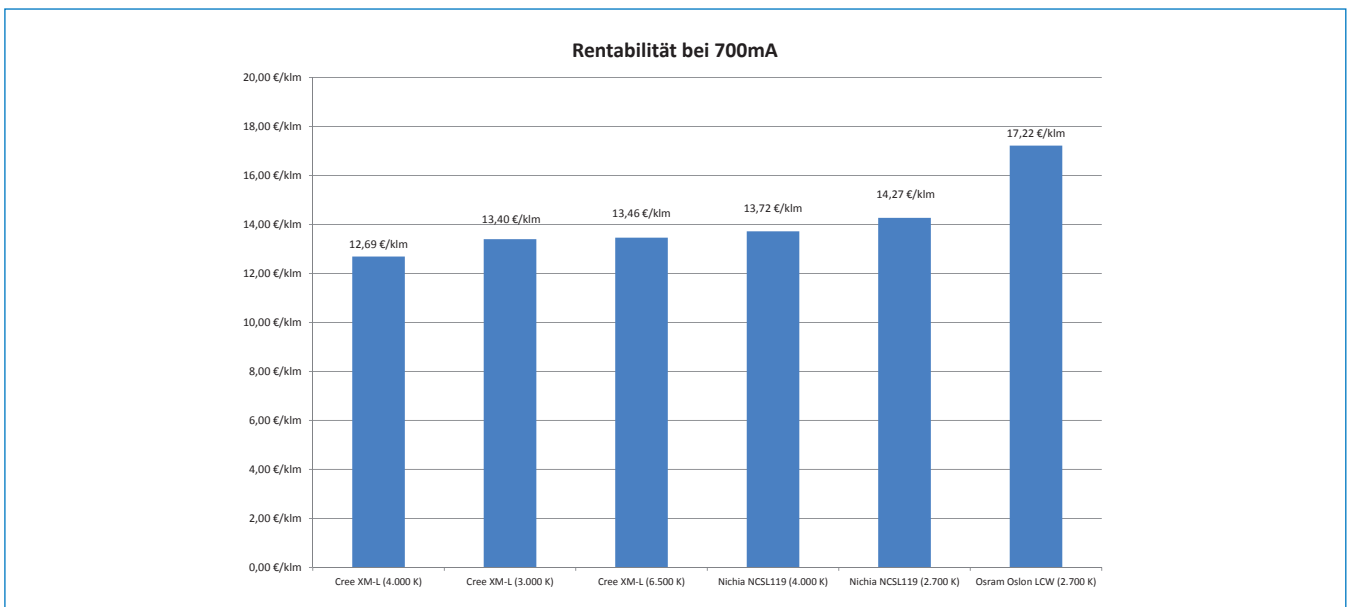


Abb. 11: Auszug aus den Messdaten zur Evaluierung des LED-Typs (Rentabilität Stand Q3/2011)

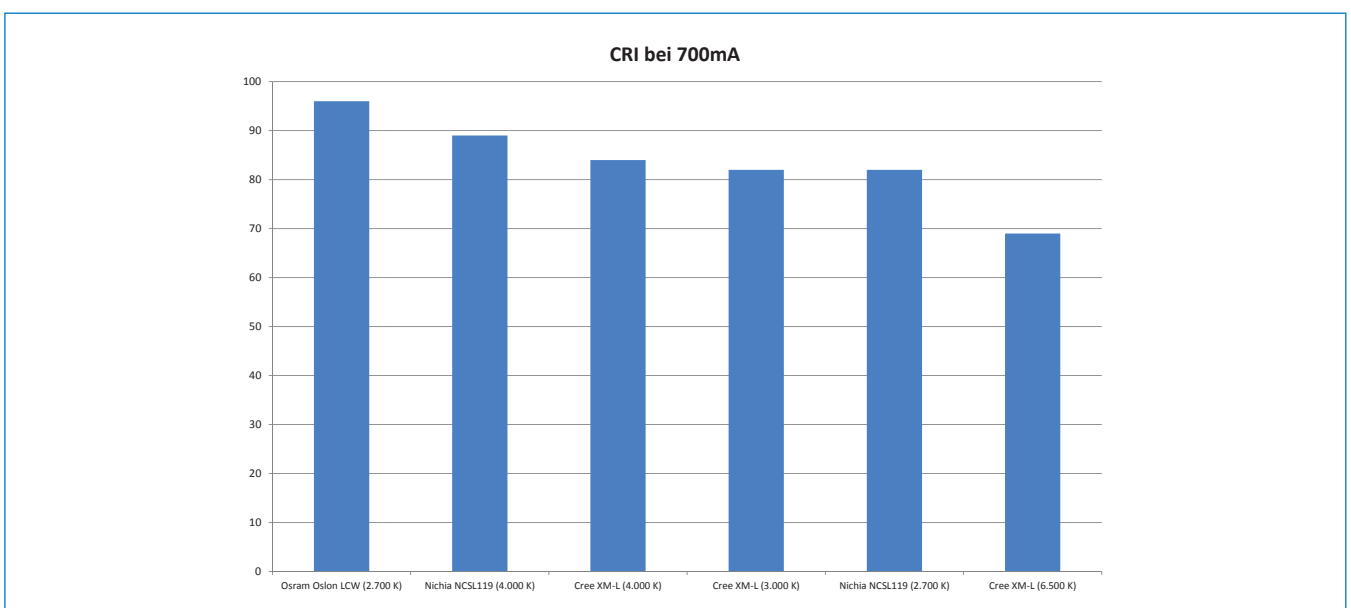


Abb. 12: Auszug aus den Messdaten zur Evaluierung des LED-Typs (CRI bei 700 mA Konstantstrom und 60 °C Kühlkörpertemperatur.)



Zum Anderen stehen auch Kabelklemmen in SMD-Technik zur Verfügung, welche das Anschließen der Leiterplatte an die Vorschaltel Elektronik deutlich erleichtern. Unsere Kostenabschätzung ergab, dass in der Serienproduktion die Bestückung einer Kabelklemme günstiger ist als das manuelle anlöten von Kabeln. Des Weiteren muss die LED-Leiterplatte dafür ausgelegt sein sogenannte Sekundäroptiken zur Anpassung des Lichtbildes aufnehmen zu können. Auch Bestückungsvarianten sollten bei der Entwicklung bedacht werden, um zum Beispiel die Möglichkeit zu haben weniger LEDs zu bestücken als maximal möglich wären. Somit ist es zudem möglich nicht nur den Lichtstrom über die LED-Anzahl anzupassen, sondern auch die Effizienz.

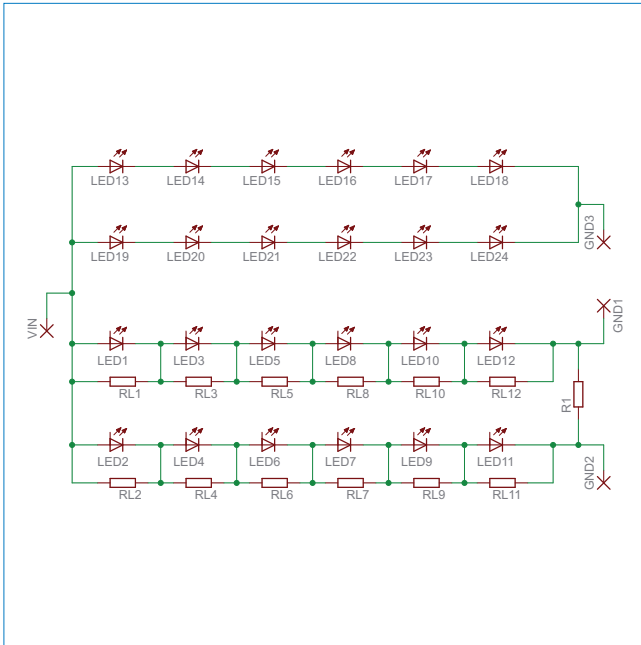


Abb. 13: LED-Modulgehäuse, Rohteil (Rückseite mit Kühlrippen)

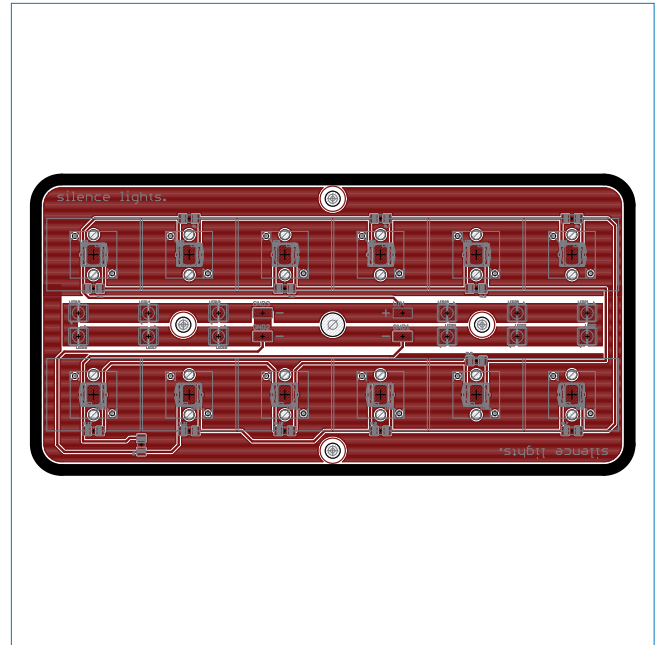


Abb. 14: LED-Modulgehäuse, Rohteil (Vorderseite)

Nach dem Entwurf des Schaltplans (Abb. 13) und des sogenannten »Layouts« (Abb. 14) der LED Leiterplatte für die Prototypen konnten die Daten an einen Leiterplattenhersteller übermittelt werden. Die LED-Leiterplatte wurde speziell für die Tests bezüglich der Farbmischung ausgelegt. Im Lichtlabor der TU Darmstadt wurden eine Reihe von LEDs umfangreich vermessen. Die Messungen finden dabei alle im thermisch eingeschwungenen Zustand statt, d. h. lichttechnische Messwerte werden nicht wie leider branchenüblich in kurz gepulsten Einschaltphasen gemessen, sondern im deutlich realitätsnäheren Dauerbetrieb nach erfolgter thermischer Stabilisierung. Alle LEDs sind Kandidaten für den Einsatz in der geplanten Innenraumleuchte, die meisten davon sind neu am Markt erschienen. Die Hauptvergleichsparameter sind Lichtausbeute, Farbtemperatur und Farbwiedergabeeigenschaften. Für jedes der verfolgten Konzepte (einfarbig weiß oder Mischung verschiedener LED-Farben) kristallisieren sich verschiedene LEDs als gut geeignet heraus. Für die praktische Anwendung gilt es also einen Kompromiss zwischen guter Lichtausbeute und guter Farbwiedergabe zu finden. Je nach Anwendung kann die Gewichtung verschoben werden. Im Gegensatz zur Außenbeleuchtung (Straßenbeleuchtung, Kfz-Beleuchtung) spielt die Farbwiedergabe in der Innenraumbeleuchtung (Büro, Wohnraum, Warenpräsentation, OP-Beleuchtung im Krankenhaus) eine wichtige Rolle. Die gängigen Normen für die Innenraumbeleuchtung schreiben einen Ra-Wert von mindestens 80 bis 85 vor, je nach Norm und Anwendungsbereich. Während der Projektlaufzeit entstand die Frage, ob eine Mischung verschiedenfarbiger LEDs im Vergleich zu einfarbigen LEDs eine bessere Lichtausbeute bei guter Farbwiedergabe ermöglicht. Dies wurde messtechnisch untersucht. Eine Mehrkanal-Mischung hat auf alle Fälle den Vorteil, im laufenden Betrieb der Leuchte den spektralen Verlauf anpassen zu können. So könnte der Benutzer z.B. die Farbtemperatur des abgestrahlten Lichtes einstellen.

Im ersten Schritt wurde eine Leiterplatte realisiert, bestückt mit kaltweißen und warmweißen LEDs. Durch Dimmung der beiden LED-Kanäle konnten Lichtausbeute, Farbtemperatur (CCT) und Farbwiedergabeindex (Ra) wie erwartet stufenlos variiert werden. Die beiden Extremwerte sind in Tabelle 1 dargestellt.

	Kaltweiss	Warmweiss
Lichtausbeute	69 lm/W	60 lm/W
CCT	6690 K	3164 K
Ra	77,2	64,4

Mit dieser LED-Bestückung kann ein sehr weiter Farbtemperaturbereich abgedeckt werden. In der Bürobeleuchtung übliche Werte von 4000 K, 5000 K und 6500 K werden abgedeckt. Die Lichtausbeute liegt zwischen 60 und 69 lm/W und schwankt damit weniger als erwartet. Einzig der Ra-Wert zeigt einen überraschenden Verlauf, üblicherweise liefern warmweiße LEDs einen tendenziell höheren Wert als ihre kaltweißen Pendanten.

In einem zweiten Schritt wurden mehrere Platinen mit sehr energieeffizienten Medium-CRI-LEDs der Firma Cree vom Typ XM-L bestückt. Zusätzlich wurden zum Vergleich auf einer Platine aktuelle Nichia LEDs gleicher Farbtemperatur aufgebracht und mit vermessen.

	Cree XM-L 3000 K	Mischung	Cree XM-L 5000 K
Lichtausbeute	87 lm/W	102 lm/W	113 lm/W
CCT	3090 K	4060 K	5160 K
Ra	82	82	80

	Cree XM-L 4000 K	Mischung	Nichia 4000 K
Lichtausbeute	99 lm/W	78 lm/W	56 lm/W
CCT	4160 K	4090 K	3950 K
Ra	85	87	91

Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen der 4000 K Cree-LED und der 4000 K Nichia-LED. Die Ursache liegt zum einen in dem gefüllteren Spektrum der Nichia-LED (erkennbar am höheren Ra-Wert) – darunter leidet prinzipbedingt die Lichtausbeute. Zum anderen aber besitzen beide LEDs unterschiedliche Chipgrößen. Während die Cree XM-L auf einem 4 mm<sup>2</sup> großen LED-Chip basiert, hat die Nichia-LED nur einen 1 mm<sup>2</sup> großen Chip zur Verfügung. Bei gleicher Stromstärke ist die Stromdichte in der Nichia-LED höher und führt zu weniger effizientem Betrieb. Bei der Bestückung mit 3000 K und 5000 K XM-L LEDs ergibt sich ein Farbtemperatur-Verstellbereich von ca. 3100 K bis ca. 5100 K. Damit sind sowohl typische Werte in der Bürobeleuchtung (4000 K und 5000 K) als auch in der Wohnraumbelichtung (ca. 3000 K) abgedeckt. Der Farbwiedergabeindex unterschreitet nie den üblichen Mindestwert von Ra=80.

Um ein gefülltes Spektrum mit guter Farbwiedergabe zu erzeugen, werden dem gelben Leuchtstoff der weißen LED üblicherweise ein rot emittierender und ein im blau-grünen Bereich strahlender Leuchtstoff beigemischt. Damit wird zusätzliche Strahlung im Bereich 490 nm und 660 nm erzeugt, die die vorhandenen „Lücken“ im Spektrum der weißen LED auffüllt. Dieses Verfahren ist mit Effizienzverlusten verbunden, da insbesondere der rote Leuchtstoff aufgrund des großen Stoke Shifts zwischen Anregungs- und Emissionswellenlänge ineffizient arbeitet.

Tabelle 3: Messwerte der XM-L-Platine 3			
		Cree XM-L 4000 K + Nichia PC-amber + Nichia cyan	
	Cree XM-L 4000 K	Mischung 1	Mischung 2
Lichtausbeute	99 lm/W	92 lm/W	83 lm/W
CCT	4160 K	4430 K	4670 K
Ra	85	89	87

Deshalb wurde eine weitere erfolgversprechende Idee auf Realisierbarkeit geprüft: Mit der XM-L-Platine 3 (siehe Tabelle 3) wird das Spektrum der 4000 K Cree XM-L LEDs durch cyanfarbene (ca. 490 nm) Halbleiter-LEDs sowie Phosphor-konvertierte Amber-farbene (PC-amber) LEDs der Firma Nichia aufgefüllt. Die Ausführung als getrennte LEDs hat den Vorteil der Steuerbarkeit – je nach aktuellen Betriebsbedingungen (Strom, Temperatur) kann der „Auffüll-Anteil“ variabel angepasst werden. Leider bleibt der erhoffte Anstieg des Ra-Wertes marginal (85 zu max. 89), der Nachteil höherer Bauelementekosten überwiegt den Vorteil besserer Farbwiedergabe gegenüber einer Bestückung rein mit 4000 K XM-L LEDs.

### Probanden-Tests zur Farbwiedergabe



Abb. 15: Beispiel eines Tabletop-Aufbaues für visuelle Probandenversuche an der TU Darmstadt

Es wurden Probandenversuche zur Farbwahrnehmung durchgeführt. Die Testpersonen sollten beurteilen, wie stark sich die Wahrnehmung (Helligkeit, Sättigung, Farbtonänderung) verschiedener Farbproben bei Beleuchtung mit LED im Vergleich zur Referenzlichtquelle (Glühlampe) ändert. Solche visuellen Versuche sind gut bekannt und üblich in der Farbwissenschaft [Bod11], in diesem Fall werden spezielle LEDs für die Innenraumbeleuchtung untersucht.

Abbildung 16 zeigt beispielhaft eine Bewertung. Der Proband soll die Farberscheinung eines farbigen Objektes beim Umschalten der Lichtquelle bewerten, immer im direkten Vergleich zur Referenzlichtquelle (Lichtquelle 1). Der Maximalwert von 100 ergibt sich bei tadelloser Übereinstimmung unter beiden Lichtquellen. Sobald ein Farbunterschied erkennbar wird, fällt das visuelle Urteil auf einen Wert unter 100. Für die Auswertung werden die Urteile durch 100 geteilt, so dass sich ein Wertebereich von 0 bis 1 ergibt (1 = beste Farbwiedergabe).

Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit vom Testobjekt: Während die LED-Lichtquelle und die Kompaktleuchtstofflampe (CFL) für rote Rosen und Hautton signifikant unterschiedlich ( $p = 0,001$ ) bewertet werden, ist für die restlichen Testobjekte kein signifikanter Unterschied feststellbar. In der Auswertung zeigen sich wichtige Ergebnisse: Wird nicht der veraltete Far-

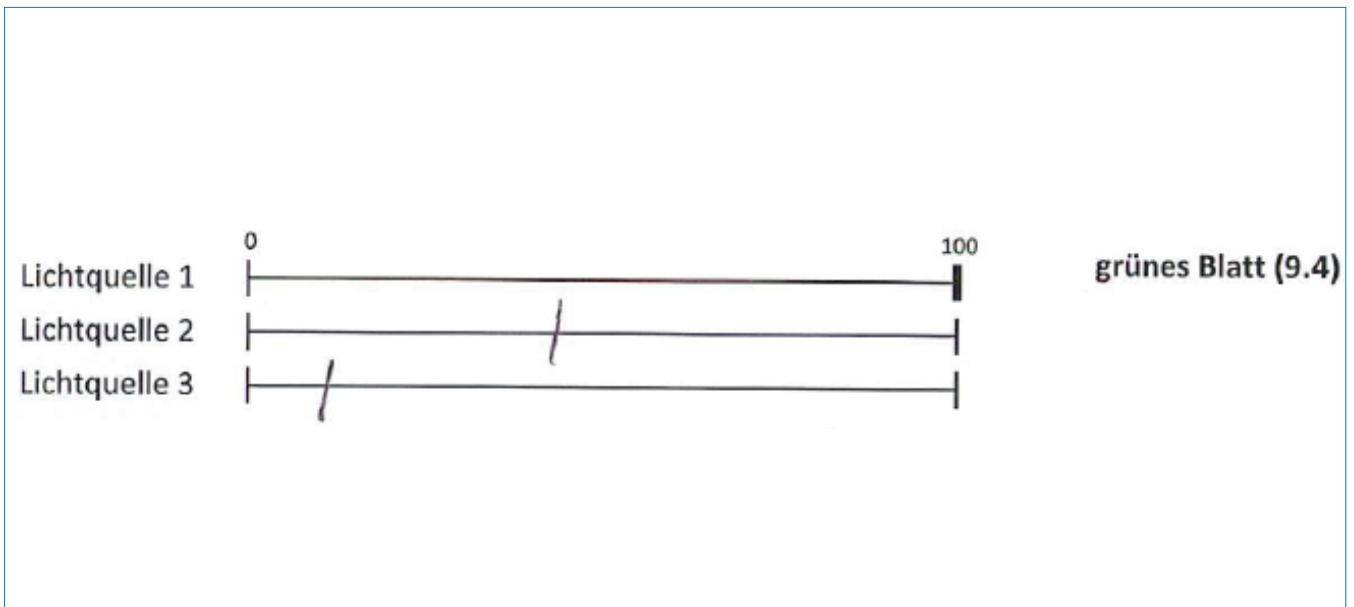


Abb. 16: Ausschnitt aus dem Fragebogen

braum des CIE CRI Algorithmus angewendet, sondern ein neuer Farbraum (CIECAM02-UCS) mit wesentlich besserer Gleichabständigkeit [Luo06], so lassen sich die Probanden-Urteile gut auf messtechnischem/rechnerischem Weg vorhersagen. Es muss also in Zukunft nicht jede auf dem Markt befindliche LED in aufwendigen Probandentests auf ihre Farbwiedergabeeigenschaften untersucht werden. In der Auswertung zeigen sich wichtige Ergebnisse: Wird nicht der veraltete Farbraum des CIE CRI Algorithmus angewendet, sondern ein neuer Farbraum (CIECAM02-UCS) mit wesentlich besserer Gleichabständigkeit [Luo06], so lassen sich die Probanden-Urteile gut auf messtechnischem/rechnerischem Weg vorhersagen. Es muss also in Zukunft nicht jede auf dem Markt befindliche LED in aufwendigen Probandentests auf ihre Farbwiedergabeeigenschaften untersucht werden.

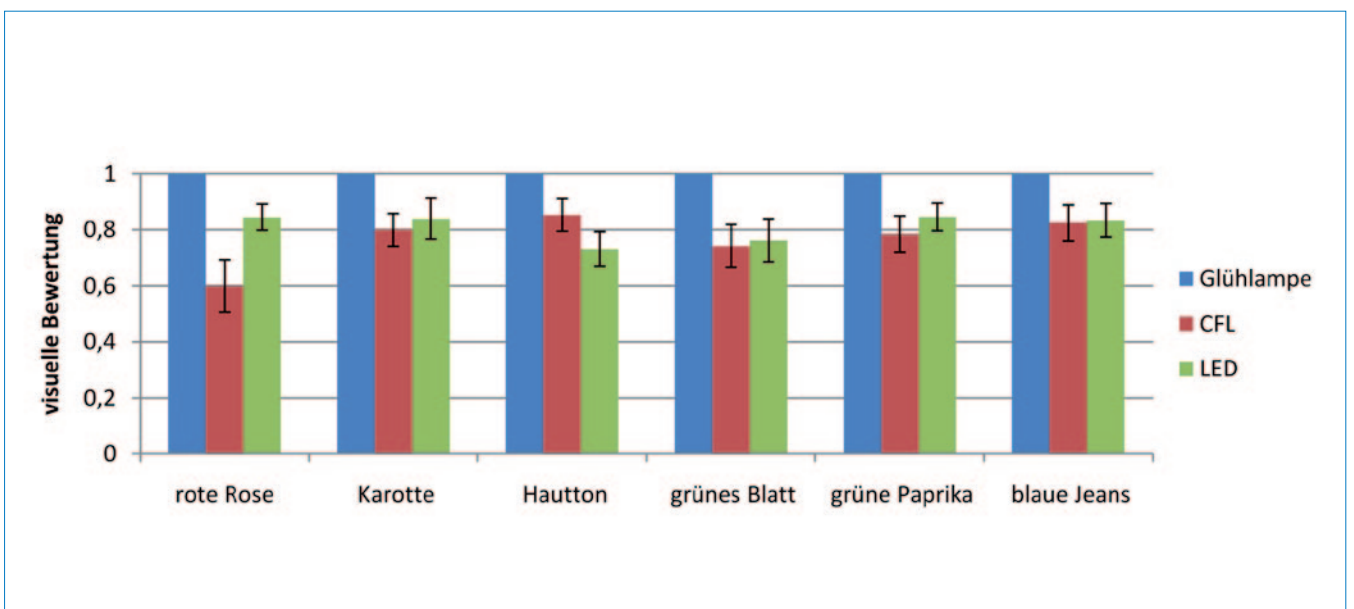



Abb. 17: Auswertung des Tabletop-Versuchs, gegliedert nach Testobjekten

## Entwicklung Vorschaltgeräte

Die Entwicklung eines kompakten, effizienten und günstigen Vorschaltgerätes für die Leuchten stellte eine große Herausforderung dar. Nach eingehenden Recherchen und Vorabkalkulationen wurde deutlich, dass sich bereits einige interessante Modelle auf dem Markt befinden. Diese Vorschaltgeräte haben einige Vorteile, jedoch auch einige Nachteile gegenüber einer Neuentwicklung. Die größten Vorteile sind sicherlich die bestehenden Zertifikate für die EMV und die gültigen Sicherheitsrichtlinien. Ein weiterer Vorteil ist, dass einige Modelle zu sehr günstigen Preisen zu erwerben sind. Um einen ähnlichen Preis bei einer eigenen Entwicklung zu erreichen, müssten große Stückzahlen gefertigt werden, was natürlich eine dementsprechende Nachfrage voraussetzt. Ein weiteres Ziel der Entwicklung war es nun die Abmessungen so klein wie möglich zu gestalten, um das Vorschaltgerät auch in anderen Produkten einsetzen zu können, bei welchen der Faktor Baugröße eine wichtige Rolle spielt. Mit dieser zusätzlichen Zielsetzung sollte ein Alleinstellungsmerkmal geschaffen werden, welches die Produktion höherer Stückzahlen ermöglichen soll. Die Berechnung erfolgte mittels einer Software des Steuerchip-Herstellers (Abb. 19). Für die Auswahl der berechneten Bauteile zogen wir nur Markenhersteller in Betracht. Nach einigen Berechnungen standen die Versionen für die Prototypen fest.



### AL9910/A Calculator

Click below to select device

Click below to select if PFC is required

AL9910 SO8-EP

With PFC

#### INPUTS

Enter your LED driver requirements here	
Minimum input voltage	240 V
Maximum input voltage	240 V
Line Frequency	50 Hz
LED Forward Voltage	3,0 V
Number of LEDs	24
LED Current	700 mA

Enter extra parameters here	
Max. switching frequency	50 kHz
Inductor's DCR	1,2 Ω
Inductor (L)	1 mH
Vf of DB1	0,85 V
Vf of D1, D2 & D3	1,1 V
Vf of D4	1,1 V
Preferred Cbulk Value	27 µF

MOSFET Q parameters	
Rds(ON)	0,399 Ω
Og @ Vg = 7.5V	11 nC

Output Capacitor Cout parameters	
LED output Ripple voltage	155 mV
Cout ESR value	10 mΩ

Thermal parameters	
Ambient temperature	25 °C

Minimum AC Vin from 10 to 265V  
Maximum AC Vin from 10 to 265V  
Line Frequency from 47 - 63Hz  
Typically 3.3V  
No. of Leds  
ILED from 80 to 1000mA

Max. switching freq. from 50 to 125kHz  
Inductor's DCR upto 30Ω  
Inductor value  
Vf of DB1 from 0 to 1.3V  
Vf of D1, D2, D3 from 0 to 1.3V  
Vf of D4 from 0 to 1.3V  
Value 3.3 to 1000µF

Rds(ON) upto 10Ω  
Og value

Ripple voltage from 100 to 2000mV  
ESR from 10 to 500mΩ

Ambient Temperature from 0 to 50°C

#### OUTPUTS

Component values	
ROSC (Rset)	370,2 kΩ

Inductor parameters	
Inductor (L)	1,00 mH
RMS Inductor Current	1129,5 mA
Peak Inductor Current	1264,7 mA

Sense resistor parameters	
Rs Value	0,198 Ω
Rs Power Dissipation	91,0 mW

Rectifiers	
DB1	DF06S
D4	SF30JG
D1 D2 D3	S1J-13F

Cout parameters	
Cout Value	123,30 µF
Cout Voltage Rating	400 V

Cbulk parameters	
Cbulk Value	5,5 µF

**Note:**  
For the given Preferred Cbulk value 27µF, LED Current will roll off with VDC less than 152V

#### PERFORMANCE RESULTS

Electrical result	
Output Power	50,4 W

Efficiency and Losses	
Theoretical Efficiency (worst case)	91,6 %
AL9910 SO8-EP power consumption	258,8 mW
Inductor Copper Loss	1530,9 mW
Maximum MOSFET Q loss	1021,0 mW
Maximum D4 Loss	604,0 mW
Maximum DB1 loss	253,7 mW
Maximum D1 D2 D3 loss	494,8 mW

Thermal result	
AL9910 SO8-EP temperature	27,3 °C
MOSFET Q junction temperature	88,3 °C
DB1 junction temperature	35,1 °C
D4 junction temperature	44,3 °C
D1 D2 D3 junction temperature	29,9 °C

Abb. 19: Kalkulationsprogramm zur Auslegung eines LED-Vorschaltgerätes

Für diese konnte nun der Schaltplan und das Layout erstellt werden (Abb. 20 bis Abb. 22). Die verschiedenen Version können nicht nur mit verschiedenen Bauteilen bestückt werden, sondern sind auch für verschiedene Leistungen ausgelegt. Das »Herz« der Schaltung bildet ein sogenannter »High-Voltage LED driver-controller«. Bei allen Layouts wurde zu Gunsten der Effizienz auf die elektrische Isolation durch einen Trenntransformator verzichtet. Somit sind alle Leuchten, welche mit diesem Vorschaltgerät versehen werden ausschließlich mit »Schutzklasse I« zu kennzeichnen. Durch die Unzugänglichkeit des Sekundärschaltkreises (LED-Leiterplatte) ist eine Berührung der spannungsführenden Elemente quasi nicht möglich. Des Weiteren werden alle berührbaren elektrisch leitfähigen Teile Leuchten natürlich gemäß der »Schutzklasse I« mit einer Erdung versehen.

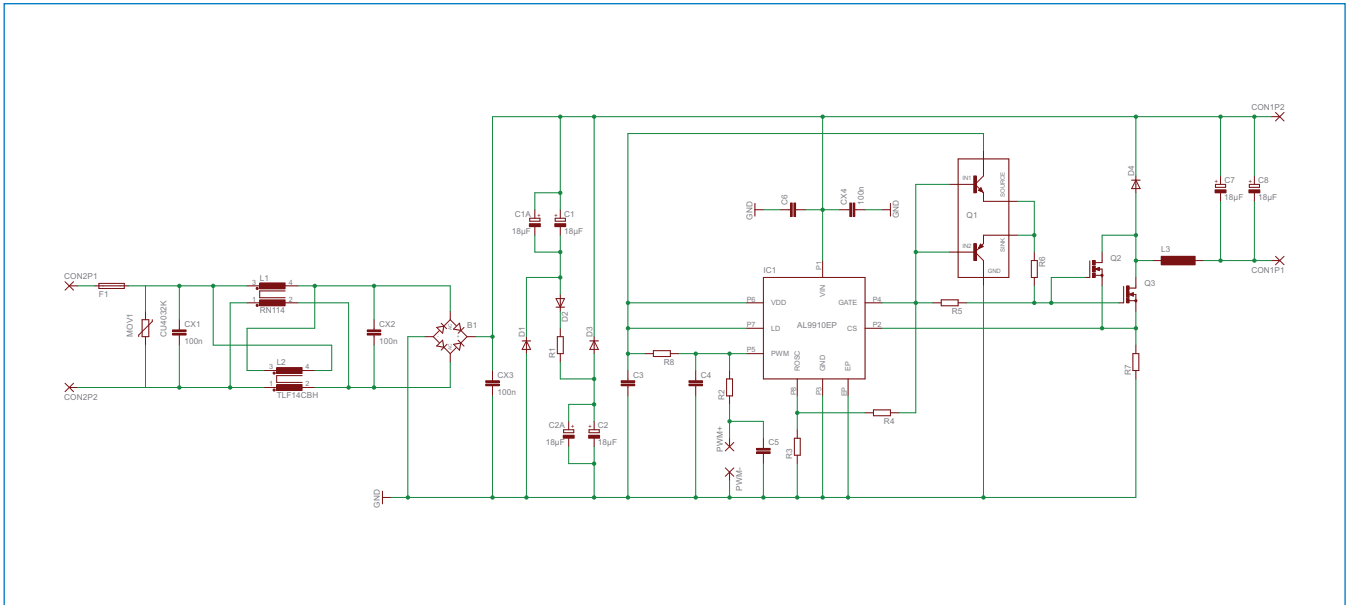


Abb. 20: Schaltplan Beispiel »emt-0911-0000«

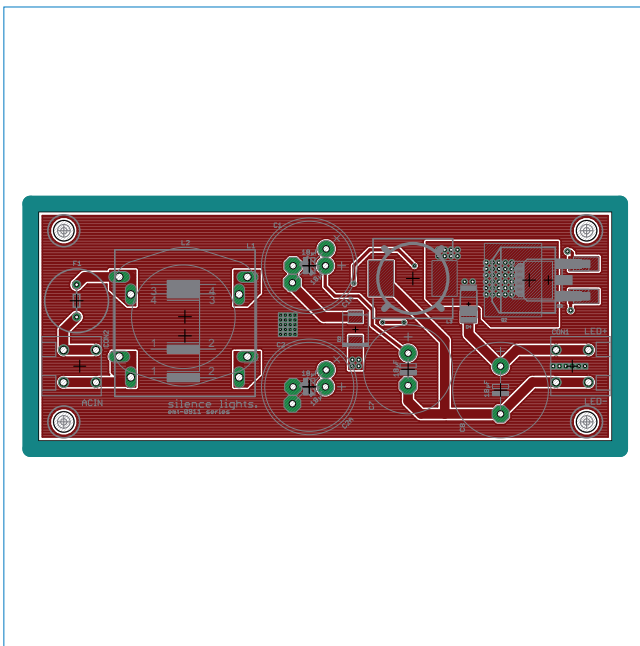


Abb. 21: »TOP« Layer »emt-0911-0000«

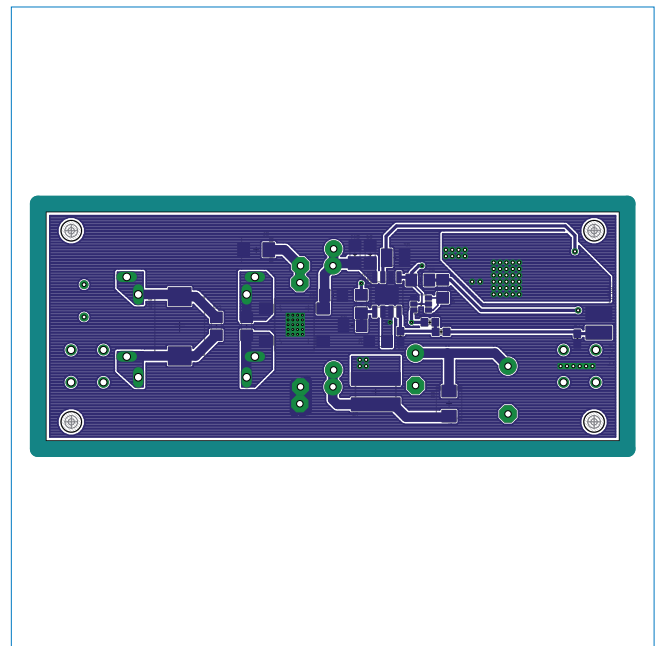


Abb. 22: »BOTTOM« Layer »emt-0911-0000«

Alle Muster sind mit einem Eingang für eine digitale Dimmung (PWM) versehen. Falls nötig kann in der Serie auch noch der Anschluss einer analogen Dimmung (spannungsgesteuert) vorgesehen werden. Eine Dimmung mittels Phasenanschnitts- oder Phasenabschnittsdimmern ist nicht möglich, da dies eine völlig andere Topologie voraussetzt. Ein Vorschaltgerät ist mit dem im Antrag beschriebenen Anschluss für eine Mikroprozessor-Karte versehen. Mit dieser Option ist es möglich die Steuerbarkeit auf Systeme wie DALI, DMX oder KNX zu erweitern.

Diese Option wurde bei den Prototypen für Netzspannung bewusst nicht vorgesehen, da es hier primär um die Prüfung der Treiberschaltung und deren Werte geht. Natürlich kann diese Option bei der Serienfertigung vorgesehen werden. Wobei sich durch die Ergebnisse der Akzeptanz von Steuerungssystemen die Frage stellt, ob dies nötig ist, oder ob es sinnvoller ist einen analogen und einen digitalen Eingang vorzusehen und diese mit sogenannten »Aktoren« anzusteuern. Somit wäre man unabhängig vom Steuersystem und würde für Leuchten, bei welchen keine Steuerung nötig ist deutlich Kosten einsparen.

Zur Prüfung der im Antrag formulierten Steuerkonzepte wurde ein Vorschaltgerät für den Betrieb an Kleinspannung entwickelt. Dieses ist auch mit einem Steckplatz für eine Mikroprozessor-Karte ausgestattet um gesteuert zu werden. Der Nachteil bei dieser Version ist die Effizienz des Systems. Benötigt wird ein Festspannungsnetzteil und das dargestellte Vorschaltgerät (Abb. 23 bis Abb. 25). Beide »Stufen« weisen eine Energieeffizienz auf, welche im besten Fall bei je 92% liegt. Multipliziert man nun beide Effizienzen ( $0,92 \times 0,92 = 0,8464$ ) somit würde auch bei hohen Leistungen die Effizienz unter dem zweistufigen Aufbau leiden. Ein Vorteil wäre die erhöhte Sicherheit, da ab dem Festspannungsnetzteil mit integriertem Trenntransformator nur noch eine Kleinspannung anliegen würde. Auf den folgenden Seiten sind Bilder der LED-Leiterplatten sowie der Vorschaltgeräte dargestellt, welche als Prototypen hergestellt wurden.

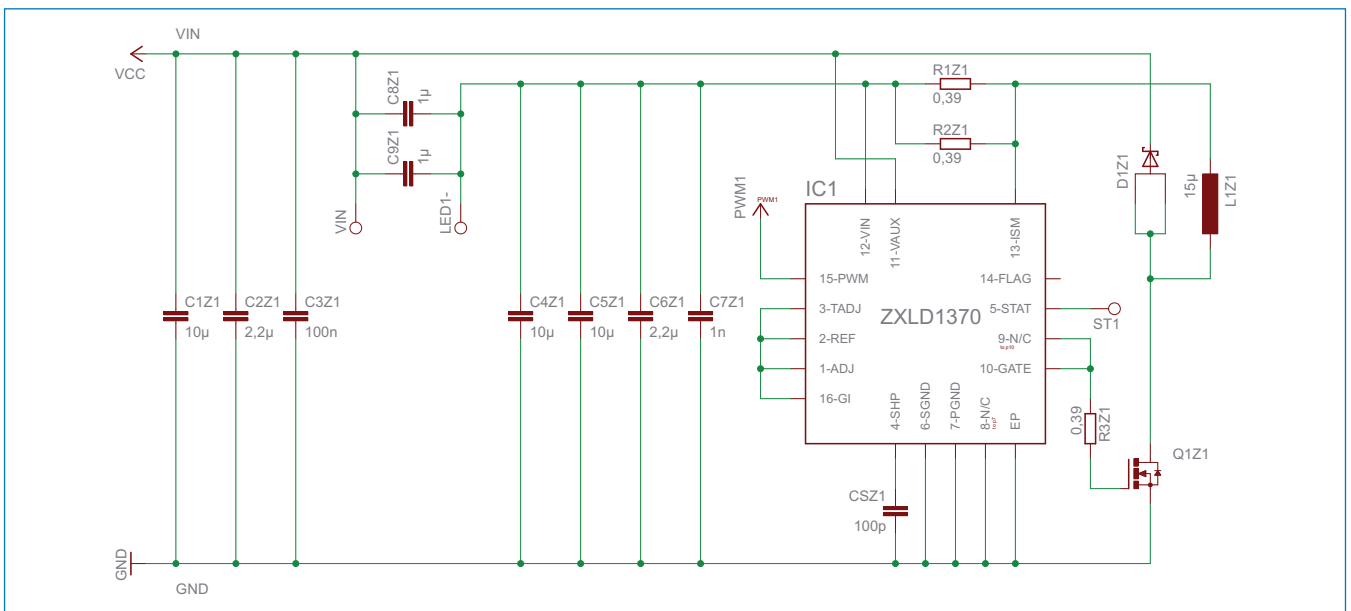


Abb. 23: Schaltplan Beispiel »emt-0211-0000«

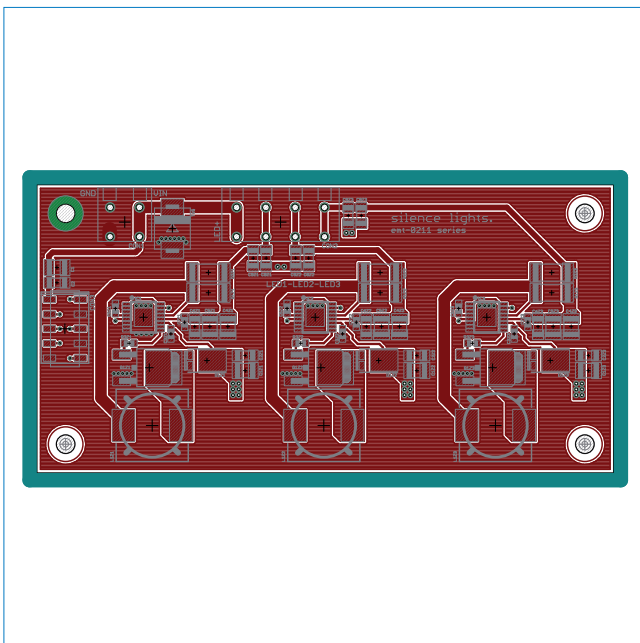


Abb. 24: »TOP« Layer »emt-0211-0000«

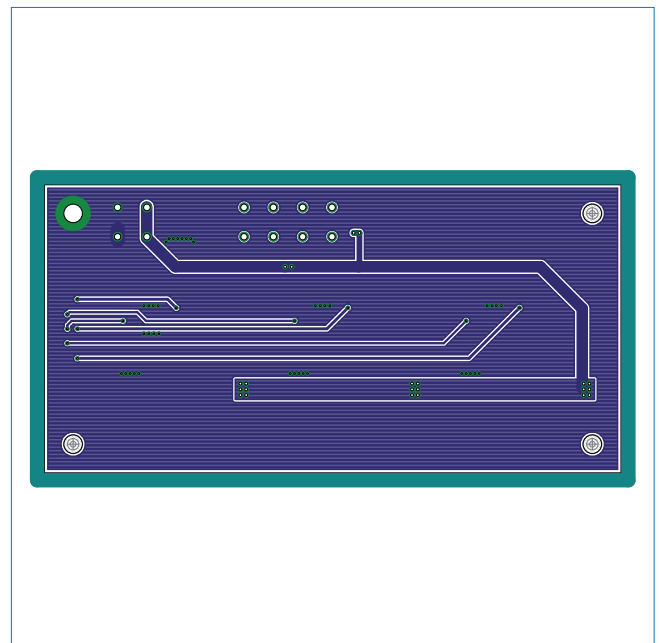


Abb. 25: »BOTTOM« Layer »emt-0211-0000«



Abb. 26: Prototyp der LED-Leiterplatte für lichttechnische Vermessung



Abb. 27: Prototyp der LED-Leiterplatte für lichttechnische Vermessung

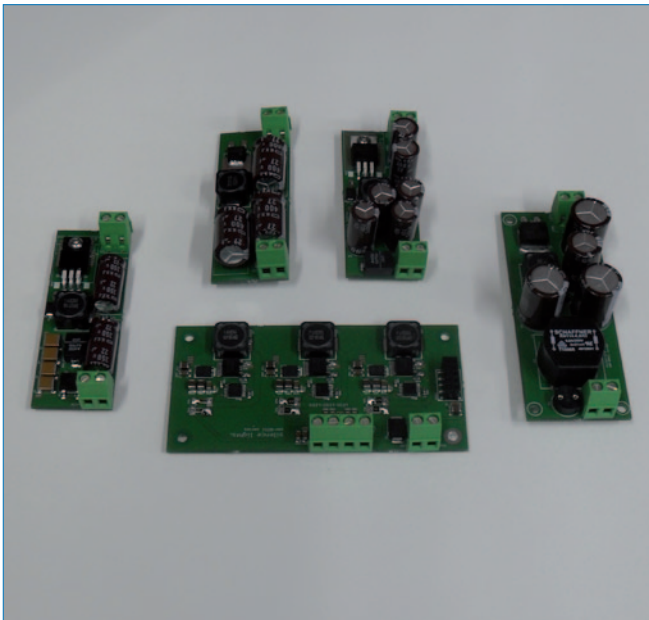


Abb. 28: Übersicht der Vorschaltgerät Prototypen (5 Versionen)



Abb. 29: Prototyp des LED-Vorschaltgeräts »EMT-0911-0000« (Oberseite)

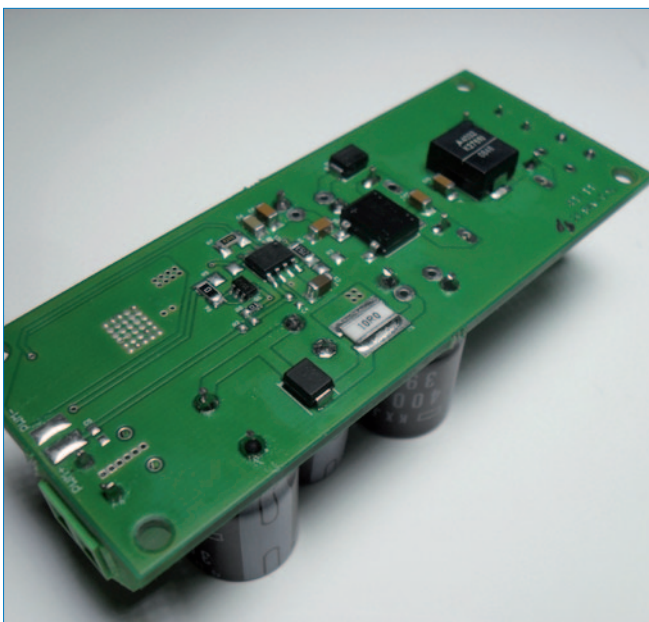


Abb. 30: Prototyp des LED-Vorschaltgeräts »EMT-0911-0000« (Unterseite)

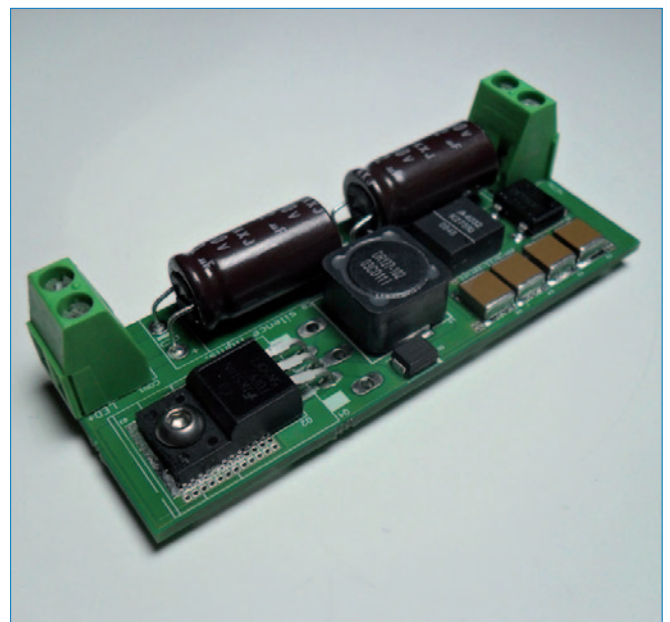


Abb. 31: Prototyp des LED-Vorschaltgeräts »EMT-0711-0000« (Oberseite)



## Lichttechnische Messungen, Simulationen und Aufbau von Prototypen

Zur Erstellung erster Simulationen bezüglich der Ausleuchtung der Leuchten mussten die LED-Module lichttechnisch vermessen werden. Vorab wurden jedoch die Eigenschaften der zum Einsatz kommenden Schutzscheibe überprüft. Um eine geeignete Abschlusscheibe auszuwählen, wurde die spektrale Transmission verschiedener Plexiglas-Produkte vermessen. Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse.

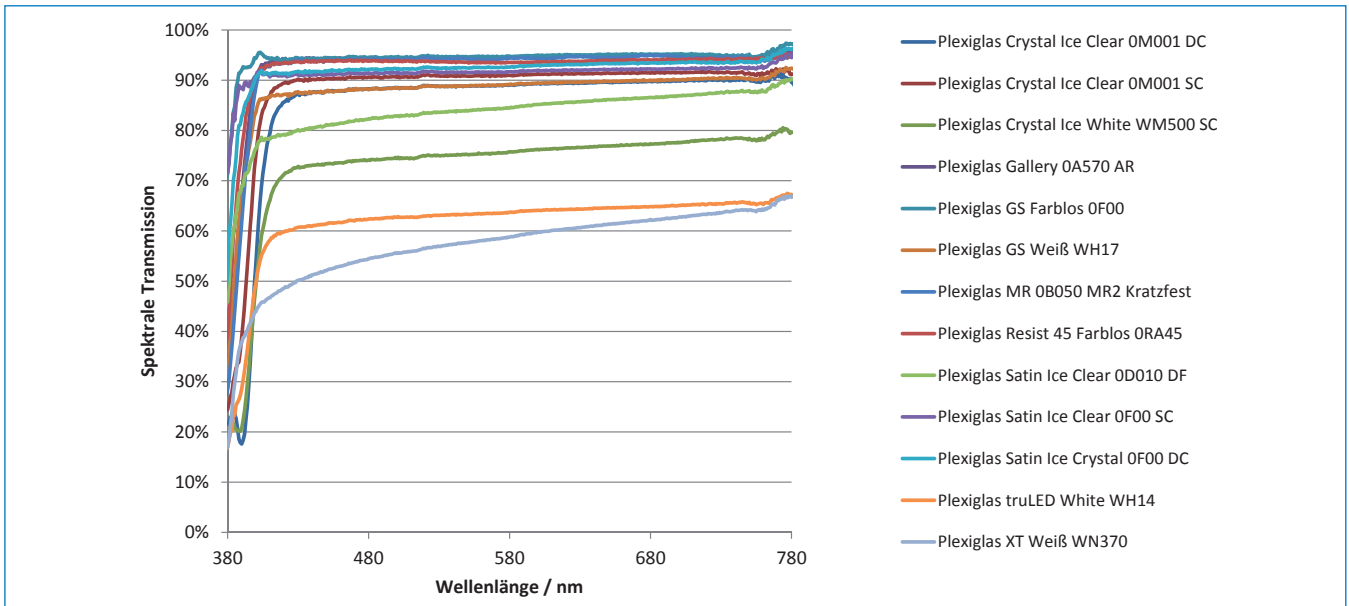


Abb. 32: Spektrale Transmission

Für den Messaufbau wurde der LED-Messplatz mit 30 cm-Ulbrichtkugel und Spektroradiometer benutzt (Abb. 33). Eine Halogenglühlampe wurde freistrahlend in ca. 30 cm Abstand vor der Plexiglasscheibe befestigt, so dass das Testobjekt von gerichtetem Licht bestrahlt wird. Das gestreute Licht wurde mit Hilfe der Ulbrichtkugel eingefangen. Die Plexiglasscheibe wurde direkt am Eingangsport der Ulbrichtkugel befestigt.

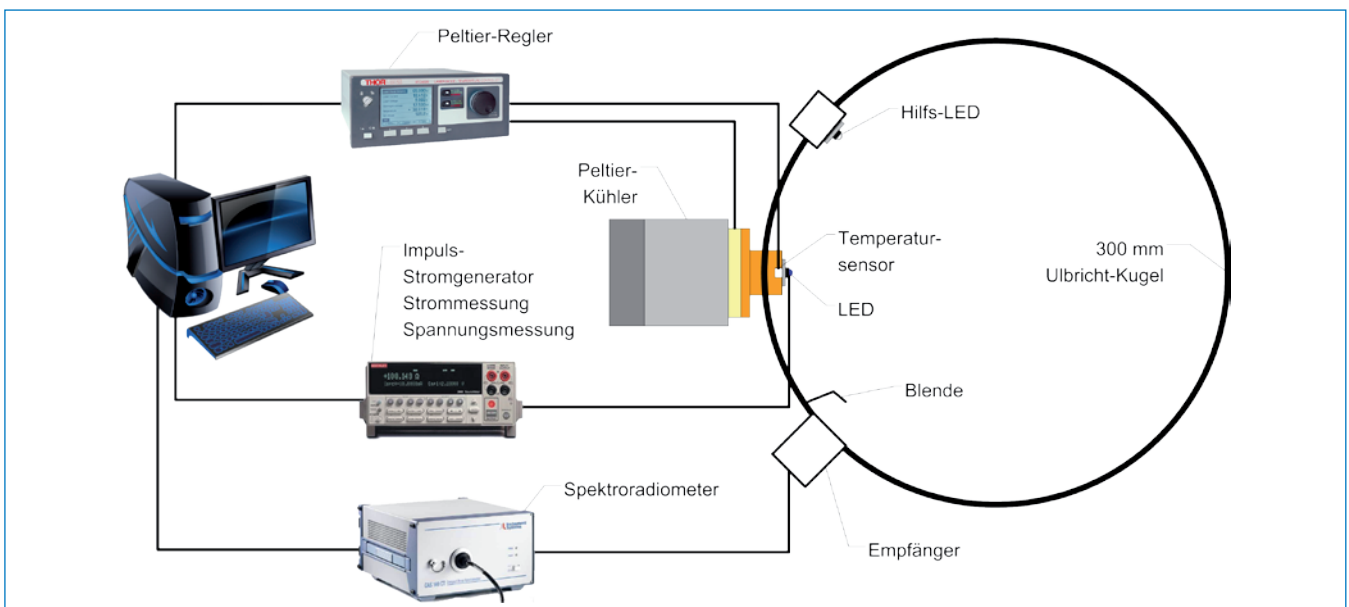


Abb. 33: Messaufbau zur automatisierten LED-Vermessung im Lichtlabor der TU Darmstadt

Es zeigen sich deutliche Unterschiede in der spektralen Transmission der verschiedenen Materialien. Ziel ist es, ein möglichst wellenlängen-aselektives Material mit hoher Gesamttransmission zu finden, im Diagramm also eine horizontale Linie auf hohem Niveau. Dadurch ist ein guter optischer Wirkungsgrad ohne Veränderung der Farbtemperatur des durchtretenden Lichtes sichergestellt. Geeignet erscheinen beispielsweise die Produkte »Satin Ice Clear 0F00 SC« und »Satin Ice Crystal 0F00 DC«. Allerdings ist in manchen Fällen die Transmission nur ein sekundärer Entscheidungsfaktor.

Plexiglas »Satin Ice Clear 0D010 DF« weist optimale Eigenschaften im Bezug auf die Lichtstreuung und die Homogenisierung der Leuchtenden Fläche auf. je so größer die leuchtende Fläche, desto geringer ist die Blendwirkung der Leuchte. Dieser Punkt ist jedoch nur mit einem Goniophotometer messbar beziehungsweise können die Werte für die Blendung am Computer, basierend auf den Daten der Goniophotometer-Messung berechnet werden. Die vom Goniophotometer erfassten Daten werden als sogenannte Lichtverteilungskurven (Abb. 34 und Abb. 35) im standardisierten »Eulumdat-Format« ausgegeben. Diese Daten lassen sich dann als Leuchte in ein Simulationsprogramm wie z.B. Dialux einlesen.

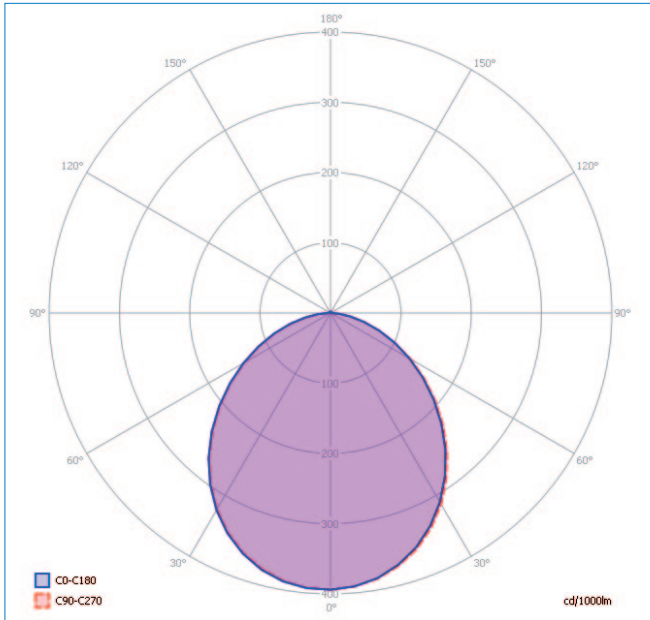


Abb. 34: Lichtverteilungskurve (LVK) mit Streuscheibe »0D010 DF«

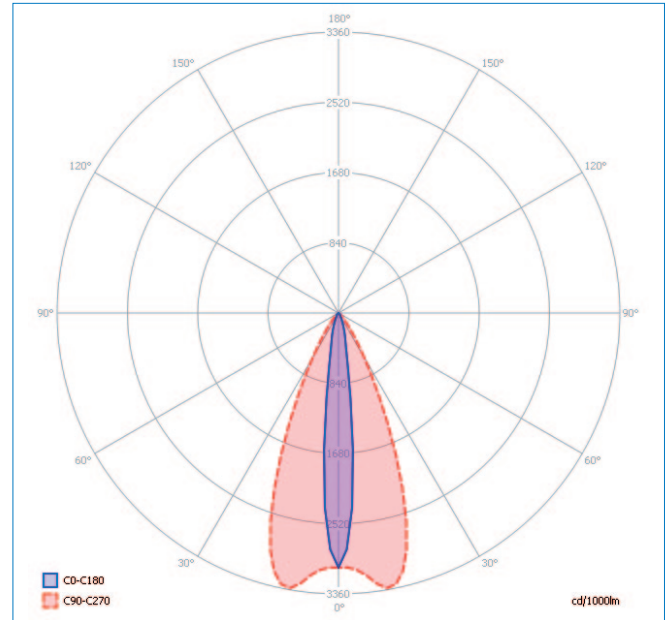


Abb. 35: Lichtverteilungskurve (LVK) mit asymmetrischer Sekundäroptik

Als Ergebnis erhält man dann unter Anderem die Werte der durchschnittlichen Beleuchtungsstärke ( $E_m$  [lx]), die Gleichmäßigkeit ( $g_1$  und  $g_2$ ) und bei Bedarf auch eine Falschfarbendarstellung in 3D (Abb. 36 bis Abb. 38). Für ein Büro sollte laut »ASR A3.4« eine mittlere Beleuchtungsstärke zwischen 300 lx und 500 lx ausreichen. Der geforderte Wert hängt auch davon ab, wie viel zusätzliches Tageslicht vorhanden ist. Bei dem simulierten Büro würden also fünf unserer LED-Module ausreichen, um den gesamten Raum den Richtlinien entsprechend auszuleuchten.

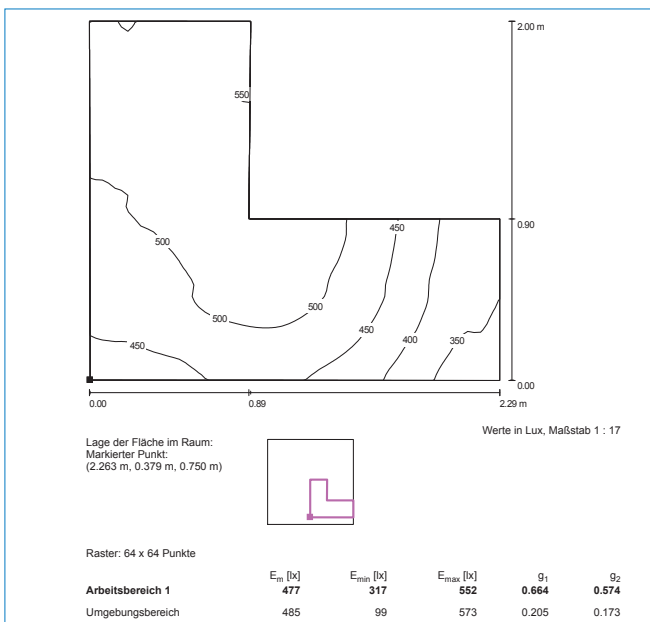


Abb. 36: Iso-Lux Plot einer Arbeitsfläche

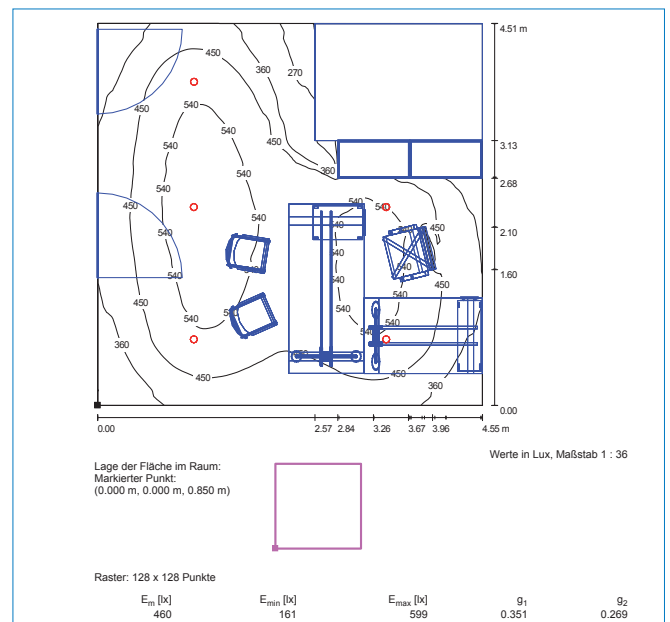


Abb. 37: Iso-Lux Plot eines Büroraumes

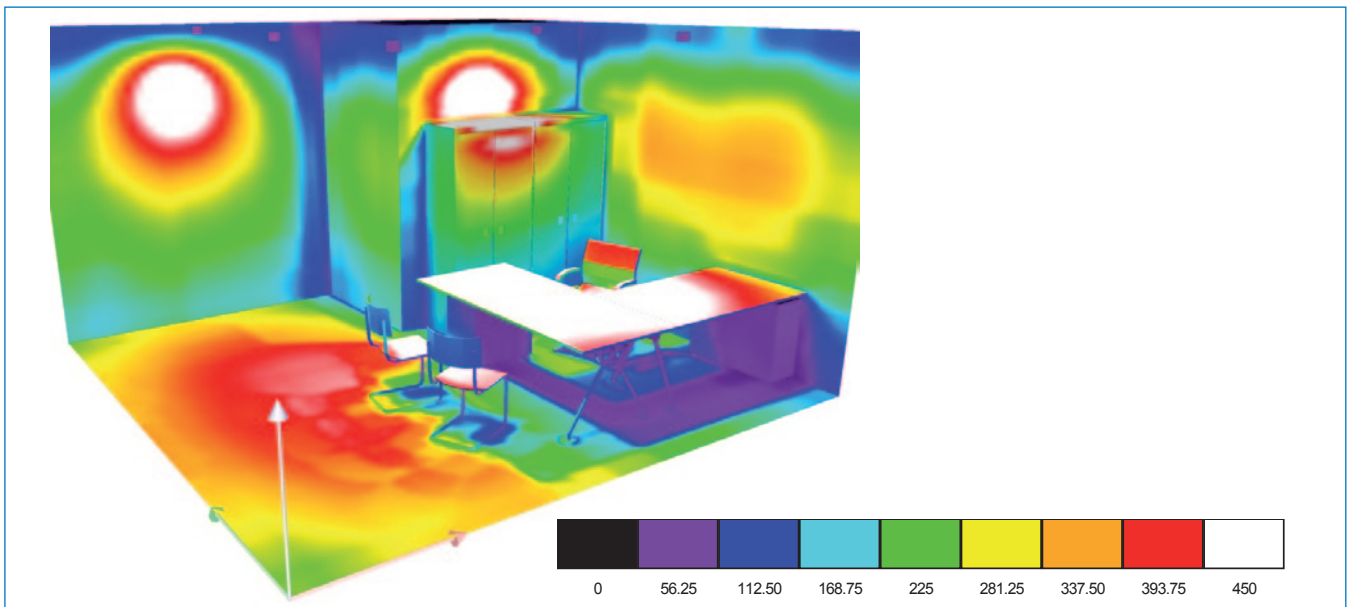


Abb. 38: Falschfarbendarstellung der Helligkeitsverteilung in einem Büro

## Steuerkonzept und Dimmung

Im Gegensatz zu herkömmlichen Leuchtmitteln sind Leuchtdioden sehr gut für den gedimmten Betrieb geeignet. In der Praxis haben sich zwei Verfahren etabliert, wie die vom Menschen wahrgenommene LED-Helligkeit variiert werden kann.

### 1. Pulsweitenmodulation (pulse width modulation, PWM)

Die Leuchtdiode wird in schneller zeitlicher Folge ein- und ausgeschaltet. Aufgrund der sehr schnellen Ein- und Ausschaltzeiten von LEDs (ns bis  $\mu$ s-Bereich) folgt das abgegebene Licht den Strompulsen direkt. Bei ausreichend großen Wiederholfrequenzen von 100 Hz bis einigen Kilohertz, je nach Betrachtungsbedingung, nimmt der Mensch einen zeitlichen Mittelwert wahr. Die empfundene Intensität entspricht dann dem Tastverhältnis (duty cycle, Einschaltzeit multipliziert mit der Wiederholfrequenz) des PWM-Signals. Bei gleicher Ein- und Ausschaltzeit (50% Tastverhältnis) entsteht eine messbare Intensität von 50%.

### 2. Stromdimmung (constant current reduction, CCR)

Die Intensität des abgestrahlten LED-Lichtes ist in guter Näherung proportional zum Strom, der durch die LED fließt. Eine Halbierung des Betriebsstroms führt also nahezu zu einer Halbierung der Intensität. CCR benötigt im Vergleich zum PWM-Betrieb mehr Bauelemente in der LED-Ansteuerelektronik (d. h. das Vorschaltgerät wird geringfügig teurer), dafür entfallen elektromagnetische Störabstrahlungen und Wahrnehmungsartefakte (Flimmern, Perlschnureffekt), die im PWM-Betrieb auftreten können. Für anspruchsvolle Aufgaben, bei denen mehrere LEDs nebeneinander sichtbar sind (z. B. Tagfahrlicht-Bänder, LED-Heckleuchten) muss auf die Abstimmung der LEDs (gleiche Intensität und Farbe) bei allen Betriebsströmen geachtet werden. Eventuell werden mehrfach gebintete LEDs notwendig, bei denen die LEDs bei mehreren Betriebsströmen sortiert werden.

Für die vorgesehenen Messungen müssen folgende Bedingungen geschaffen werden, um vergleichbare Messbedingungen zu erhalten:

- Alle LEDs müssen aktiv temperiert werden.
- Die LEDs werden thermisch eingeschwungen vermessen, nicht nur kurz gepulst, um den Betriebsfall realistisch nachzubilden.
- Die elektrische Spannung muss direkt an der LED gemessen werden (Vierleitermessung), sonst verfälschen Übergangswiderstände an Kabeln und Steckverbindern stromabhängig die Spannungsmessung.
- Die Lichtmessung erfolgt mit Ulbrichtkugel und Spektroradiometer, um Lichtstrom, spektrale Größen und farbmetrische Größen wie dominante Wellenlänge und Farbtemperatur bestimmen zu können.

Die LED wird auf eine Metallkernleiterplatte (MCPCB) aufgebracht und an einen Kühlkörper (heat spreader) aus Kupfer geschraubt. Im Kühlkörper – direkt unter der LED – befindet sich ein Temperatursensor. Mit Hilfe eines leistungsstarken Peltierelementes kann nun die Temperatur am Sensor auf einen konstanten Wert geregelt werden, unabhängig von der thermischen Last (LED).

Es werden typische weiße LEDs ausgesucht, die für den Einbau in Büro- und Innenraumleuchten geeignet sind. Drei verschiedene LED-Typen werden gewählt.

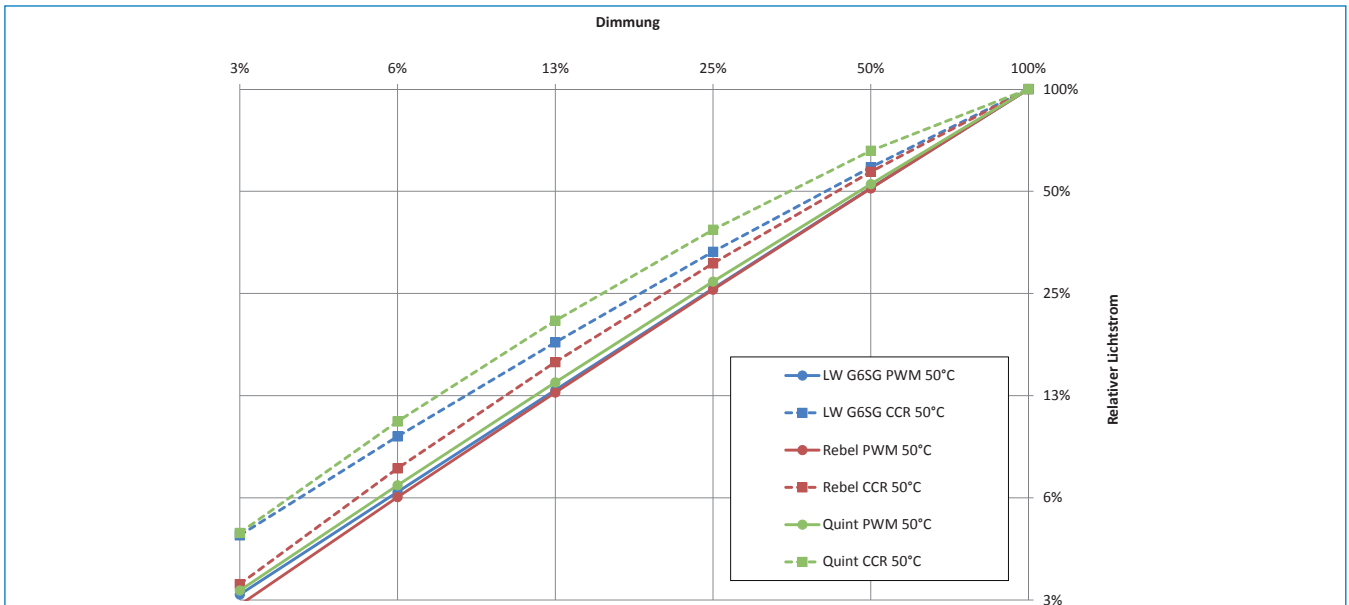


Abb. 39: Linearität des Lichtstroms bei PWM- (durchgezogene Linien) und Stromdimmung (gestrichelte Linien) für drei weiße LED-Typen

Es zeigt sich, dass mit PWM-Dimmung eine sehr gute Linearität des Lichtstroms erreicht werden kann, eine Dimmung z. B. auf 13% PWM-Tastverhältnis ergibt auch 13% Lichtstrom.

Die Lichtausbeute gibt an, wie viel Lichtstrom (Lumen, lm) aus einem Watt elektrischer Leistung erzeugt wird. Sie ist abhängig von Temperatur und Betriebsstrom der LED. Entsprechend zeigt sich eine konstante Lichtausbeute im PWM-Betrieb, denn hier wird die LED bei jeder Dimmstufe mit dem gleichen Strom (Strompuls-Amplitude) betrieben, nur unterschiedlich lange eingeschaltet. Dagegen führen abnehmende Stromdichten bei der CCR-Dimmung zu einem Lichtausbeute-Gewinn im gedimmten Zustand. Je nach LED kann dieser Gewinn bis fast zu 100% betragen, d. h. die Lichtausbeute kann sich verdoppeln (Quint-LED auf 6% dimmen) – für viele Anwendungen ein überaus positiver Effekt der Stromdimmung.

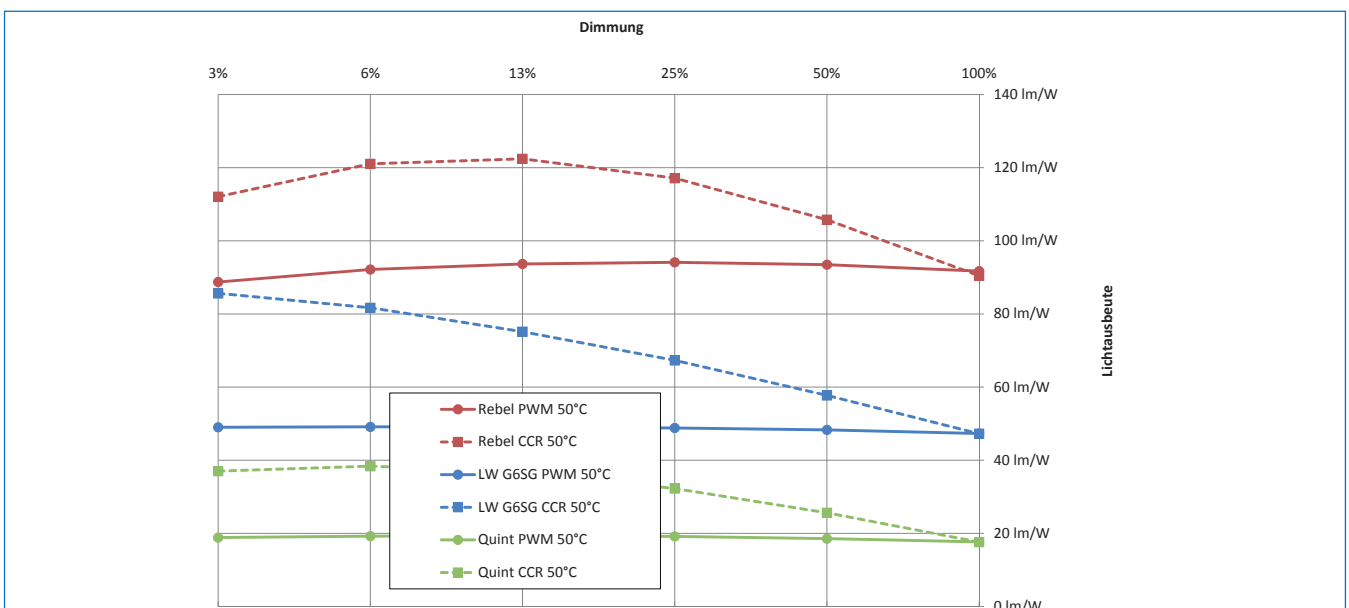


Abb. 40: Lichtausbeute bei PWM- und Stromdimmung

CCR-Dimmung verursacht bei allen drei LED-Typen größere Verschiebungen der ähnlichsten Farbtemperatur (CCT) als PWM-Dimmung. Zwar kann auch die PWM-CCT-Verschiebung von 100-200 K vom Auge im direkten Vergleich wahrgenommen werden, doch deutlich weniger als die CCR-verursachte Veränderung (>200 K). Ursache sind deutlichere Temperaturänderungen in der LED bei CCR-Dimmung. Für eine lichttechnisch relevante Analyse muss man davon ausgehen, dass nur der Dimmbereich von 100% zu 13%, eher sogar zwischen 100% und 20% für die meisten lichttechnischen Anwendungen gewünscht wird, so dass sich die Farbtemperaturänderung mit der CCR-Methode in einem tolerierbaren Bereich bewegt.

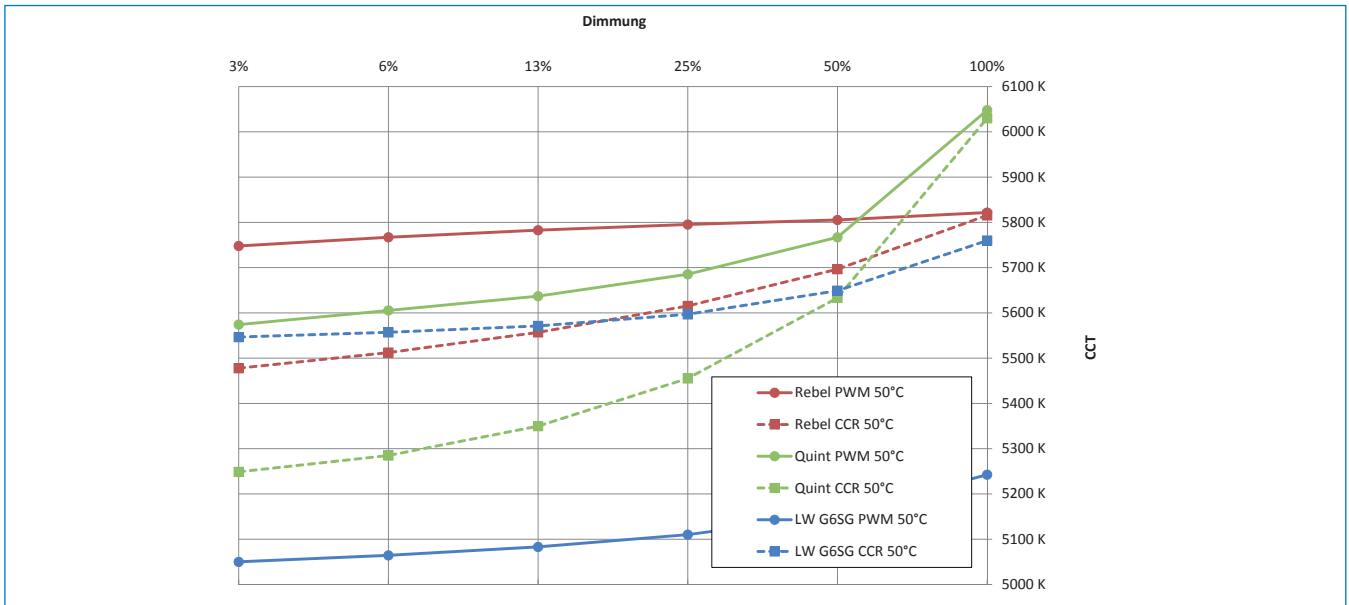


Abb. 41: Ähnlichste Farbtemperatur (CCT) bei PWM- und Stromdimmung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass PWM für sehr lineares Dimmverhalten mit geringer Farbveränderung steht, während CCR einen Gewinn an Lichtausbeute im gedimmten Zustand erlaubt. Je nach Anwendungstyp wird man sich zwischen PWM und CCR entscheiden – während für Kfz-Scheinwerfer ein lineares Dimmverhalten einen großen Pluspunkt bedeuten kann, kann für die Anwendungen wie Innenraumbelichtung aufgrund des Gewinns der Lichtausbeute die CCR-Methode die richtige Wahl sein. Aufgrund des internen Aufbaus der meisten LED-Treiber ist die PWM-Dimmung jedoch die verbreitetere Methode bei LED-Anwendungen.

Durch die Auswertung der Dimmverfahren entschieden wir uns dafür die CCR-Dimmung einzusetzen, da der Treiberchip des Netzteils beide Dimmverfahren unterstützt ist es sogar möglich je nach Anwendung ein Verfahren auszuwählen. Für Anwendungen, bei welchen keine besonderen Anforderungen an die Auflösung des Dimmvorgangs gestellt werden und bei welchen die minimale Dimmstufe größer als 10% sein darf, ist es sinnvoll die CCR-Dimmung zu verwenden. Die Farbtemperaturänderung wirkt sich hier laut aktuellen Studien sogar positiv aus. Durch das »wärmer« werden des Lichts bei abnehmender Helligkeit erzielt man den sogenannten »Sunset-Effekt«. Wobei die Abnahme des CCT um bis zu 300 K in der Praxis wohl kaum auffallen wird. Interessanter ist der Effizienzzuwachs um bis zu 20%. Somit kann im gedimmten Betrieb quasi noch mehr Energie eingespart werden. Die Auswahl der Mikrokontrollers erfolgte nach den folgenden Kriterien: Preis, Analog-Ausgang (für CCR-Dimmung), Digitalausgang (für PWM-Dimmung), Analog- und Digitaleingänge für Sensorik, PWM-Modul mit 16-Bit Auflösung, 8-Bit Timer, Eingänge und Schnittstellen für DALI/DMX/KNX.

Aufgrund der Verfügbarkeit mehrerer Varianten im gleichen Gehäuse fiel die Wahl auf die »PSoC« Mikrokontroller der Firma »Cypress Semiconductor«. Durch diese Gegebenheit ist es möglich verschiedene Bestückungsvarianten zu realisieren. Des Weiteren unterstützen diese Mikrokontroller eine Eingabetechnik mit dem Namen »CapSense« wodurch sich Kupferflächen und einfache Litzen als Schalter, Slider und Annäherungsschalter nutzen lassen (Abb. 42 und Abb. 43).

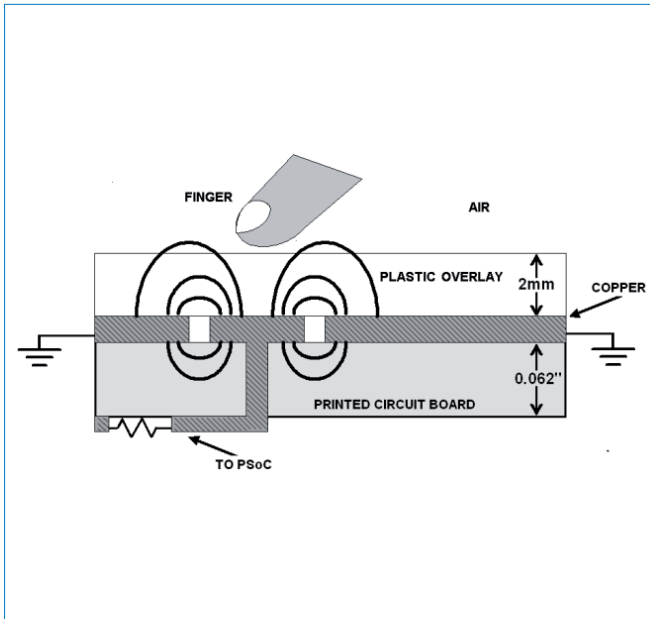


Abb. 42: Funktionsweise »CapSense« Taste (Querschnitt einer Leiterplatte)

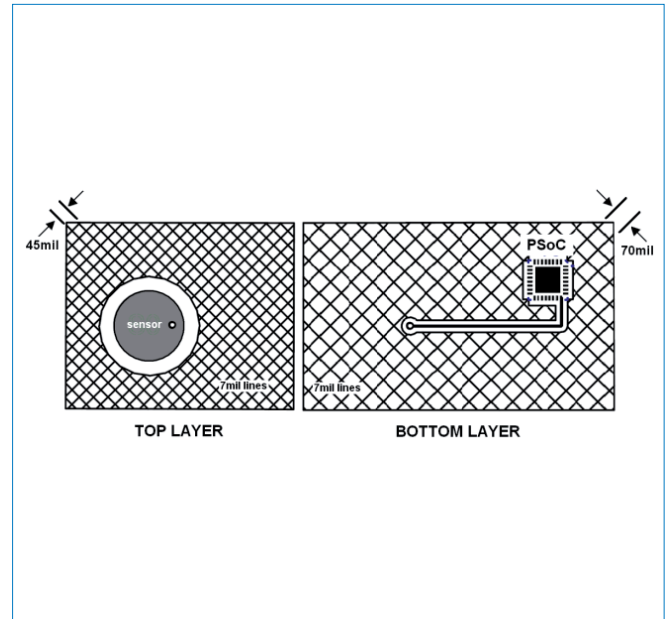


Abb. 43: Layout einer »CapSense« Taste (Anordnung und Schirmung)

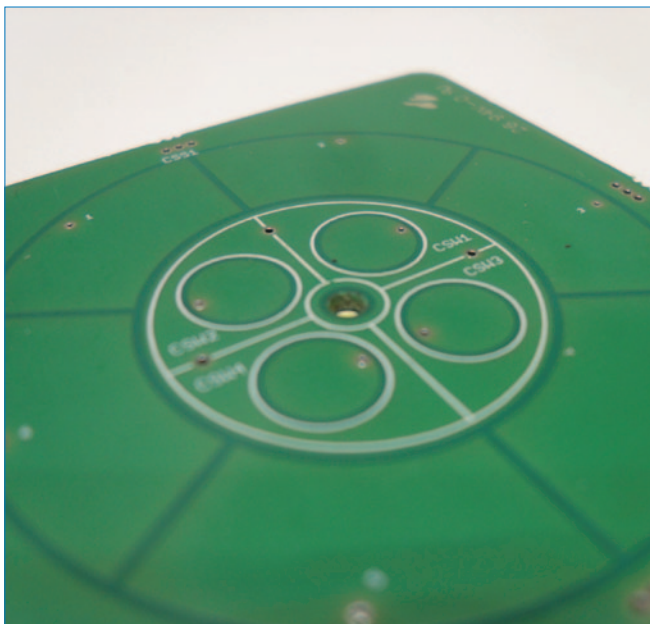


Abb. 44: Bedienfeld mit »CapSense« Tasten »radial-slider«

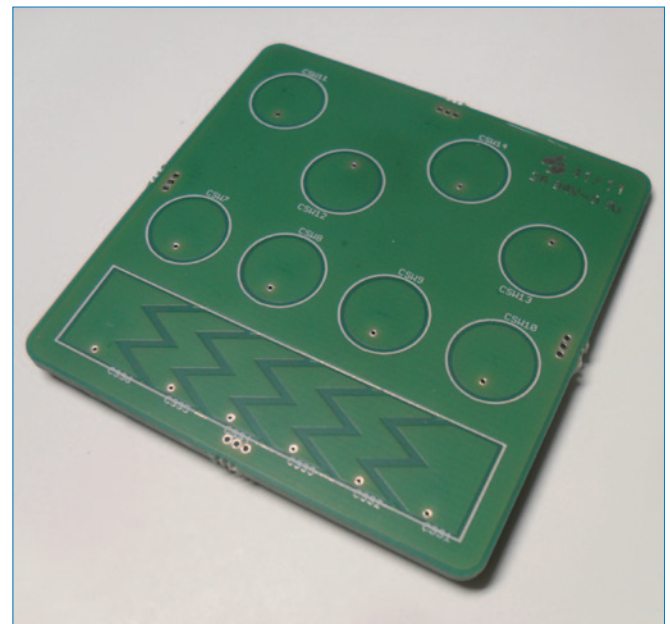


Abb. 45: Bedienfeld mit »CapSense« Tasten und »linear slider«

Dies ist eine günstige Möglichkeit Eingabeoberflächen zu gestalten und eröffnet viele Möglichkeiten im Bezug auf das Design (Abb. 44 und Abb. 45). Solche Eingabeoberflächen müssen natürlich am Besten in vorhandene Einbaudosen in der Wand passen, sodass man im besten Fall einfach den Lichtschalter gegen das Eingabemodul tauschen kann. Das Problem, welches hier nun auftritt ist, dass jede elektronisch Schaltung auch Strom benötigt. Um die Steuerung interessant zu machen, müsste sie mit Netzspannung funktionieren. Technisch wirft dies Probleme auf, da die Netzspannung auf eine stabile 5 VDC Festspannung ohne viel Restwelligkeit transformiert werden muss. Bei sehr geringen Leistungsklassen (Hier ca. 0,25 Watt bis 0,5 Watt) ist die Auslegung eines solchen Netzteils recht kompliziert und kostenintensiv. Allerdings besteht bei Neubauten die Möglichkeit das gesamte Gebäude mit einer zentralen Kleinspannungsversorgung auszustatten, was den Einsatz eines solchen Eingabemoduls erleichtert.

Rein systematisch gesehen konkurriert dann dieses System mit Hausbus-Systemen wie KNX oder DALI, was einen Absatz des Systems wieder als schwierig gestalten könnte, da KNX und DALI etablierte Standards darstellen. Durch den Einsatz eines Mikrokontrollers für die Erfassung der Eingaben, besteht jedoch ferner die Möglichkeit die Kommandos der Eingabemodule an die zentrale KNX oder DALI-Steuerung zu übergeben und von dort aus dann die Leuchten mittels einem sogenannten »Aktor« zu steuern. Um das gesamte Steuerungssystem für alle diese Möglichkeiten offen zu halten, wurde beschlossen ein Eingabemodul sowie einen eigenen »Aktor« (Auswert- und Steuereinheit) zu entwickeln. Somit kann das Eingabemodul bei Bedarf vom Kunden eingesetzt werden. Die Kommunikation mit der Leuchte erfolgt entweder über unser eigenes System, welches Kabelgebunden oder mittels Funk kommunizieren kann oder aber über einen Standard wie KNX, DMX oder DALI. Des Weiteren kann die Leuchte auch über Systeme anderer Hersteller, wie zum Beispiel »INSTA FUNK« oder ein ähnliches System mit passenden Aktoren gesteuert werden.

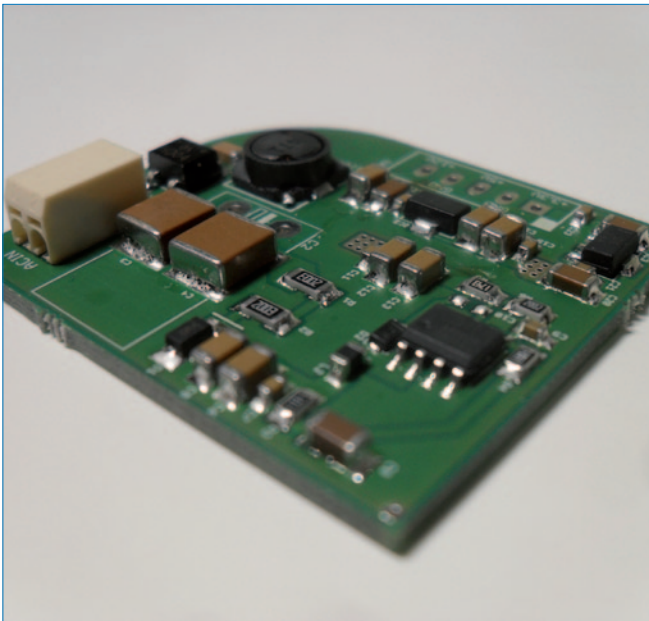


Abb. 46: Netzteilmodul für Eingabe- und Auswerteinheit (Oberseite)

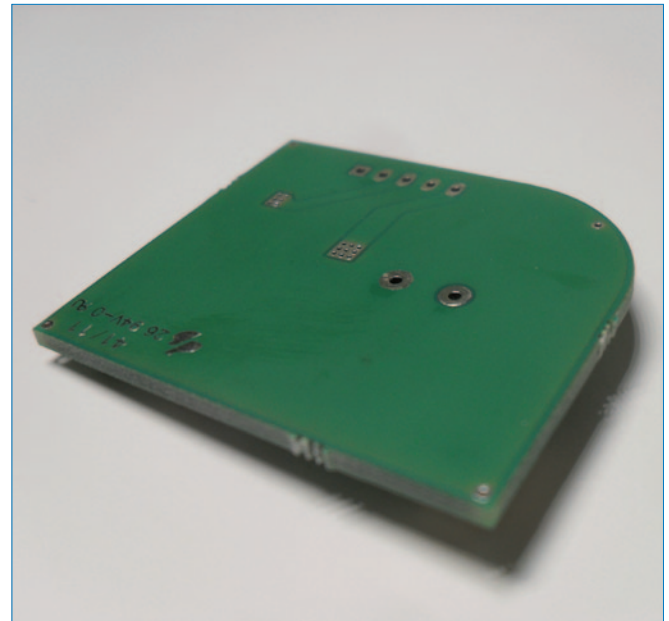


Abb. 47: Netzteilmodul für Eingabe- und Auswerteinheit (Unterseite)

Das gesamte Steuer-System ist modular aufgebaut. So kann zum Beispiel ein Netzteilmodul (Abb. 46 und Abb. 47) an das Eingabemodul mittels Stecker (Board-to-Board) gesteckt werden, oder aber man verwendet eine zentrale Kleinspannungsversorgung, was sich natürlich positiv auf die Investitionskosten auswirkt. Ein weiteres Merkmal ist, dass das Eingabemodul getrennt von dem Auswertmodul (Abb. 48) für die Eingaben hergestellt wird. Somit kann eine größere Anzahl Auswerteinheiten hergestellt und mit verschiedenen Eingabemodulen versehen werden. Diese Auswerteinheit kann entweder mittels Kabel oder mittels Funk mit dem Auswert- und Steuermodul der Leuchte (Abb. 49) verbunden werden die beiden Mikrokontroller kommunizieren via i<sup>2</sup>C, I<sup>2</sup>S<sup>2</sup>P oder 1-Wire®-Protokoll. Für die Kommunikation via Funk ist eine Buchse zum Anschluss fertiger Funkmodule vorgesehen, welche auf einer weltweit freien Frequenz senden und bereits über alle nötige Zulassungen verfügen. Das nutzbare Frequenzband wird jedoch auch häufig bei Funktelefonen eingesetzt, was die Anwendung der Technik in der Praxis möglicherweise aufgrund von Wechselwirkungen mit einigen Funktelefonen verkomplizieren kann. Die Entwicklung einer Kommunikation über die Stromleitung (PowerLine) wurde Aufgrund der eingeschränkten Nutzbarkeit und des geringen Raums innerhalb einer Installationsdose nicht weiter verfolgt.

Sensorik ist in diversen Ausführungen (Bewegungsmelder, Anwesenheitssensoren, Tageslichtsensoren) auf dem Markt erhältlich und relativ einfach in unser System zu implementieren. Da es eine Vielzahl an Sensorik gibt, welche je nach Anwendung ausgewählt werden muss, wurde von der Implementierung eines Sensors in die Steuerung vorerst abgesehen. Dieser Schritt kann erfolgen, wenn eine spezifische Nachfrage besteht.

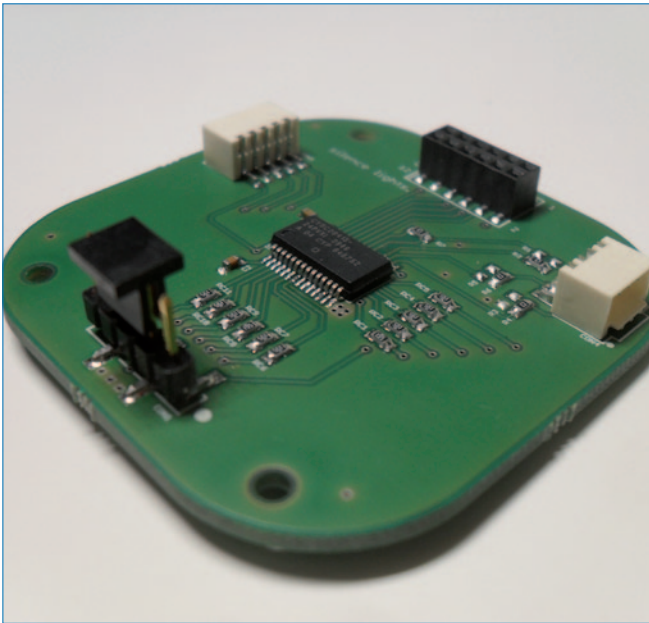


Abb. 48: Auswertereinheit für »CapSense« Tasten (Eingabemodul)

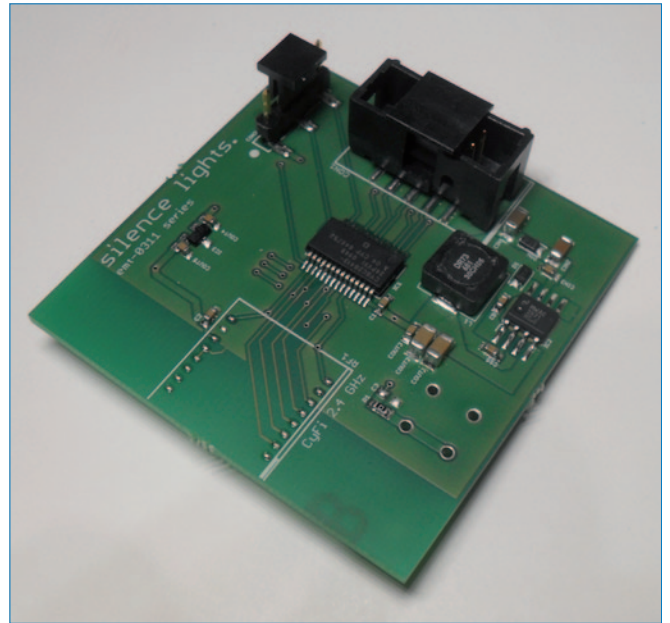


Abb. 49: Auswert- und Steuermodul (Leuchte)

Generell hat sich während der Entwicklung der Steuerung gezeigt, dass die Nachfrage nach ausgefeilten Steuersystemen eher gering ist. Trotz der Vorteile, welche hierdurch erreicht werden steht meist der Kostenaufwand nicht im Verhältnis. Die Nachfrage nach einfachen Wandeinbaudimmern ist aktuell noch am größten. Da die hier im Projekt entwickelten Netzteile, sowie Netzteile anderer Hersteller ohne viel Zusatzelektronik durch die Aktoren der meisten Hausbussysteme gesteuert werden können, steht für uns die Serienproduktion unseres Steuerungssystems aktuell in keinem Verhältnis zum möglichen Absatzpotenzial.

### Herstellung der Gehäuse

Für die Herstellung der Gehäuse kam die für dieses Projekt gekaufte CNC Fräsmaschine Mikron VCE 750 (Abb. 50) zum Einsatz. Die Anschaffung dieser Maschine war aufgrund der hohen Kosten bei einer Fremdfertigung der günstigste Weg zur Bearbeitung des Aluminium Rohmaterials. Für das Gehäuse haben wir aufgrund der guten thermischen und mechanischen Eigenschaften die Legierung AlMgSi1 gewählt. Das Material ist Des Weiteren gut am Markt verfügbar, lässt sich sehr gut zerspanen und eloxieren.



Abb. 50: CNC Fräsmaschine Mikron VCE 750



Um die Wechselzeiten des sogenannten »Werkstücks« zu minimieren und die CNC Fräsmaschine optimal auszulasten, wurde ein Nutzen angelegt. So war es möglich mehrere Gehäuse aus einer Platte herzustellen. Nach der Herstellung der Prototypen wurde der Bearbeitungsvorgang analysiert und mittels der gewonnenen Erkenntnisse optimiert. Für die Herstellung werden zuerst 3D-Daten benötigt (Abb. 51), welche dann mittels Software in einen für die Fräsmaschine verständlichen Code (Abb. 52) umgesetzt werden. In dieser Software müssen unter anderem auch alle Parameter der zu verwendenden Werkzeuge eingegeben werden (Abb. 53).

Auch wenn die Software viele Vorgänge und Einstellungen optimiert, erreicht man nur durch die Kombination eines erfahrenen Nutzers sowie einer guten Software um ein optimales Ergebnis. Nach Fertigstellung der Gehäuse wurden diese per Hand nachbearbeitet und anschließend zum Schutz und zur optischen Aufwertung zum Eloxieren gegeben. Durch dieses elektro-chemische Verfahren wird eine Schutzschicht aus Aluminiumoxid generiert. Dieses Verfahren unterscheidet sich deutlich von einer Lackierung oder einer anderen Art der Beschichtung, da hier die oberste Schicht des Aluminiums selbst in Aluminiumoxid umgewandelt wird. Bei Bedarf kann, je nach Aluminiumlegierung, diese Oxidschicht auch eingefärbt werden. Die Qualität des Eloxals hängt jedoch stark von der Qualität der Oberfläche des zu eloxierenden Objekts ab. Eine fein bearbeitete Oberfläche ist die Voraussetzung für ein optimales Ergebnis.

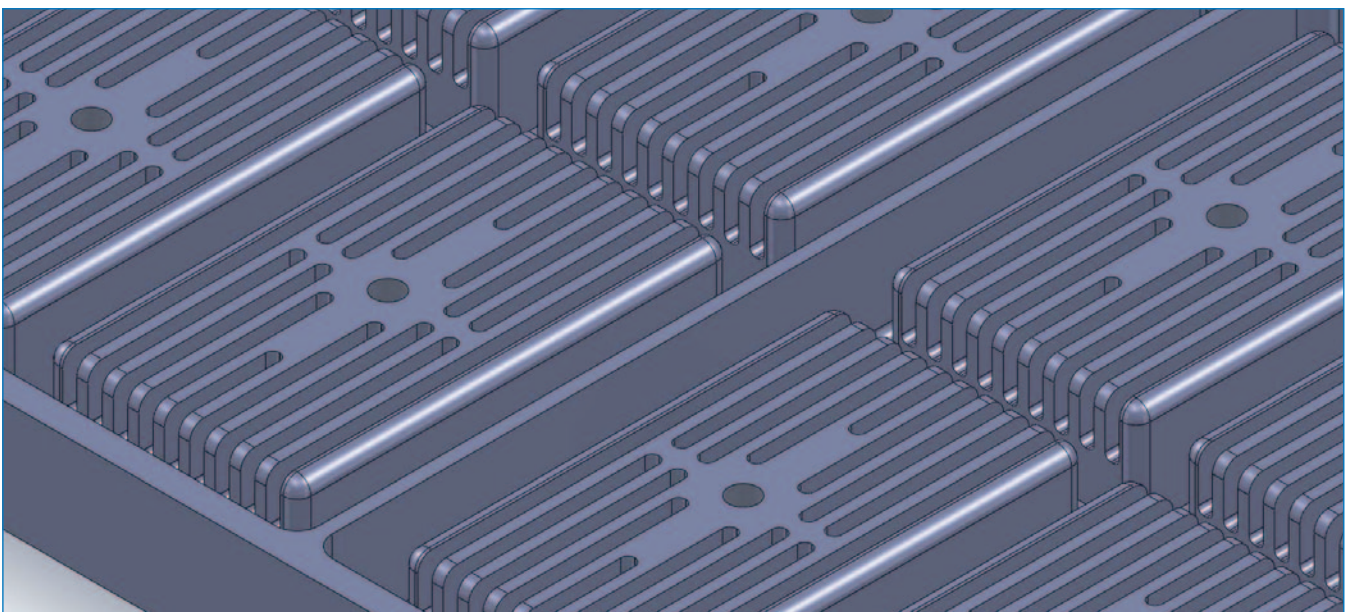


Abb. 51: 3D-Zeichnung des Nutzens der LED-Gehäuse

```

%
:0101
G58G90
T7M06
S6100M3
G43H07
G00X-131.278Y154.349Z89.000M08
G00Z87.500
X-131.278Y154.349Z78.500
G01Z72.500F820.
X-132.929Y148.940
X-132.971Y146.857
X-132.155Y144.940
X-129.654Y141.559
X-128.841Y139.559
X-128.581Y137.059
X-129.094Y134.559
X-130.171Y132.559
X-131.777Y130.905
X-131.909Y130.769
X-132.081Y129.968
X-131.628Y128.566
X-130.416Y126.688
X-128.599Y124.877
X-127.374Y124.860

```

Abb. 52: Code eines Fräsprogramms



<b>Kommentar:</b>			
<b>Geometrie:</b>		BAUGRUPPE-Fräsnutzen12-fachxfm-48xx	
	<b>Xmin:</b>	-370.00 Ymin:	
	<b>Xmax:</b>	370.00 Ymax:	
<b>Rohteilmodell:</b>		Voller Block:	
<b>Nr.</b>	<b>Fräsbahn</b>		
1	Schruppen Z-Konstant Restmat.	15.00	3.50
2	Schruppen Z-Konstant Restmat.	8.00	0.00
3	Ebene Bereiche Restmaterial	8.00	0.00
4	Tangential zur Kurve	8.00	0.00
5	Tangential zur Kurve	8.00	0.00
6	Schruppen Z-Konstant Restmat.	5.00	0.00
7	Schruppen Z-Konstant Restmat.	4.00	2.00
<b>Längen und Zeiten selektierter Fräsbahnen: 1 2 3 4 5 6 7</b>			
<b>Länge: Gesamt</b>		<b>Zeit: Gesamt</b>	
496061.22		12:16:49	
<b>Verbundene Fräsbahnen</b>			
<b>Nr.</b>	<b>Name</b>		
1	cf_0101.bic		2 3 4

Abb. 53: Dokumentation des Fräsvorgangs mit Bearbeitungsdauer

Die Kunststoffteile, bei dieser Leuchte nur die Scheibe wurden aus Evonik Röhm Plexiglas (PMMA) hergestellt. Die Bearbeitung erfolgte durch einen Subunternehmer. Mittlerweile verfügen wir selbst über einen sogenannten »LaserCutter« (Abb. 54), mit welchem wir jegliche Art von Kunststoffen auf der Basis einer Computerzeichnung schneiden können. Im »Gravur-Modus« können sogar Schriftzüge oder Typenschilder eingraviert werden (Abb. 55). Bei diesem Vorgang wird Material abgetragen, durch die Einstellung der Leistung und der Verfahrensgeschwindigkeit des Lasers kann die Tiefe der Gravur bestimmt werden.



Abb. 54: Plexiglasbearbeitung mittels CO<sub>2</sub>-Laser



Abb. 55: Lasergravierter Schriftzug in schwarz eloxiertem Aluminium

### Modulares Zubehör

Durch die prinzipielle Veränderung des im Antrag formulierten Aufbaus wurden viele Zubehörteile überflüssig. Passende Lüfter zur aktiven Kühlung des LED-Moduls sind auf dem Markt verfügbar. Durch die PC-Industrie und den Trend zum »Silent-PC« steht eine große Auswahl an Modellen zur Verfügung, welche sowohl eine gute Entwärmung als auch eine geringe Geräuschentwicklung garantieren. Allerdings haben unsere Recherchen bezüglich der Umgebungstemperatur in Decken und Büroräumen gezeigt, dass der Einsatz eines Lüfter in 90% aller Fälle unnötig ist. Die Option einen Lüfter am LED-Gehäuse zu montieren besteht jedoch weiterhin.



Abb. 56: ebm-papst Axial-Lüfter Typ »514 F«

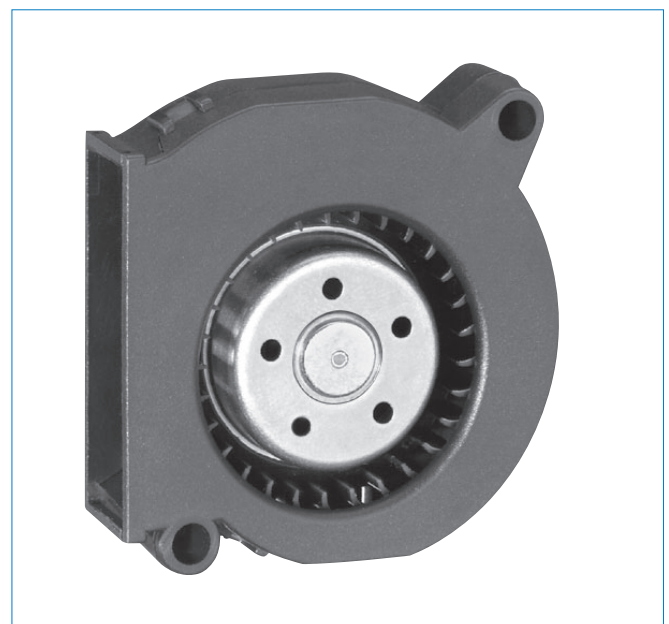


Abb. 57: ebm-papst Radial-Lüfter Typ »RLF 35-8/14 N«

Die Recherchen bezüglich einer Lithium-Akku basierenden Notstromversorgung ergab, dass in Bereichen in welchen eine Notstromversorgung benötigt wird, diese meist zentral im Gebäude vorhanden ist. Der Einsatz der Lithium-Akku-Technologie verursacht erhebliche Zusatzkosten und ist durch das Vorhandensein zentralisierter Systeme überflüssig. Sollte widererwarten der Bedarf an solch einer dezentralen Notstromversorgung bestehen, ermöglicht das Steuermodul die Implementierung einer Überwachung der Netzspannung.

Den Einsatz von speziell angepassten Reflektorelementen haben wir häufig diskutiert. Da je nach Einsatzgebiet verschiedene Abstrahlcharakteristiken benötigt werden, ist die Berechnung und Entwicklung solch einer Vielzahl von Reflektoren recht teuer. Zum Einen müssen die Reflektoren vorab in einem Simulationsprogramm berechnet werden, zum Anderen müssen die Reflektorableche nach den berechneten Parametern hergestellt und zur Prüfung vermessen werden. Aktuell befinden sich jedoch einige hochwertige Sekundäroptiken für nahezu jede Einzel-LED auf dem Markt, für welche bei den meisten Herstellern sogar die Eulumdat Dateien verfügbar sind, sodass auch ohne die Vermessung einer ganzen Leuchte vorab simuliert werden kann, wie die Optik sich auf die Ausleuchtung auswirkt. Dies spart Kosten und Zeit. Da viele dieser Optiken Effizienzen von über 85% aufweisen, ist hier eine Eigenentwicklung so gut wie unnötig.



Abb. 58: LED-Sekundär Optik (PMMA) mit Halter



Abb. 59: Reflektor für LEDs

## TÜV-Prüfung der Prototypen

Der aktuelle Status im Bezug auf diverse Richtlinien und verpflichtende Abnahmen in der EU haben uns dazu veranlasst eine Prüfung der Leuchten zu verschieben, bis die Rechtslage der anzuwendenden Normen für LED-Leuchten geklärt und vereinheitlicht ist.

Laut den Aussagen des »TÜV SÜD Product Service« muss für jede Version der Leuchte eine Prüfung nach der »Norm für Photobiologische Sicherheit« (EN 62471) durchgeführt werden.

*»Der Marktanteil der LED-Beleuchtung nimmt stetig zu; bedingt durch die zunehmenden Anforderungen bzgl. der Energieeffizienz. Bei allen Vorteilen, die der Einsatz von LED-Beleuchtung bietet, gibt es jedoch einen wichtigen Punkt, den es zu beachten gilt. Dabei handelt es sich um die photobiologische Sicherheit. Deren Anforderungen sind in der Norm EN 62471 definiert. Durch Prüfungen der photobiologischen Sicherheit nach EN 62471 wird verifiziert, ob die LED die für das menschliche Auge erforderlichen Grenzwerte einhält.*

*Die Notwendigkeit einer Prüfung wird im Vorfeld im Rahmen einer Risikoanalyse, z. B. durch einen Test in der Ulbricht-Kugel, ermittelt. Sie gibt zudem Aufschluss über die Einhaltung der Grenzwerte nach CEI IEC 62471 für die fotobiologische Sicherheit von Lampen.*

*Im Rahmen der spektralen Anpassung an die Eigenschaften des menschlichen Auges nimmt die*

Intensität von Blauanteilen zu, die bei längerer Einwirkzeit der Netzhaut schaden können. Diese Blendwirkung nennt man auch „Blaulichtgefahr“. Die RICHTLINIE 2006/25/EG legt die Grenzwerte fest, die von inkohärenten Strahlungsquellen einzuhalten sind. Neben der thermischen Schädigung gibt es eine photochemische Gefährdung, die z. B. bei phosphorkonvertiertem Licht auftreten kann.

Bereits die allgemeine Produktsicherheitsrichtlinie 2001/95/EC und die Niederspannungsrichtlinie 2006/95/EC fordern, dass Strahlung den Menschen nicht schädigen darf. Das gilt natürlich auch für Licht, welches von LED-Lampen und Leuchten erzeugt wird. Zusätzlich legt die EU-Richtlinie 2006/25/EC die Mindestanforderungen an Gesundheit und Sicherheit zum Schutz der Arbeitnehmer vor Risiken durch die Exposition mit künstlicher optischer Strahlung fest. Die Mitgliedstaaten müssen diese Richtlinie bis zum 27. April 2010 in nationales Recht umsetzen.« [Tex02]

Alleine die Prüfung für jede einzelne Leuchtenversion würde das gesamte Produkt wirtschaftlich uninteressant machen. Laut den zuständigen Mitarbeitern des »Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI)« sowie den Experten bei der »Technischen Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik« wäre diese Prüfung nicht nötig, da der LED-Hersteller bereits die LED alleine bei Maximalstrom prüfen lassen hat.

Da der Ausschlaggebende Wert die Strahlungsdichte ist, ist es unmöglich mit zwei gleichen LEDs den Maximalwert einer LED zu überschreiten. Denn bei zwei LEDs ist auch die leuchtende Fläche doppelt so groß, dementsprechend bleibt der Maximalwert konstant. Zusätzlich verfügt jedes LED-Modul über eine Scheibe, durch welche Minimum 10% der optischen Leistung verloren gehen. Bei zusätzlichen Sekundäroptiken können als Minimalwert nochmals 5% abgezogen werden. Somit ist es, wie oben dargestellt, unmöglich den gemessenen Wert einer einzelnen LED zu überschreiten, wenn der gleiche LED-Typ in einer Leuchte eingesetzt wird.

Trotz unseren Bemühungen und den Ausführungen der TU Darmstadt war es dem »TÜV SÜD Product Service« bis jetzt leider nicht möglich diese physikalische Tatsache in der Norm umzusetzen.

## Tests in Büroräumen

Für die Test wurde uns von der Sparkasse Dieburg ein Büro in der Verwaltung zur Verfügung gestellt. Dieses Büro ist nahezu identisch mit den beiden angrenzenden Büroräumen. Somit konnten wir auch direkte Vergleiche ziehen. Ein Problem bei diesen unmittelbaren Vergleichen ist der »Gewöhnungsfaktor«. Eine Person, welche bereits länger unter einer bestimmten Lichtquelle arbeitet empfindet deren Licht als »normal«. In Abbildung 60 ist der Unterschied des Spektrums von Leuchtstofflampe und LED bei gleicher Farbtemperatur (CCT) deutlich erkennbar.

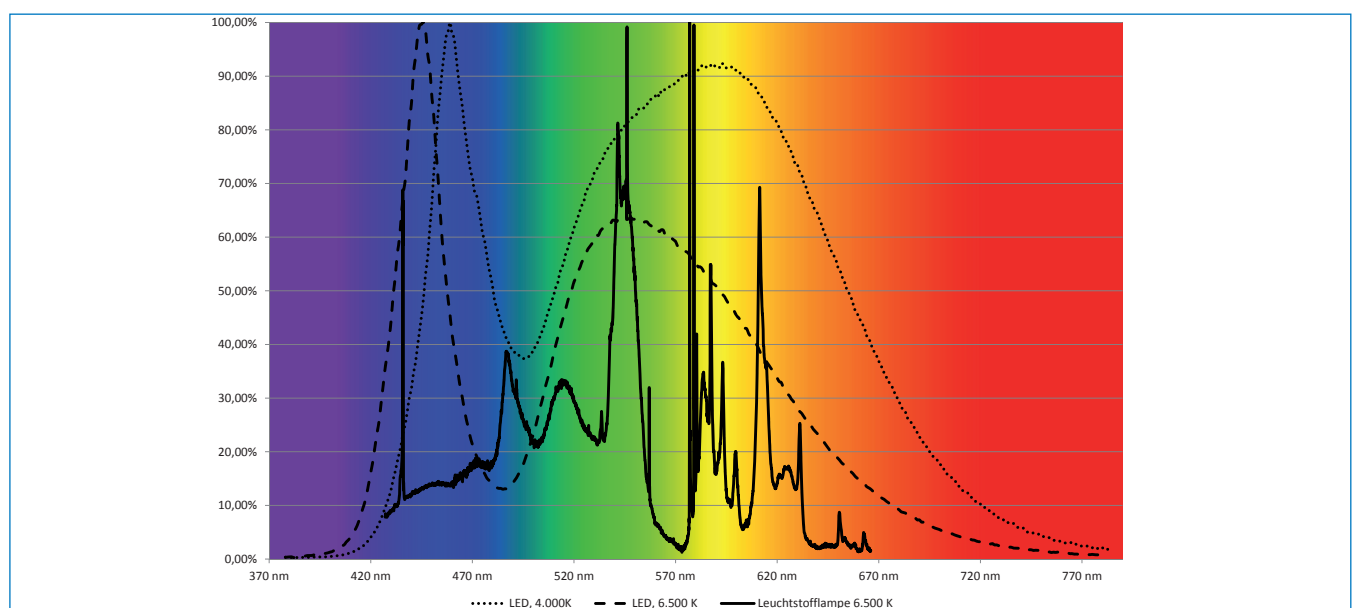


Abb. 60: Relative spektrale Verteilung



Abb. 61: Originalbeleuchtung des Testbüros



Abb. 62: Prototypen Leuchten installiert im Testbüro

Die auf Abbildung 62 dargestellten, installierten Leuchten wurden mit LEDs mit einer Farbtemperatur von 4.000 K bestückt. Aus Abbildung 60 geht hervor, dass deren Spektrum den größten spektralen Bereich mit ausreichender Intensität abdeckt.

Bei den Befragungen der Mitarbeiter, welche in den auf LED-Technik umgestellten Büros arbeiten zeigte sich ein Muster, das bei fast jeder Umstellung auf LED-Technik hervortritt. Anfänglich beschrieben die Mitarbeiter, dass das Licht »blenden« würde (Abb. 63). Die Lichtqualität wäre jedoch sehr gut. Später stellte sich heraus, dass die empfundene Blendung einfach dadurch zustande kam, dass die Mitarbeiter häufig direkt in die Leuchten schauten. Dies hat den einfachen Grund, dass hier ein neues »Gerät« installiert wurde, was natürlich anfangs genau beobachtet wird. Spätere Befragungen (Abb. 64) ergaben ein durchwegs positives Empfinden bezüglich der Beleuchtung. Farben würden kräftiger erscheinen und das Schriftbild auf den Dokumenten wäre deutlich kontrastreicher als mit den vorher installierten Leuchtstofflampen.

# Fragebogen



FACHGEBIET  
LICHTTECHNIK

## Zu Ihrer Person

		Altersgruppe		bis 30	<input type="checkbox"/>
Geschlecht	weiblich	<input type="checkbox"/>		31-40	<input checked="" type="checkbox"/>
	männlich	<input checked="" type="checkbox"/>		41-50	<input type="checkbox"/>
				51-60	<input type="checkbox"/>
Brille/ Kontaktlinsen	keine	<input type="checkbox"/>		über 60	<input type="checkbox"/>
	weitsichtig	<input type="checkbox"/>			
	kurzsichtig	<input checked="" type="checkbox"/>	Farbfehlsichtigkeit		<input type="checkbox"/>

## Wie wirkt die Beleuchtung des Arbeitsraumes auf Sie?

Bitte beurteilen Sie den momentanen Zustand der Beleuchtung zur aktuellen Tageszeit und Wetterlage!

angenehm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unangenehm
störend	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	nicht störend
langweilig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	anregend
freundlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unfreundlich
kalt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	warm
blendend	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	nicht blendend
gleichmäßig	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ungleichmäßig
hell	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	dunkel
sanft	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	grell
gelblich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	bläulich
monoton	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	abwechslungsreich

# Fragebogen



FACHGEBIET  
LICHTTECHNIK

## Zu Ihrer Person

		Altersgruppe		bis 30	<input type="checkbox"/>
Geschlecht	weiblich	<input type="checkbox"/>		31-40	<input checked="" type="checkbox"/>
	männlich	<input checked="" type="checkbox"/>		41-50	<input type="checkbox"/>
				51-60	<input type="checkbox"/>
Brille/ Kontaktlinsen	keine	<input type="checkbox"/>		über 60	<input type="checkbox"/>
	weitsichtig	<input type="checkbox"/>			
	kurzsichtig	<input checked="" type="checkbox"/>	Farbfehlsichtigkeit		<input type="checkbox"/>

## Wie wirkt die Beleuchtung des Arbeitsraumes auf Sie?

Bitte beurteilen Sie den momentanen Zustand der Beleuchtung zur aktuellen Tageszeit und Wetterlage!

angenehm	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unangenehm
störend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nicht störend
langweilig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	anregend
freundlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unfreundlich
kalt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	warm
blendend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nicht blendend
gleichmäßig	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ungleichmäßig
hell	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	dunkel
sanft	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	grell
gelblich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	bläulich
monoton	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	abwechslungsreich

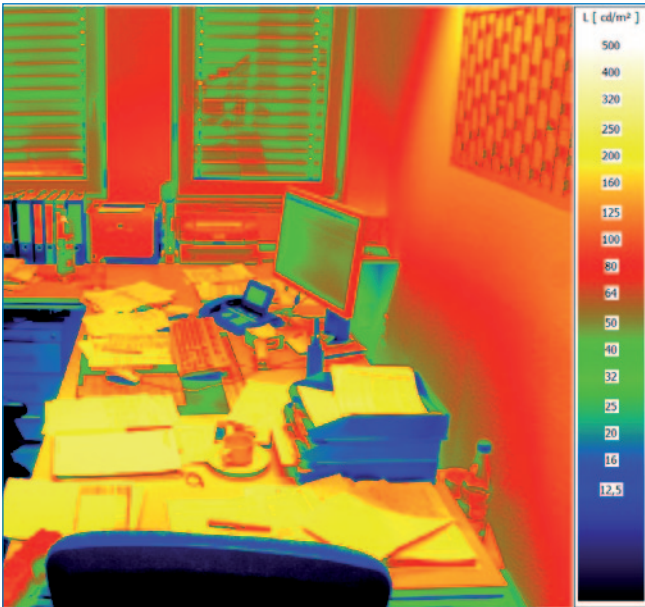


Abb. 65: Leuchtdichte bei Beleuchtung mit Leuchtstoff Leuchten

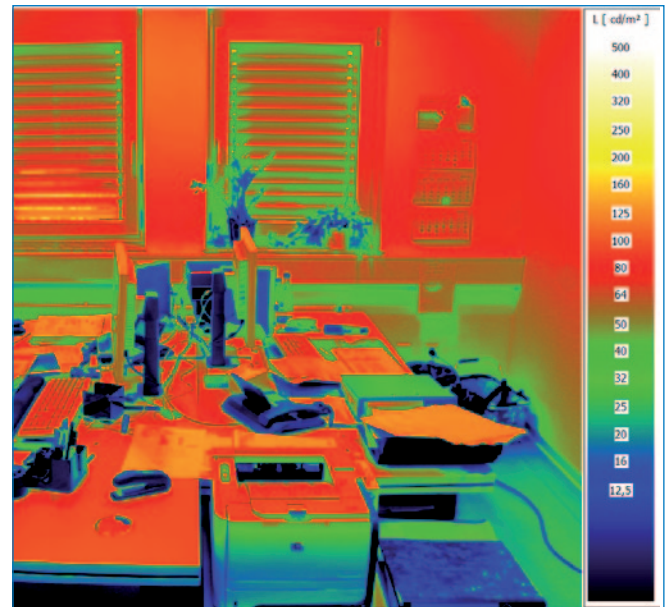


Abb. 66: Leuchtdichte der installierten Prototypen Leuchten

Die Darstellungen in Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen die gemessenen Leuchtdichten in einem Büro mit Leuchtstoff Leuchten und im »Testbüro« mit den installierten Prototypen auf LED-Basis. Obwohl der mit Leuchtstoff Leuchten ausgestattete Raum laut den Messungen eine höhere Leuchtdichte aufweist, ist eine Bewertung nur bei gleichzeitiger Betrachtung der Beleuchteten Fläche und der eingebrachten elektrischen Leistung möglich (Abb. 67).

Hier wird eindeutig dargestellt, dass über 60% Energie weniger benötigt werden um die gleiche Beleuchtungsstärke zu erreichen. Bei der Planung einer Neuinstallation besteht sogar die Möglichkeit die Ersparnis durch den Einsatz von LED-Modulen mit unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken noch zu erhöhen. So könnten zum Beispiel Leuchten mit engerem Abstrahlwinkel über den Schreibtischen montiert werden, da hier die Beleuchtungsstärke am höchsten sein sollte. In den »Verkehrswegen« des Büros könnten wiederum breitstrahlende LED-Module verwendet werden um eine Grundhelligkeit zu schaffen.

	Leuchtmittel	Leuchtstofflampe	LED		
	Raumnummer	09-07	09-09		
	Grundfläche des Raumes [m²]	15,99	17,64		
	Fensterfläche [m²]	3	3		
	elektrische Wirkleistung [W]	330	82		
	Bemerkungen	mit KVG	LED Prototyp	Tisch links	Tisch rechts
Messung vor der Tastatur (Jalousie geschlossen)	E <sub>v</sub> [lx]	745	485	470	500
	CCT [K]	3900	4185	4180	4190
	x	0,387	0,368	0,368	0,368
	y	0,39	0,3545	0,355	0,354
Messung an der Schreibtische (Jalousie geschlossen)	E <sub>v</sub> [lx]	750	488,5	512	465
	CCT [K]	3900	4213	4226	4200
	x	0,388	0,3665	0,366	0,367
	y	0,389	0,3535	0,353	0,354
	Kennwert [W <sub>el</sub> / (m² * 100 lx)]	<b>2,77</b>	<b>0,96</b>		

Abb. 67: Auswertung der Messung



## Ergebnisse der Dauertests

Die Dauertests wurden je nach Fertigstellung der einzelnen Komponente gestartet und Ende Februar 2012 abgeschlossen. Getestet wurden hauptsächlich die Auswirkungen von erhöhten Umgebungstemperaturen auf die technischen relevanten Werte.

Bei den Netzteilen gingen wir von einer maximalen Umgebungstemperatur von 50°C aus. Dies dürfte unseren Recherchen nach in keinem Innenraum erreicht werden. Allerdings wäre es denkbar, dass diese Umgebungstemperatur zustande kommen könnte, falls die Isolation in den abgehängten Decken sich löst und direkt das Netzteil bedeckt. In Abb. 68 und Abb. 69 wird das Temperaturverhalten zweier auf dem Markt verfügbaren Netzteile dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass das Netzteil mit dem Temperaturverhalten in Abb. 68 bei 50°C Umgebungstemperatur nicht mehr in der Lage ist Leistung zur Verfügung zu stellen.

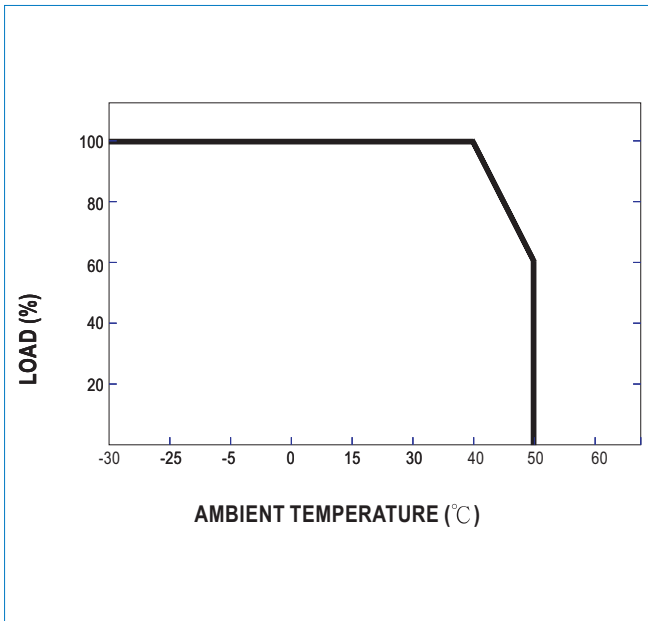


Abb. 68: Standard-Netzteil mit unzureichender Temperaturstabilität

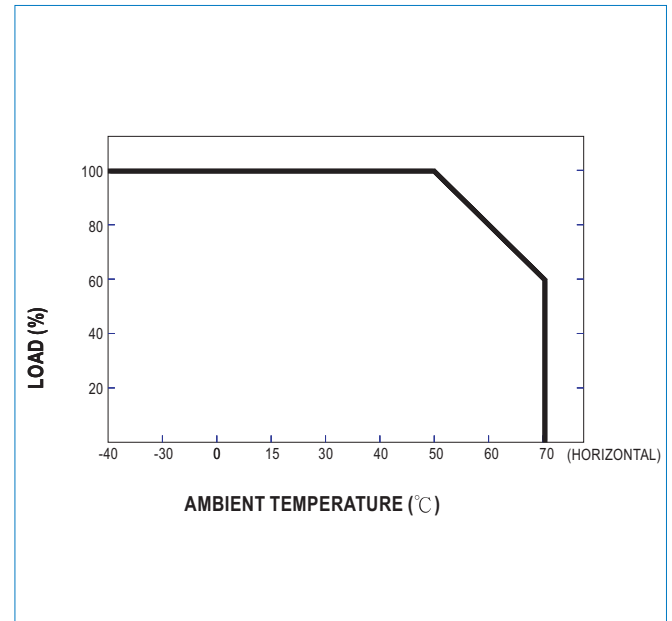


Abb. 69: Standard-Netzteil mit ausreichender Temperaturstabilität

Mit dem Temperaturverhalten aus Abbildung 69 sind unsere Anforderungen erfüllbar, was auch unsere praktischen Test mit diesem Netzteil belegen (Abb. 70). Aufgrund der steigenden Anforderungen hat sich die Anzahl der auf dem Markt verfügbaren Netzteile mit einer Temperaturfestigkeit  $\geq 50^\circ\text{C}$  deutlich erhöht.

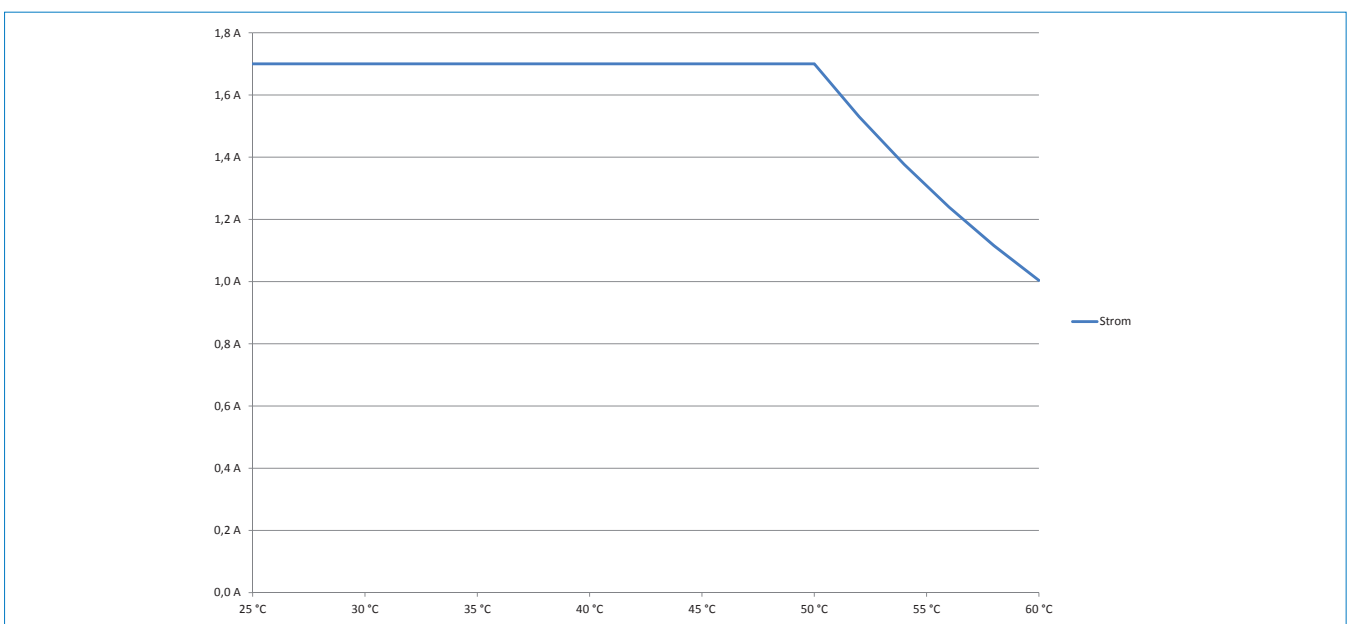


Abb. 70: Verhalten des Ausgangsstroms (Meanwell LPF-40-24)

Aus Abb. 71 geht das Temperaturverhalten der selbst entwickelten Netzteile hervor. Dieses unterscheidet sich deutlich von dem des Standard-Netzteils, was jedoch auf die unterschiedliche Topologie zurückzuführen ist. Der im Netzteilcontroller integrierte Übertemperaturschutz ist so ausgelegt, dass er den Ausgang abschaltet, wenn der eingestellte Konstantstrom nicht mehr gewährleistet werden kann.

Die Messung der LED-Module unter dem Einfluss erhöhter Umgebungstemperatur lieferte die Ergebnisse, wie erwartet (Abb. 72). Während der gesamten Dauer der Langzeitmessung konnte bei dem LED-Modul im Labor keine merkliche Veränderung des Lichtstroms oder des Farbortes gemessen werden. Dies bestätigt nach einer Hochrechnung und nach den Erkenntnissen der TU-Darmstadt im Bezug auf die LED-Alterung, dass eine Angabe der mittleren Lebensdauer mit 50.000 Stunden mehr als realistisch ist. Die mittlere Lebensdauer ist erreicht, wenn der Lichtstrom nur noch 70% des Initiallichtstroms aufweist. Bei einer Brenndauer von 10 Stunden pro Arbeitstag (Montag-Freitag), liegt die Lebensdauer der von uns eingesetzten LEDs also bei ca. 19 Jahren.

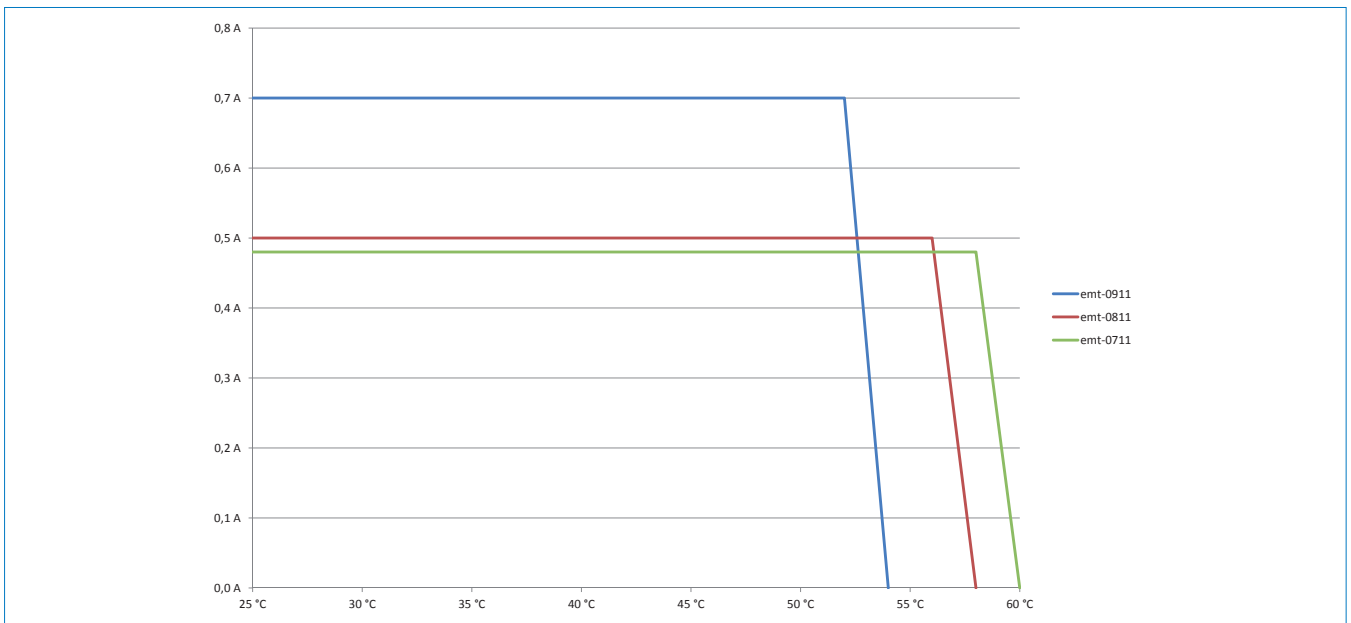


Abb. 71: Prototypen-Netzteile aus eigener Entwicklung mit ausreichender Temperaturstabilität

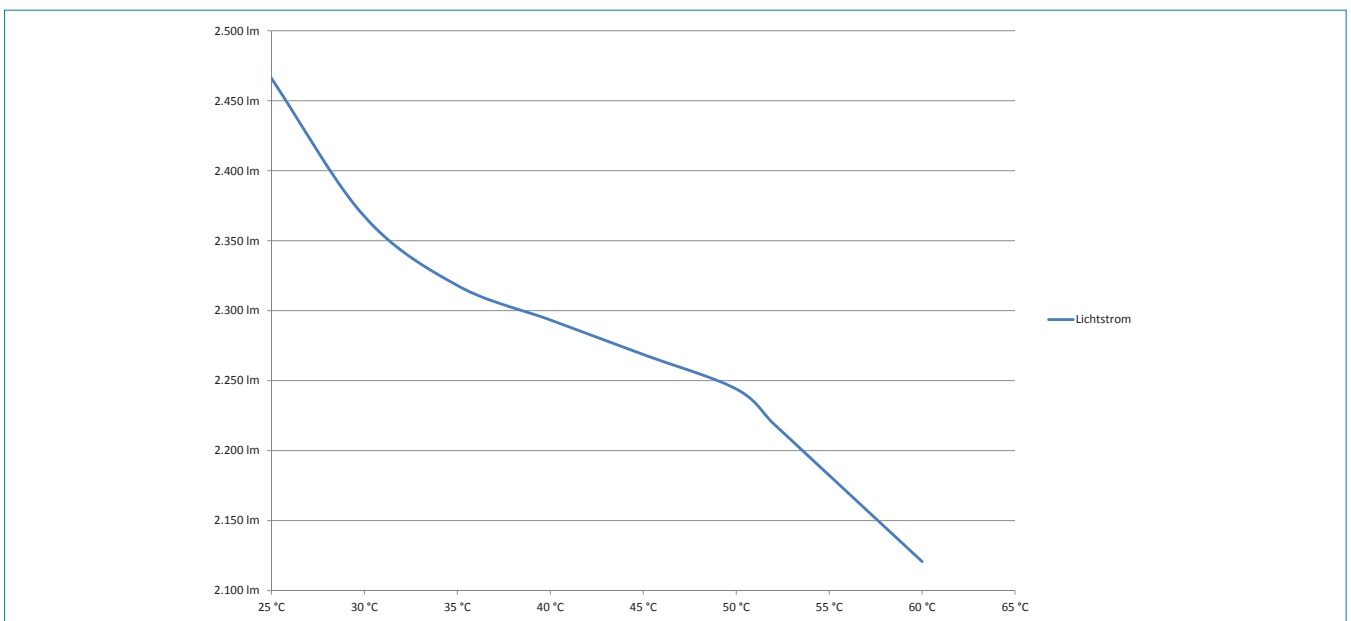


Abb. 72: Verhalten des Lichtstroms im Bezug auf die Umgebungstemperatur

## Fazit

Die Ergebnisse des Projektes sind sehr aufschlussreich und liefern eine gute Basis für kommende Entwicklungen. Die aus dem Projekt hervorgegangene modulare Leuchtenserie kann in vielen Punkten Zeichen setzen. Sowohl im Bezug auf die Leuchteneffizienz als auch im Bezug auf die Rentabilität. Durch das während der Projektlaufzeit entwickelte neue Konzept des »Baugruppenträgers« können für fast jede Anwendung angepasste Leuchten geliefert werden, was gerade für den Ersatz von bestehenden Installationen von großem Vorteil ist.

Aufgrund des Laborumbaus am Fachgebiet Lichttechnik und der vollständigen Auslastung der Firma silence light. GbR entstand eine erhebliche Verzögerung im Zeitplan. Jedoch war es uns sehr wichtig alle möglichen Aspekte zu betrachten um am Ende ein wirklich vermarktbare Produkt zu erhalten und nicht nur ein Labormuster.

Die Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Lichttechnik der TU-Darmstadt gestaltete sich auch bei diesem Förderprojekt wieder als sehr positiv für beide Parteien. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Forschung können in zukünftige Entwicklungen eingebunden werden.

Leider besteht auch aktuell noch nicht die Möglichkeit eine TÜV Abnahme zu erhalten, da es im Bezug auf die »Norm für Photobiologische Sicherheit« (EN 62471) noch zu keinem endgültigem Übereinkommen mit dem »TÜV SÜD Product Service« gekommen ist.

Die Installation in den Räumen der Sparkasse Dieburg bleibt weiterhin bestehen. Bezüglich einer Ausweitung der Installation über sämtliche Büroräume des Gebäudes wird bereits verhandelt. Die Vermarktung ist ein generelles Problem bei der LED-Technik, welches hauptsächlich an den Investitionskosten oder an schlechten Erfahrungen einiger potentiellen Kunden mit LED-Leuchten »Made in China« scheitert. Leider bedarf es viel Zeit einen Kunden davon zu überzeugen, dass er mit dieser neuen Technik bares Geld sparen kann. Viele Kunden wirtschaften nach dem Dogma des Investitionspreises und nicht nach Amortisationszeiten.