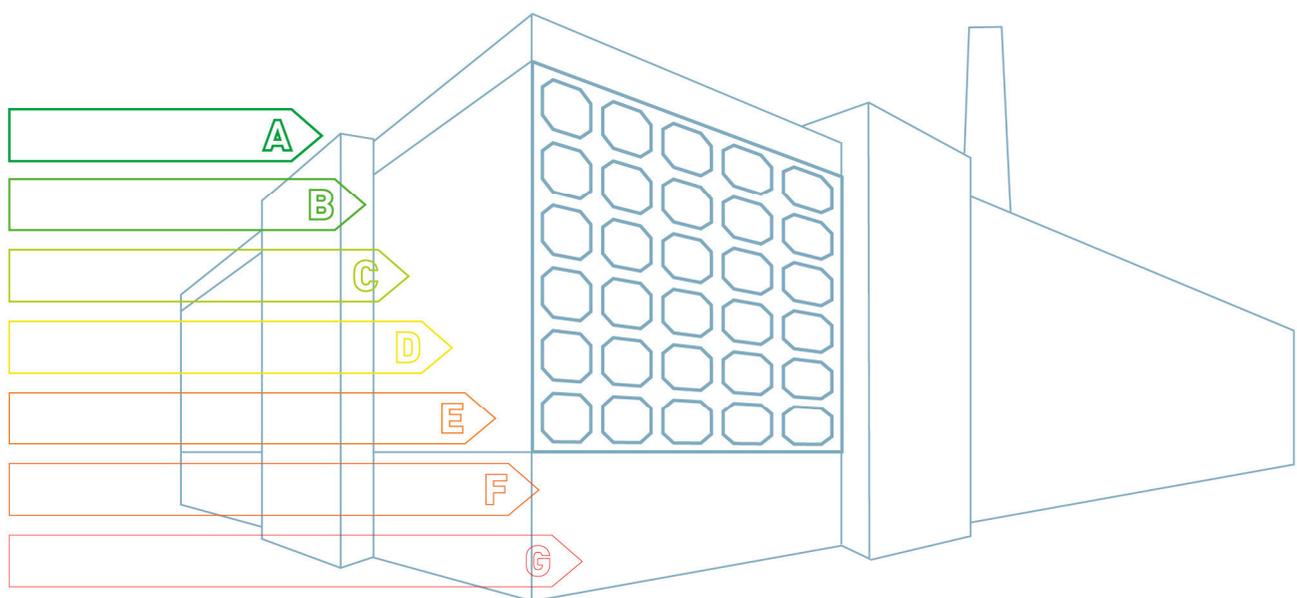




## Hocheffiziente LED-Optiken

Neuartige, hocheffiziente Optiken zur Optimierung der Lichtverteilung und Energieeffizienz von LED-Beleuchtungssystemen



## VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

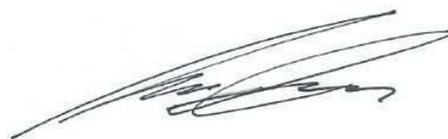
Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage [www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at) zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel  
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth  
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	3
1 Einleitung	4
1.1 Aufgabenstellung	4
1.2 Schwerpunkte des Projektes	4
1.3 Einordnung in das Programm	4
1.3.1 Energiestrategische Ziele	4
1.3.2 Systembezogene Ziele	5
1.3.3 Technologiestrategische Ziele	5
1.4 Verwendete Methoden	6
1.5 Aufbau der Arbeit	6
2 Inhaltliche Darstellung	8
3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	10
3.1 Vorgaben für die neue Optik	10
3.2 Hochleistungs-LEDs und zugehörige optische Systeme: momentane Stand der Technik	10
3.3 Minimierung optischer Verluste und des Oberflächenverschleißes	12
3.4 Multi-Point-Prinzip	15
3.5 Multi-Layer-Prinzip	19
4 Ausblick und Empfehlungen	22
5 Literaturverzeichnis	23

## Kurzfassung

Im Bereich der Hochleistungs-LEDs wurden zuletzt große Fortschritte erzielt, wodurch die Realisierung sehr effizienter Beleuchtungssysteme für Innen- und Außenanwendungen möglich wurde. Neben der Lebensdauer wird auch die Lichtausbeute der LEDs sukzessive verbessert. Die Lichtausbeute liegt mit  $> 100 \text{ lm/W}$  bereits heute im Bereich von Gasentladungslampen – lediglich die Natriumdampfampe weist eine höhere Lichtausbeute auf. Hochleistungs-LEDs sind zudem kompakter als Gasentladungslampen, was eine bessere Lichtlenkung gestattet. Zudem sind LEDs besser und schneller steuer- und dimmbar.

Neben einer weiteren Erhöhung der Lichtausbeute der LEDs kommt der Entwicklung innovativer, hocheffizienter optischer Systeme für LEDs ganz besondere Bedeutung zu. Ziel dieses Forschungsprojekts war daher die Konzeptionierung und Entwicklung hocheffizienter optischer Systeme für Hochleistungs-LEDs, um künftig durch optimierte Lichtverteilung, minimale Streuverluste und durch geringstmögliche optische (Transmissions-)Verluste ein Höchstmaß an Energieeffizienz dieser Beleuchtungssysteme zu erreichen. Durch diese hocheffizienten optischen Systeme soll es künftig möglich sein, den Energieverbrauch weiter deutlich zu senken. Es soll künftig aber auch möglich sein, vielfältige, bedarfsgerechte Lichtverteilungen zu realisieren und unerwünschte Lichtverschmutzungen zu minimieren.

Im Bereich der Außenbeleuchtung werden in der Regel möglichst homogene Lichtverteilungen gewünscht. Diese Anforderungen können durch konventionelle Beleuchtungssysteme nur eingeschränkt erfüllt werden. Durch eine Optimierung der Lichtverteilung kann ein beträchtlicher Beitrag zur Steigerung der Effizienz des Energieeinsatzes, zumindest um den Faktor 2, geleistet werden. Im Vergleich zu älteren Beleuchtungssystemen mit Gasentladungslampen kann die Verbesserung sogar noch deutlich höher ausfallen.

Eine Hochleistungs-LED kommt einer punktförmigen Lichtquelle sehr nahe. Dadurch ist es möglich, nahezu beliebig geformte Lichtverteilungen durch entsprechende Anordnung der LEDs und Verwendung eines optimierten optischen Systems zu realisieren. Neben homogenen Lichtverteilungen in den beleuchteten Zonen können auch andere, bedarfsgerechte Lichtverteilungen erzielt werden. Durch die scharfe Abgrenzung zwischen Hell- und Dunkelzonen können zudem Streuverluste und Lichtverschmutzung minimiert werden.

Die existierenden optischen Systeme für Hochleistungs-LEDs basieren auf einfachen Reflektoren oder Refraktoren, die das Licht mit ungenügender Güte lenken. Die optischen Verluste solcher Systeme sind oft erheblich. Eine an die Hochleistungs-LED angepasste, hocheffiziente Optik soll es daher künftig ermöglichen, das von der LED emittierte Licht optimal zu lenken. Dazu ist der Einsatz neuer Technologien (Multi-Point-Systeme, Multi-Layer-Systeme, Mikrooptiken usw.) und Konzepte erforderlich. Im Zuge dieses Projekts wurden diese eruiert und erforscht, um die Effizienz der LED-Beleuchtungssysteme zu optimieren. Es sollen aber auch die Grenzen der Lichtlenkung aufgezeigt werden. Die Forschungsergebnisse dieses Projekts können als Grundlage und Wissensbasis für die künftige Entwicklung und Realisierung von hocheffizienten Optiken für Beleuchtungssysteme mit Hochleistungs-LEDs dienen.

## Abstract

In the field of high-powered LEDs great progress has recently been made in making the realization of high-efficiency lighting systems for indoor and outdoor applications possible. Besides the lifetime, the light output is also being gradually improved. With a light yield of  $>100$  lm/W, LEDs are already in the range of gas discharge lamps, where only the sodium vapour lamp exhibits a higher light output. High-powered LEDs are also more compact than gas discharge lamps, which enables a better light design. Moreover, LEDs are better and faster, controllable and dimmable.

In addition to further improvements in the light output of LEDs, the development of innovative, high-efficiency optical systems for LEDs becomes more and more important. Thus, the aim of this research project is the design and development of high-efficiency optical systems for high-powered LEDs to achieve a maximum energy efficiency for these lighting systems by optimized light distribution.

These highly-efficient optical systems should enable a significant reduction in energy consumption, but also the realization of customer-specific light distribution and the minimization of light pollution. In most applications in the field of outdoor lighting a homogeneous light distribution is desired. These requirements may be insufficiently satisfied by conventional lighting systems. Therefore, optimizing the light distribution is an enormous contribution to energy efficiency, at least by a factor of 2 – compared to older lighting systems the increase in energy efficiency is significantly higher.

A high-powered LED is comparable to an ideal light point source. Hence, it is realistic to realize almost arbitrarily-shaped light distributions by appropriate arrangement of LEDs and using an optimal optical system. Besides very homogeneous light distribution in the desired illuminated zones, individual customized light distributions can be achieved. Due to the sharp demarcation between light and dark areas light pollution can also be minimized significantly.

The existing optical systems for high-powered LEDs are based on simple reflectors or refractors, which handle the light in a very insufficient way. The optical losses of such systems are often substantial. Therefore, highly-efficient optics adapted to high-powered LED should enable an optimized light-handling in the future. The use of new technologies (e.g. multi-point technology, multi-layer technology, micro-optics) and concepts is needed to realize such efficient optical systems.

In the course of this project, these technologies and concepts should be evaluated and investigated to optimize the light output and light distribution of new LED lighting systems. However, limits of light-handling should also be pointed out. The research results of this project should be used as a knowledge basis for future development and the implementation of highly-efficient optics for lighting systems with high-powered LEDs.

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Es wurde für Beleuchtungssysteme mit Hochleistungs-LEDs eine Optik entwickelt, mit der möglichst effizient das von der Lichtquelle erzeugte Licht zu Beleuchtungszwecken ausgenutzt wird. Die Optik soll in erster Linie zu Straßenbeleuchtungszwecken konzipiert werden. Die erzeugten Lichtverteilungen sollen eine bedarfsgerechte Form haben. Dadurch wurde eine Reduktion der Lichtverschmutzung und somit eine Erhöhung der Lebensqualität der Anrainer erreicht.

## 1.2 Schwerpunkte des Projektes

Das Projekt beinhaltet folgende Schwerpunkte:

Erfassung lichttechnischer Anforderungen an das optische System:

Das hier neu zu entwickelnde optische System ist hauptsächlich für Straßenbeleuchtungssysteme ausgelegt. Zur Bestimmung der bedarfsgerechten Form der Lichtverteilung wird es nötig sein, sich mit den an die Straßenbeleuchtung gestellten Anforderungen auseinanderzusetzen.

Erarbeitung neuer Ansätze zur Entwicklung der neuen Optik und deren technische Realisierbarkeit: Die Recherchearbeiten auf den hierfür relevanten Gebieten liefern Anregungen für neue Ansätze zur Entwicklung der neuen Optik. Eine Überprüfung der technischen Realisierbarkeit einzelner Ansätze soll diejenigen herausfiltern, bei denen eine erfolgreiche Umsetzung am wahrscheinlichsten ist.

Entwicklung der neuartigen, hocheffizienten Optik zur Optimierung der Lichtverteilung und Energieeffizienz von LED-Beleuchtungssystemen:

Nach einem der erarbeiteten Ansätze wurde ein optisches System für Beleuchtungssysteme mit Hochleistungs-LEDs entwickelt, welches das zu Beleuchtungszwecken zur Verfügung stehende Licht möglichst effizient und bedarfsgerecht umsetzt.

Überprüfung der theoretischen Annahmen durch Messungen an voll funktionsfähigem Muster:

Um die technische Realisierbarkeit des entwickelten optischen Systems abzuklären, soll ein voll funktionsfähiges Muster hergestellt werden. Anschließend sollen vor allem durch lichttechnische Messungen die photometrischen Eigenschaften des Systems bestimmt und mit den berechneten Werten verglichen werden.

## 1.3 Einordnung in das Programm

### 1.3.1 Energiestrategische Ziele

Die derzeit in Verwendung befindlichen optischen Systeme von LED-Leuchten verursachen aufgrund ihrer geringen optischen Effizienz und Streuverluste einen hohen Energieverlust. Bei der im Rahmen dieses Projekts neuentwickelten Optik wurden diese stark reduziert. Dadurch wird die Umsetzung des erzeugten Lichtes viel effizienter erfolgen, was zur Verringerung des Energieverbrauchs von Beleuchtungssystemen führte. Durch den geringeren Stromverbrauch kann ein enormes Potential bei der Einsparung des Treibhausgases CO<sub>2</sub> erreicht werden und die Abhängigkeit von Stromimporten nachhaltig verringert werden.

Außerdem führt eine effiziente Umsetzung des erzeugten Lichtes zu einer deutlichen Reduktion der Lichtverschmutzung, die durch heute eingesetzte Systeme im großen Ausmaß verursacht werden.

### **1.3.2 Systembezogene Ziele**

Derzeit stammen in Österreich rund 32% der Stromerzeugung aus kalorischen Kraftwerken, die mit jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 12 Millionen Tonnen etwa 1/5 der österreichischen CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen. Zudem wird auch noch Strom aus nuklearen Kraftwerken nach Österreich importiert, um den Inlandsverbrauch abdecken zu können. Die Verwendung neuer Optiken wird zu einer effizienteren Umwandlung der elektrischen Energie in Licht von LED-Beleuchtungssystemen führen, wodurch hohe Stromeinsparungspotentiale ausgenutzt werden können. Durch die Einsparung von elektrischer Energie kann der Anteil von fossilen und nuklearen Energieträgern verringert werden und der relative Anteil an erneuerbaren Energieträgern erhöht werden. Außerdem verringert sich die Abhängigkeit Österreichs vom Import von elektrischer Energie sowie Importen von fossilen Energieträgern (Gas und Erdöl) für die Stromgewinnung in Österreich.

Durch den geringeren Energieverbrauch von LED-Beleuchtungssystemen wird der Einsatz von autarken Photovoltaikleuchten durch geringere Mindestmodulflächen und -akkukapazitäten wirtschaftlicher und technisch leichter umsetzbar. Dadurch kann es zu einem vermehrten Einsatz autarker, intelligenter und dezentraler Solarleuchten kommen und somit der Anteil an erneuerbaren Energieträgern zur Stromerzeugung erhöht werden.

### **1.3.3 Technologiestrategische Ziele**

Das vorliegende Projekt stärkt die Forschungs- und Entwicklungskompetenz Österreichs im Bereich von LED-Beleuchtungssystemen und schafft die technologische Basis für die Umsetzung und Entwicklung hocheffizienter Optiken für Beleuchtungssysteme mit Hochleistungs-LEDs. Die im Rahmen des Projekts neuentwickelte Optik sorgt für die Steigerung der Effizienz von Beleuchtungssystemen mit Hochleistungs-LEDs, indem sie Nachteile der momentan verwendeten Systeme in stark verminderter Form bzw. gar nicht aufweist. Bei den derzeit verfügbaren Optiken wird noch in ungenügendem Maße auf die Ausführungsform und die Abstrahlcharakteristik der verschiedenen Hochleistungs-LED-Modelle eingegangen. Die Effizienz eines Beleuchtungssystems hängt auch nennenswert davon ab, inwieweit die Optik an das Leuchtmittel angepasst ist. Dieser Umstand wird zu vielfältigen Kooperationen zwischen Herstellern von Hochleistungs-LEDs und von optischen Systemen führen.

Das Projekt hat mittelfristig erhebliche gesellschaftliche und politische Bedeutung, da es künftig zu einer vermehrten Nutzung von LED-Beleuchtungssystemen kommen wird, was wiederum ein erhöhtes Bewusstsein für effiziente Energienutzung schafft. Dies wird einerseits zu einem geringeren Energieverbrauch, und andererseits zu einer verstärkten Nutzung von autarken Solarleuchten führen.

## Themenpriorität gem. Kap. 3 des Ausschreibungsleitfadens

Laut dem Leitfaden für die Projekteinreichung adressiert das Projektvorhaben die folgenden Themen(punkte):

Themenpunkt: Effizienzsteigerung von Produkten und Systemen

Thema: Produktentwicklungen und Systemverbesserungen zur Erzielung deutlicher Effizienzsteigerungen bei Endverbrauchsgeräten und deren Anwendung (Energie- und Rohstoffeffizienz).

Beleuchtungssysteme mit Hochleistungs-LEDs besitzen das Potential zu äußerst energiesparenden Beleuchtungslösungen. Allerdings erlauben derzeit existierende Optiken nur eine unzureichende Ausnutzung des erzeugten Lichts. Die Verluste können fallweise bis zu 30% betragen. Um dem entgegenzuwirken, bedarf es hocheffizienter Optiken, die das erzeugte Licht optimal umsetzen. Die Energie, die zum Ausgleich der optischen Verluste zusätzlich aufgebracht werden muss, wird durch den Einsatz optimal angepasster Optiken eingespart, wodurch die Energieeffizienz von Beleuchtungssystemen deutlich gesteigert werden wird.

### 1.4 Verwendete Methoden

Die Entwicklungsvorgaben für die neue Optik wurden aus den Rechercharbeiten auf den hierfür relevanten Gebieten erarbeitet. Aus der ebenso durch Rechercharbeiten erlangten Kenntnis über den neuesten Stand der Technik im Bereich der Hochleistungs-LEDs sowie der dazugehörigen optischen Systeme wurden neue Ansätze, deren Umsetzung am vielversprechendsten zu sein schien, erarbeitet. Einer dieser Ansätze war der Ausgangspunkt für die Entwicklung des neuen optischen Systems. Bei der Entwicklung des optischen Systems wurden neben den mathematischen Berechnungen auch Simulationen mit entsprechender Software durchgeführt. Die Überprüfung der Entwicklungsergebnisse erfolgte durch lichttechnische Messungen an voll funktionsfähigen Mustern der neu entwickelten Optik.

### 1.5 Aufbau der Arbeit

Da hier eine Optik für Beleuchtungssysteme mit Hochleistungs-LEDs zur Straßenbeleuchtung entwickelt werden sollte, wurden als erstes die genauen Anforderungen an solche Beleuchtungssysteme bestimmt. Aus diesen wurden die Vorgaben für die Entwicklung der neuen Optik erarbeitet. Auch die Form der Lichtverteilung, die mit der hier zu entwickelnden Optik erzeugt werden soll, wurde dabei bestimmt. Aus dem durch Rechercharbeiten erhaltenen Überblick über den neuesten Stand der Technik im Bereich der Hochleistungs-LEDs konnte eine Entscheidung bezüglich Leuchtmittel getroffen werden. Um das zur Verfügung stehende Licht möglichst effizient auszunutzen ist es wichtig eine Optik zu verwenden, die optimal an das Leuchtmittel angepasst ist. Weiters wurde eine genaue Darstellung der auf dem Markt bereits erhältlichen Optiken für Hochleistungs-LEDs erstellt. Dabei wurden vor allem optische Eigenschaften der einzelnen Produkte genauer untersucht. Das Ziel war es, Verlustmechanismen zu bestimmen und das Verbesserungspotential aufzuzeigen. Außerdem sollten hieraus neue Ansätze zur Entwicklung der neuen Optik erarbeitet werden. Eine Zusammenfassung der neuesten Errungenschaften im Bereich der Herstellung von optischen Systemen für Hochleistungs-LEDs sowie Verfahren zur Verbesserung optischer Eigenschaften solcher Systeme wurde erstellt. Eine Analyse dieser Verfahren lieferte die Angabe, inwieweit diese in die Entwicklung der neuen Optik hinein fließen können. Für die Entwicklung der neuen Optik wurde zuerst das Multi-Point-Prinzip gewählt. Mit der hier entwickelten

Optik konnten die Vorgaben an das Beleuchtungssystem erfüllt werden. Um die tatsächliche technische Realisierbarkeit der Optik nach dem hier erarbeiteten Prinzip abzuklären, sowie eine Überprüfung der Entwicklungsergebnisse zu ermöglichen, wurde ein voll funktionsfähiges Muster hergestellt. Die durch Messungen erhaltenen Ergebnisse stimmten mit den berechneten sehr gut überein. Bei der Herstellung des voll funktionsfähigen Musters haben sich jedoch die Nachteile des Multi-Point-Prinzips gezeigt, weshalb in weiterer Folge das Multi-Layer-Prinzip herangezogen wurde. Die bei der Entwicklung der Optik nach dem neuen Prinzip erhaltenen Ergebnisse wurden ebenfalls durch Messungen an einem voll funktionsfähigen Muster überprüft.

## 2 Inhaltliche Darstellung

Als Leuchtmittel werden in Straßenleuchten meist Quecksilberdampf Lampen (auf die jedoch in den letzten Jahren immer weniger zurückgegriffen wird), Leuchtstofflampen oder Natriumdampf-Hochdrucklampen verwendet. Die letzteren haben eine Effizienz von bis zu 150lm/W und eine mittlere Lebensdauer von 30.000 Stunden. Diese Eigenschaften machen die Natriumdampf-Hochdrucklampe sehr attraktiv vor allem für die Beleuchtung von hochrangigen Straßen, da hier keine hohen Anforderungen an die Farbwiedergabe gestellt werden. Im Bereich der Hochleistungs-LEDs wurden jedoch zuletzt große Fortschritte erzielt. Neben der Lebensdauer, die laut Hersteller bei 50.000 Stunden, also deutlich über der der anderen Leuchtmittel liegt, wurde auch die Lichtausbeute der LEDs verbessert. Diese liegt mit  $> 130 \text{ lm/W}$  bereits heute im Bereich von Gasentladungslampen, wobei vorerst nur noch die Natriumdampf-Hochdrucklampe eine höhere Lichtausbeute aufweist. Der Farbwiedergabeindex einer Hochleistungs-LED liegt mit 70-90 zudem deutlich über dem von Natriumdampf-Hochdrucklampen. Im Gegensatz zu konventionellen Leuchtmitteln, die alle eine ausgedehnte Lichtquelle darstellen, entspricht die Hochleistungs-LED einer fast punktförmigen Quelle. Diese Eigenschaft ermöglicht neben einer bedarfsgerechten Einstellung des Lichtstromes auch die Realisierung nahezu beliebiger Lichtverteilungen. Zudem sind LEDs besser und schneller steuer- und dimmbar. Für konventionelle Leuchtmittel existieren verschiedenste Refraktoren bzw. Reflektoren zur Erzeugung von Lichtverteilungen, die es erlauben, die an die Straßenbeleuchtung gestellten Anforderungen mehr oder weniger gut zu erfüllen. Für Hochleistungs-LEDs existierten zumindest bis zum Projektbeginn solche Optiken nicht. Aus diesem Grund sollen im Rahmen dieses Projektes entsprechende Optiken für Hochleistungs-LEDs entwickelt werden.

Um das Potenzial der Hochleistungs-LEDs zur Gänze ausnutzen zu können, müssen neue, speziell an die Hochleistungs-LEDs angepasste optische Systeme entwickelt werden. Dafür müssen jedoch neue Ansätze gewählt werden. Eines der wesentlichen Forschungsziele dieses Projektes war es daher, neuartige Lösungen zur Umsetzung solcher Systeme zu entwickeln, auf ihre technische Realisierbarkeit hin zu prüfen und deren Potenzial abzuschätzen. Ausgehend von einem dieser Ansätze soll das angestrebte optimierte optische System entworfen werden. Ein Vergleich mit den bereits existierenden Lösungen soll das tatsächliche Entwicklungspotential auf diesem Gebiet aufzeigen. Die Konstruktion funktionsfähiger Modelle soll einerseits die tatsächliche Realisierbarkeit solcher Systeme aufzeigen und andererseits zur Überprüfung der theoretischen Annahmen dienen. Mit den Forschungsergebnissen soll eine Grundlage für weitere Entwicklungen von hocheffizienten optischen Systemen geschaffen werden.

Zu Beleuchtungszwecken werden in Europa pro Jahr mehr als 2.000 Milliarden kWh Strom verbraucht und 2.900 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. Die Effizienz der verwendeten Beleuchtungssysteme ist allerdings alles andere als optimal. Der Anteil des zur Verfügung stehenden Lichtes, welcher tatsächlich für die Beleuchtungszwecke ausgenutzt wird, hängt unter anderem auch von der Qualität des verwendeten optischen Systems ab. Eines behaftet mit sehr geringen optischen Verlusten kann zur Effizienzsteigerung und somit zu einer Verringerung des Energiebedarfs des Beleuchtungssystems führen, welches wiederum eine Absenkung des CO<sub>2</sub>-Austoßes zur Folge hat. Aus diesem Grund sollte die hier neu zu entwickelnde Optik möglichst geringe optische Verluste aufweisen. Um solch eine Optik zu erhalten wurde nach neuen Methoden vor allem zur Oberflächenbehandlung gesucht, die zu einer Minimierung der Verluste, die an der Grenzschicht zweier Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes entstehen, führen. Weiters soll die Effizienz

der Optik durch Optimierung der eingesetzten Materialien gesteigert werden.  
Wie bereits erwähnt, kommt eine Hochleistungs-LED einer punktförmigen Lichtquelle sehr nahe. Dadurch ist es erstmals möglich, nahezu beliebig geformte Lichtverteilungen durch entsprechende Anordnung der LEDs und Verwendung eines optimierten optischen Systems zu realisieren. Eine bedarfsgerechte Lichtverteilung, erzeugt mit der hier neu entwickelten Optik, soll zur Reduktion der Lichtverschmutzung und somit einer Erhöhung der Lebensqualität führen.

## **3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

### **3.1 Vorgaben für die neue Optik**

Die Anforderungen an die Straßenbeleuchtung für die jeweilige Beleuchtungssituation sind in der Norm EN 13201 definiert. Nach dem diese eingehend studiert wurde, konnten die optimalen Lichtverteilungen für die verschiedenen Beleuchtungssituationen bestimmt werden. Die ermittelte Form der Lichtverteilung sowie weitere aus der Norm abgeleiteten Vorgaben bildeten die ersten Rahmenbedingungen für das hier zu entwickelnde optische System. Die Vorgaben stammen zum Teil aus den in der Norm definierten Beleuchtungsklassen, die den einzelnen Beleuchtungssituationen untergeordnet sind. In den Beleuchtungsklassen sind die absoluten Werte für die Gütemerkmale der Straßenbeleuchtung definiert. Für ausgewählte Beleuchtungssituationen ist die Leuchtdichte, für alle anderen die Beleuchtungsstärke die ausschlaggebende lichttechnische Größe. Die Lichtverteilung einer Leuchte, die die lichttechnischen Anforderungen nach der Leuchtdichte zu erfüllen hat, wird sich deutlich von der, die zur Erfüllung der Anforderungen nach der Beleuchtungsstärke eingesetzt wird, unterscheiden. Dies hat insofern Auswirkungen auf das optische System, als dass die zur Abdeckung aller in der EN 13201 definierten Beleuchtungssituationen mindestens zwei unterschiedliche Lichtverteilungen und somit zwei unterschiedliche Lichtpunkte mit unterschiedlich ausgeführter Optik benötigt werden. Weitere Auswirkungen auf die Ausführungsform des optischen Systems wird die Bauform der Leuchte haben. Die Größe der ausgeleuchteten Fläche wird von der Höhe des Lichtpunktes abhängen, weswegen diese bei der Konstruktion des optischen Systems berücksichtigt werden muss.

### **3.2 Hochleistungs-LEDs und zugehörige optische Systeme: momentane Stand der Technik**

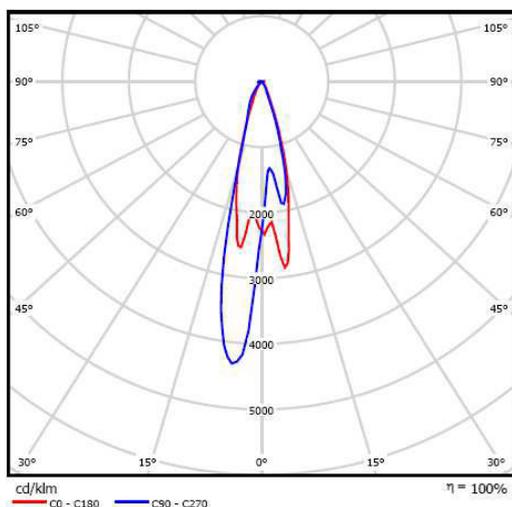
Die neuesten Errungenschaften sowie die in der näheren Zukunft zu erwartenden Entwicklungen sowohl im Bereich der Hochleistungs-LEDs als auch im Bereich der hierfür speziellen optischen Systeme wurden erfasst und bei der Findung neuer Lösungswege zur Realisierung von hocheffizienten LED-Optiken eingebunden.

Im Bereich der Hochleistungs-LEDs wird die Weiterentwicklung stetig vorangetrieben. Neben der Langlebigkeit wird vor allem an der Verbesserung der Lichtausbeute gearbeitet. Auch die Bauform der LEDs wird immer kompakter. CREE, einer der führenden Hersteller von Hochleistungs-LEDs, veröffentlichte Anfang 2010, dass man es geschafft hat, eine weiße single chip LED unter Laborbedingungen bei einem Betriebsstrom von 350 mA und einer Farbtemperatur von 4579 K mit einer Lichtausbeute von 208 lm/W erfolgreich zu betreiben. Dieser Wert liegt im Bereich des bisher am effizientesten konventionellen Leuchtmittels, der Natriumdampf-Niederdrucklampe. Es wird noch einige Zeit dauern bis die LED die Serienreife erreicht, dies ist jedoch der Hinweis, dass in näherer Zukunft LEDs mit annähernd gleicher wenn nicht sogar höher Lichtausbeute als die der konventionellen Leuchtmittel erhältlich sein werden.

Die Effizienz von Leuchten hängt maßgeblich vom verwendeten optischen System ab. Aus diesem Grund und aufgrund des vermehrten Einsatzes von Hochleistungs-LEDs zu verschiedenen Beleuchtungszwecken wird der Optik, die dabei zum Einsatz kommt, immer mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Eine Zusammenfassung der bereits auf dem Markt befindlichen optischen Systemen für Hochleistungs-LEDs hat ergeben, dass die von den verschiedenen Herstellern angebotenen Optiken

keineswegs optimal an die bereits auf den Markt befindlichen Hochleistungs-LEDs angepasst sind. Ihre Ausführungsform ist von einer universellen Art, die es erlaubt, die gleiche Optik bei verschiedenen Hochleistungs-LEDs anzuwenden. Dies hat jedoch zur Folge, dass sich aufgrund der unterschiedlichen Bauformen der einzelnen LEDs unterschiedliche Öffnungswinkel und somit unterschiedliche Lichtverteilungen ergeben.

Das Zusammenspiel der LED mit der verwendeten Linse spielt bei der Entwicklung und schlussendlich der Effizienz von Lichtpunkten eine tragende Rolle. Wie sich die Verwendung einer universellen, nicht optimal an eine Hochleistungs-LED angepassten Linse auf die Lichtverteilung der Einheit auswirken kann, ist in Abb. 1 dargestellt. In dieser Abbildung ist die in unserem Auftrag vermessene Lichtverteilung einer LED-Linse-Einheit, die aus der Luxen Rebel LED und einer auf dem Markt erhältlichen Kollimatorlinse (allerdings für diese LED konzipiert) besteht, dargestellt. Der Linsenhersteller gibt den Öffnungswinkel der Lichtverteilung für diese LED-Linse-Kombination mit 25° an.



**Abb. 1: Lichtverteilung einer LED-Linse-Einheit bestehend aus einer Luxeon Rebel Hochleistungs-LED und einer Linse für universellen Einsatz**

Aufgrund der asymmetrischen Lichtverteilung der LED-Linse-Einheit hängt die Lichtverteilung des gesamten Lichtpunktes zusätzlich noch von der Position der Einheit bezüglich ihrer optischen Achse ab. Dies ist ein weiterer Parameter, der bei der Entwicklung des Lichtpunktes berücksichtigt werden muss. Dieser kann jedoch durch die Verwendung optimal an die LED angepasster Optik, die zu einer rotationssymmetrischen Lichtverteilung führt, eliminiert werden.

Es existieren bereits Hersteller von Optiken für Hochleistungs-LEDs, die sich auf die einzelnen LED-Typen spezialisiert haben. Die vom Hersteller angegebene Effizienz solcher Optiken übertrifft deutlich die einer universell einsetzbaren Optik. Osram, als einer der Hersteller von Hochleistungs-LEDs, versieht eines seiner Produkte mit einer direkt an den LED-Chip angebrachten Linse<sup>1</sup>. Der Vorteil solch eines Systems liegt darin, dass hier eine der Grenzflächen, die bei der Verwendung von Standardoptiken vorhanden ist, wegfällt und sich die Verluste somit verringern. Nachteilig ist jedoch, dass für die Planung der Lichtverteilung des gesamten Lichtpunktes ausschließlich die durch die

<sup>1</sup> [http://www.osram-os.com/osram\\_os/EN/Products/Light\\_Emitting\\_Diodes\\_%28LED%29/index.html](http://www.osram-os.com/osram_os/EN/Products/Light_Emitting_Diodes_%28LED%29/index.html) (25.08.2010)

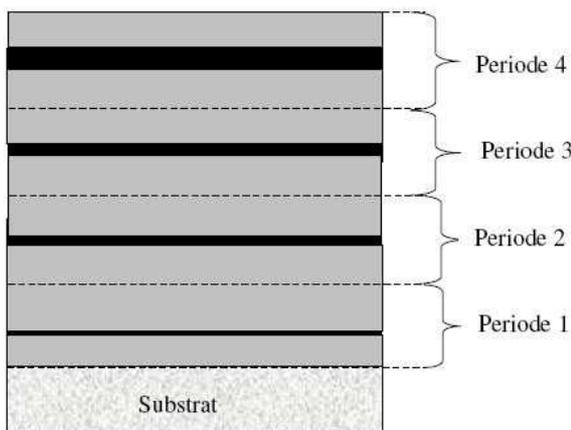
angebrachte Linse generierte Lichtverteilung zur Verfügung steht.

### 3.3 Minimierung optischer Verluste und des Oberflächenverschleißes

Den größten Teil der optischen Verluste machen jene aus, die an der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes entstehen. Um eine möglichst effiziente Optik zu erhalten müssen diese Verluste minimiert werden. Da die hier neu zu entwickelnde Optik diese Eigenschaft besitzen soll, wurde nach Verfahren gesucht, die eine Minimierung dieser Verluste ermöglichen. Die neue Optik wird hauptsächlich bei den Produkten für den Außeneinsatz Verwendung finden. Um die Anfangsperformance der Linse möglichst lange aufrecht zu erhalten, wird es nötig sein, diese vor den Witterungsverhältnissen zu schützen.

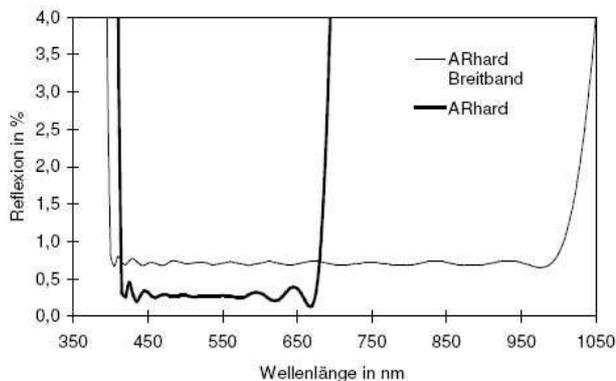
Eine sehr vielversprechende Möglichkeit, die Effizienz optischer Systeme zu steigern, ist der Einsatz von Antireflexbeschichtungen. Diese Möglichkeit wurde ausführlich untersucht:

Der Transmissionsgrad der am häufigsten für die Herstellung von Optiken für Hochleistungs-LEDs verwendeten Materialien, nämlich PC und PMMA, beträgt 86% bzw. 92%. Die optischen Verluste entstehen an der Grenzfläche zweier Medien unterschiedlicher Brechungsindizes. Diese lassen sich durch Entspiegelung der Oberfläche deutlich minimieren. Eine der neueren Arten der Entspiegelung ist das AR-Hard<sup>®</sup> Design (siehe Abb. 2).



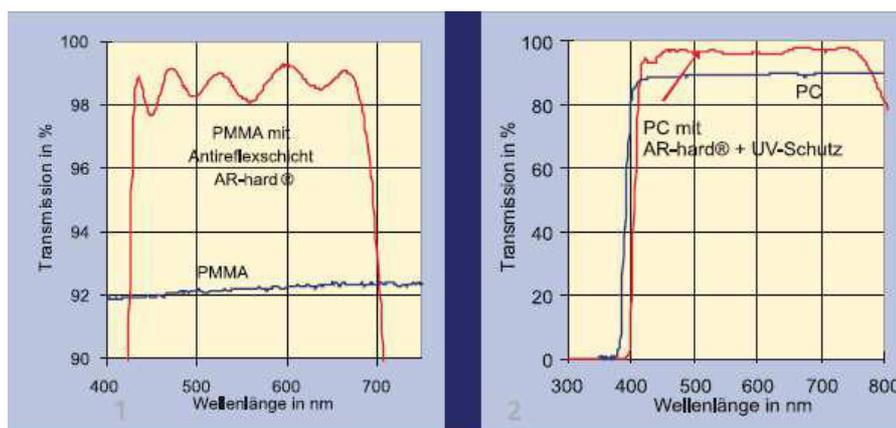
**Abb. 2: Antireflexsystem AR-Hard**

Diese Antireflexsysteme sind nach dem Step-Down-Prinzip aufgebaut. Sie können als Aufeinanderfolge von symmetrischen Schichtfolgen aus je drei Schichten beschrieben werden. In der Periode ist eine dünne hochbrechende ( $d \ll \lambda/4$ ) Schicht von zwei wesentlich dickeren, niedrigbrechenden ( $d < \lambda/2$ ) Schichten umgeben. Die Einzelschichten in der Periode müssen so gewählt werden, dass eine mathematische Äquivalenz zu einer Einzelschicht niedriger Brechzahl entsteht. Die Perioden werden so übereinander gestapelt, dass die Brechzahl des Systems von der Substratseite her abnimmt und außen fast die Brechzahl der Luft hat. Dieser stufenweise Abfall (Step-Down) der Brechzahl bewirkt die Entspiegelung. Eine Voraussetzung für das Erreichen niedriger äquivalenter Brechzahlen ist, dass die optische Dicke der Periode mindestens das Dreifache der optischen  $\lambda/4$ -Dicke bei der Schwerpunktwellenlänge der Entspiegelung beträgt. Das Design AR-Hard<sup>®</sup> besteht mindestens aus 5 Schichten (zwei Perioden). Die Anzahl der Schichten kann je nach gewünschter Dicke des Gesamtsystems ungeradzahlig erhöht werden. Die Bandbreite der Entspiegelung lässt sich bei diesem Design durch die Variation der Periodendicke gezielt verändert (siehe Abb. 3).



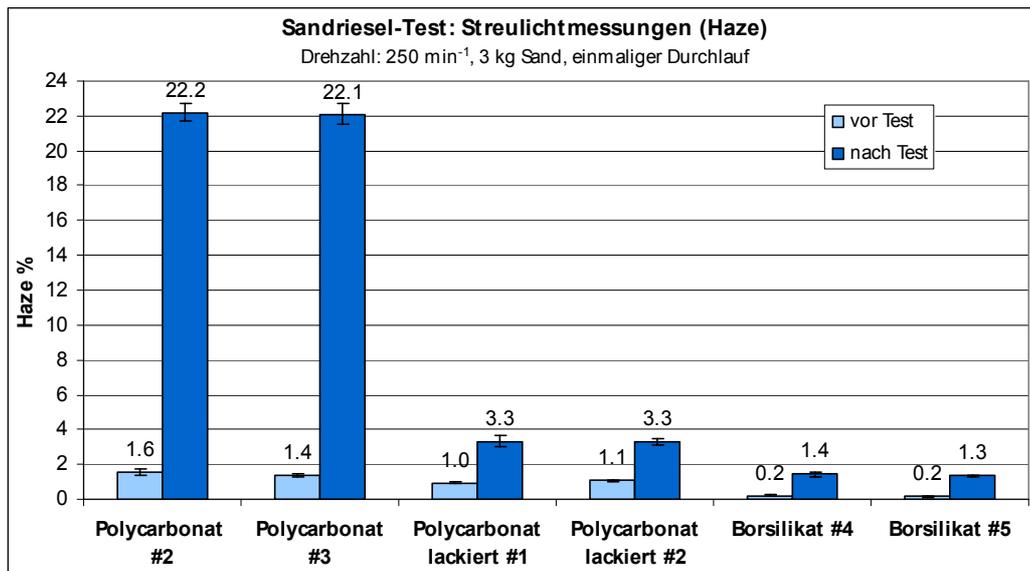
**Abb. 3: Entspiegelungswirkung unterschiedlicher AR-Hard® Designs**

Die Restreflexion solch eines Antireflexsystems ist farbneutral. Bei den Kunststoffen wird oft neben der Reflexionsminderung auch ein Schutz der Oberfläche vorm Verkratzen gefordert. Für einen effektiven Kratzschutz sind Schichtdicken von mehreren Mikrometern erforderlich. Das Design AR-Hard® eignet sich hervorragend für die Herstellung solcher kratzester Schichten. Diese können je nach der Anwendung eine Dicke von 800 nm bis 4000 nm haben.



**Abb. 4: Transmissionsgrad von PMMA (links) und PC (rechts) mit und ohne AR-Hard**

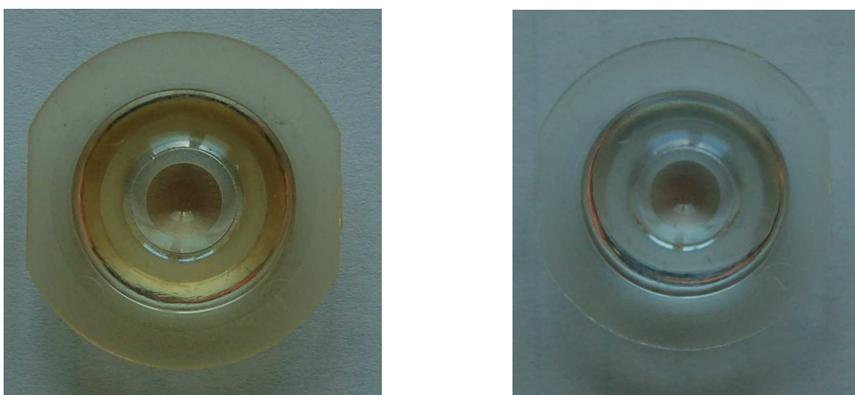
Mit der Antireflexschicht AR-Hard® ist es möglich, den Transmissionsgrad von PC und PMMA deutlich zu erhöhen (siehe Abb. 4). Im Gegensatz zu PMMA ist PC nur bedingt UV-beständig. Die UV-Strahlung bewirkt bei PC eine Degradation der Oberfläche, welche dazu führt, dass sich die aufgetragene Antireflexschicht mit der Zeit ablöst. Aus diesem Grund muss die Oberfläche mit einem UV-Schutz versehen werden, bevor die Antireflexschicht aufgetragen wird. In aller Regel wird der UV-Schutz durch einen speziellen Lack, der auf die PC-Oberfläche aufgetragen wird, realisiert. Zusätzlich wird durch diesen Lack die Kratzfestigkeit der Oberfläche erhöht.



**Abb. 5: Ergebnisse des Sandriesel-Tests**

In welchem Ausmaß die Kratzfestigkeit einer PC-Oberfläche durch diesen speziellen Lack erhöht werden kann, wurde mit dem an die Norm DIN 52347 angelehnten Sandriesel-Test untersucht. Für die Untersuchung wurden Proben aus Polycarbonat – dem gleichen Material, aus dem die von uns verwendeten Linsen produziert werden – hergestellt. Die Proben hatten die gleiche Oberflächengüte wie die Linsen. Einige Proben wurden mit dem UV-Schutzlack beschichtet, einige blieben unbehandelt. Die Messungen an Proben aus Borosilikatglas dienen als Referenz. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kratzfestigkeit der mit dem UV-Schutzlack überzogenen PC-Oberfläche deutlich höher ist als die einer unbehandelten PC-Oberfläche (siehe Abb. 5). Die Kratzfestigkeit der mit dem UV-Schutzlack überzogenen Oberfläche ist sogar nur minimal schlechter als die des Borosilikatglases.

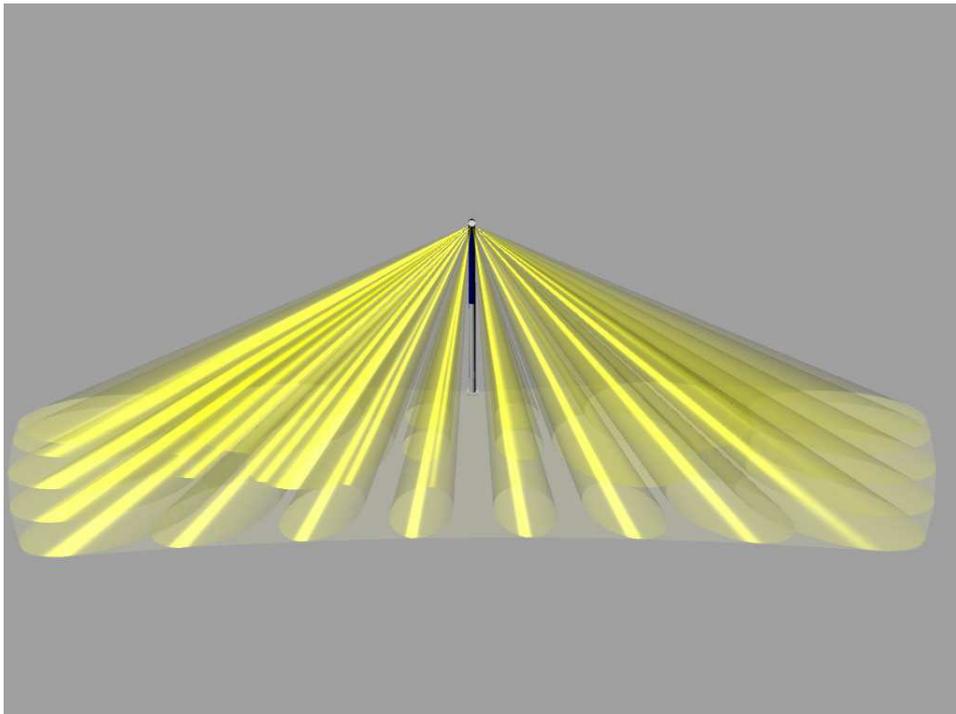
Weiters wurden eine lackierte und eine nichtlackierte Linse aus Polycarbonat dem UV-Test nach IEC 61215 unterzogen. Die durch die UV-Strahlung verursachte Degradation der Oberfläche führte zu einer Vergilbung der PC-Oberfläche. Bei der nichtlackierten Probe ist diese Vergilbung deutlich zu erkennen (siehe Abb. 6 links). Die mit dem UV-Schutzlack lackierte Probe weist hingegen keine Anzeichen einer Degradation auf (siehe Abb. 6 rechts).



**Abb. 6: links: nicht lackierte Linse nach dem UV-Test; rechts: lackierte Linse nach dem UV-Test**

Die lichttechnischen Vermessungen von LED-Linse-Kombinationen mit lackierten und unlackierten Linsen haben gezeigt, dass der Lack keine optischen Verluste verursacht. Die durch den Lack erhöhte Kratzfestigkeit sowie der UV-Schutz führen vor allem im Außeneinsatz zu geringerem Verschleiß und somit zu einer wesentlich langsameren Alterung der optischen Eigenschaften der Linse. Dadurch wird es möglich, die Wartungsintervalle zu vergrößern und somit Kosten zu sparen.

### 3.4 Multi-Point-Prinzip



**Abb. 7: Multi-Point-Prinzip**

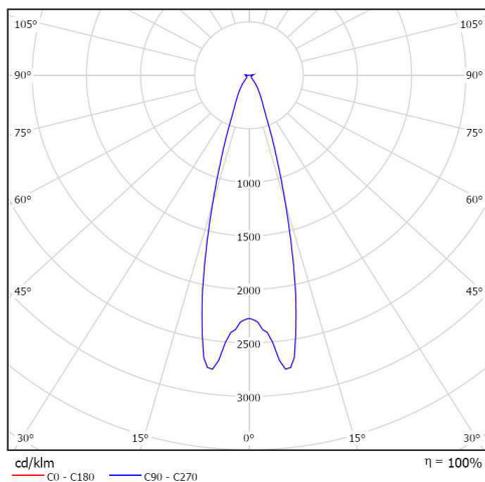
Der erste Ansatz zur Entwicklung der neuen Optik basiert auf den bereits erwähnten Kollimatorlinsen. Bei dem Multi-Point-Prinzip werden zur Realisierung des Lichtpunktes Einheiten verwendet, die aus einer (oder mehreren) LED(s) und einer davor gesetzten Kollimatorlinse bestehen. Diese Einheiten erzeugen z.B. rotationssymmetrische Lichtverteilungen mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln. Die entsprechende Positionierung (mit unterschiedlichen Anstellwinkel) im Lichtpunkt führt dann durch Überlagerung der Einzellichtverteilungen zur gewünschten Gesamtlichtverteilung (siehe Abb. 7).

In der EN 13201-2 sind in den ME-Beleuchtungsklassen die absoluten Werte für die Gütemerkmale der Straßenbeleuchtung definiert, die zur Anwendung auf Verkehrswegen mit mittleren bis höheren Fahrgeschwindigkeiten vorgesehen sind. Die Gütemerkmale sind die mittlere Fahrbahnleuchtdichte, die Gesamtgleichmäßigkeit der Leuchtdichte, die Längsgleichmäßigkeit der Leuchtdichte, die Schwellenwerterhöhung und das Umgebungsverhältnis der Beleuchtungsstärke, welches jedoch nur bei bestimmten Straßenkonfigurationen zu bestimmen ist. Diese sind nach EN 13201-3 und EN 13201-4 zu berechnen und zu messen. Bei der Berechnung der Gütemerkmale werden unter anderem auch die Breite der Straße, Anzahl der Fahrstreifen, der Abstand zwischen den Leuchten sowie die Lage des Lichtpunktes im Bezug auf die Fahrbahn einbezogen. Um einen Lichtpunkt für die ME-Beleuchtungsklassen zu entwickeln, müssen die genannten Faktoren genau bekannt sein. Bei Verwendung von LED-Linse-Einheiten, die eine rotationssymmetrische Lichtverteilung erzeugen,

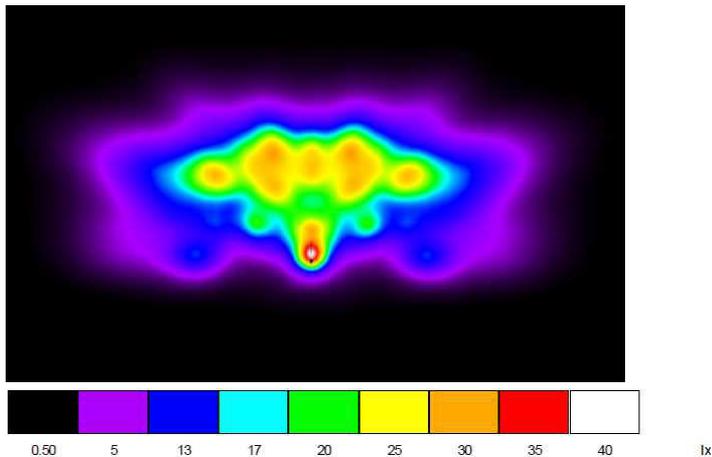
wird die gewünschte Lichtverteilung durch entsprechende Anordnung der Einheiten im Lichtpunkt erzeugt.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde ein solcher Multi-Point-LED-Lichtpunkt mit 72 Hochleistungs-LEDs zuerst simulationstechnisch umgesetzt. Dieser Lichtpunkt wurde für die Ausleuchtung von zweispurigen Straßen bestimmter Breite ausgelegt. Die Lichtpunkthöhe sowie der Abstand zwischen den einzelnen Leuchten waren vorgegeben. Weiters wurde die Anzahl der LED-Linse-Einheiten auf 72 begrenzt. Als Leuchtmittel wurde die Hochleistungs-LED Rebel der Fa. Lumileds gewählt. Um die in der Beleuchtungskategorie ME4b definierten Werte zu erfüllen, wurden zwei unterschiedliche am Markt befindliche Kollimatorlinsen verwendet, die kombiniert mit der LED jeweils einen Lichtkegel mit einem Öffnungswinkel von  $12^\circ$  bzw.  $25^\circ$  erzeugen. Für die Simulation des Lichtpunktes wurden die Lichtverteilungen der LED-Linse-Kombinationen gemessen. Die Lichtverteilungskurve der Kombination mit der  $25^\circ$  ist in Abb. 1 dargestellt.

Um die Asymmetrie der Lichtverteilung zu eliminieren, wurde die in Abb. 8 dargestellte Lichtverteilung generiert, die für die Entwicklung des Lichtpunktes verwendet wurde. Das gleiche wurde auch mit der Lichtverteilung der Kombination mit der  $12^\circ$  Linse gemacht. Das Entwicklungsergebnis ist in Abb. 9 zu sehen. Diese stellt die auf der Fahrbahn erzeugte Lichtverteilung dar.

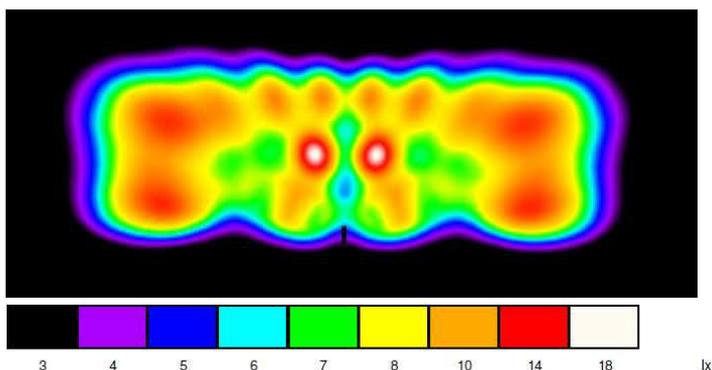


**Abb. 8: auf Rotationssymmetrie korrigierte Lichtverteilung der  $25^\circ$  LED-Linse-Einheit**



**Abb. 9: Simulation der Lichtverteilung eines Lichtpunktes mit 72 Hochleistungs-LEDs**

Im Vergleich zu obiger Lichtverteilung ist in Abb. 10 die Simulation der auf der Fahrbahn erzeugten Lichtverteilung einer mit 36-LED-Linse-Einheiten bestückten Leuchte zu sehen.



**Abb. 10: Simulation der Lichtverteilung einer mit 36 LED-Linsen-Einheiten bestückten Leuchte**

Dieser Lichtpunkt wurde zur Erfüllung der in der Beleuchtungskategorie CE4 definierten Werte für die mittlere Beleuchtungsstärke und die Gesamtgleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke, konzipiert. Der Unterschied zu der Lichtverteilung des mit 72 LEDs ausgestatteten Lichtpunktes ist deutlich erkennbar.

Der Aufwand für Entwicklung und Herstellung derartiger Kollimatorlinsen ist überschaubar, was sicher ein Vorteil dieses Prinzips ist.



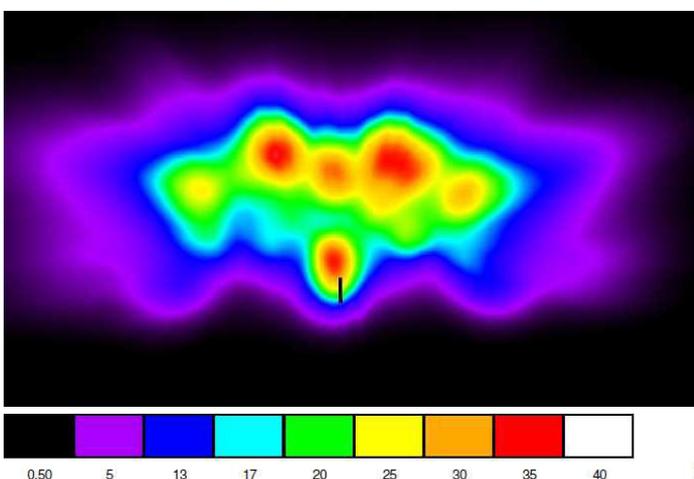
**Abb. 11: LED-Linse-Einheit eines Multi-Point-LED-Lichtpunktes**

Um die Simulationsergebnisse zum Multi-Point-LED-Lichtpunkt mit 72 LEDs zu überprüfen, wurde ein voll funktionsfähiges Muster des Lichtpunktes hergestellt. In Abb. 12 sind die unterschiedlichen Orientierungen der in Abb. 11 dargestellten LED-Linse-Einheiten deutlich zu erkennen.



**Abb. 12: Multi-Point-LED-Lichtpunkt mit 72 LED-Linse-Einheiten**

Das Ergebnis der Lichtverteilungsmessung ist in Abb. 13 zu sehen.

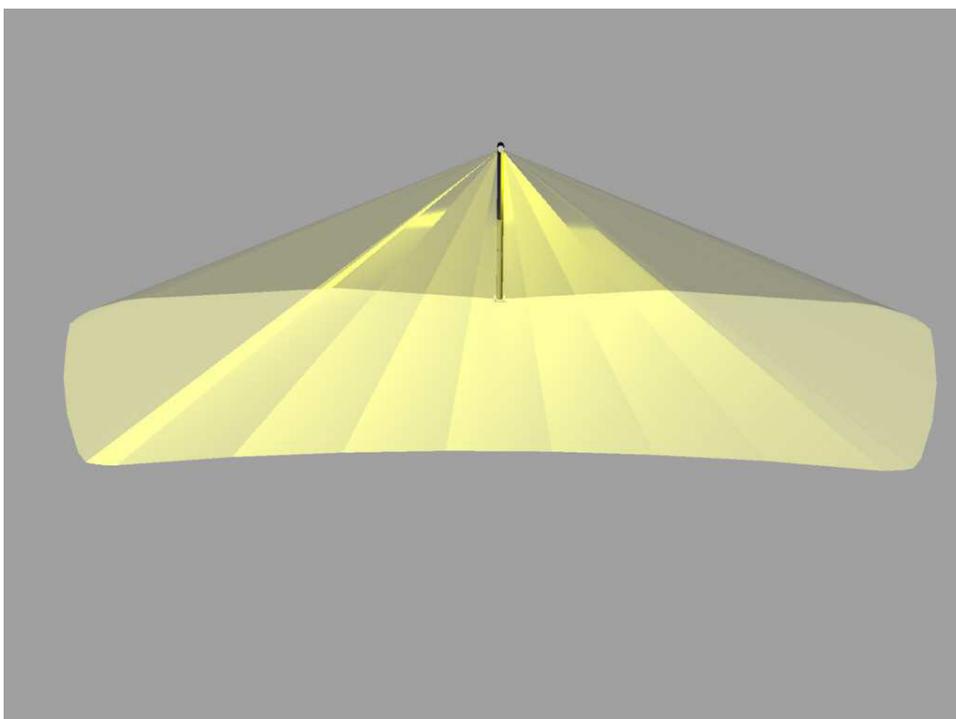


**Abb. 13: Gemessene Lichtverteilung des Lichtpunkts mit 72 Hochleistungs-LEDs**

Der Unterschied zwischen den beiden Lichtverteilungen Abb. 9 und Abb. 13 ist gering und erklärt sich in erster Linie durch die Asymmetrie in der Lichtverteilung der einzelnen LED-Linse-Kombinationen. Die Asymmetrie bei der Kombination mit 12° Linsen ist wesentlich schwächer ausgefallen als die bei der mit 25° Linsen. Der Großteil im Lichtpunkt verwendeten Einheit beinhaltet die 12° Linse, weswegen die Abweichungen zwischen den beiden Ergebnissen weniger stark ausfielen. Hier können die Auswirkungen einer an das Leuchtmittel nicht optimal angepassten Optik gut beobachtet werden. Nichtsdestotrotz konnten mit dieser Lichtverteilung die hier betrachtete Beleuchtungssituation in der Norm EN 13201 definierten Anforderungen an die Beleuchtung erfüllt werden. Dieses Ergebnis haben die in einer für Lichtplanung konzipierten Software durchgeführten Simulationen geliefert. Um die optischen Verluste jedoch so gering wie möglich zu halten, wurde mit der Entwicklung von Linsen begonnen, die an das Leuchtmittel optimal angepasst sind.

Die konstruktive Umsetzung des Lichtpunktes hat sich dabei um einiges schwieriger gestaltet als die Linsenentwicklung selbst. Die Einbettung der einzelnen LED-Linse-Einheiten in den Grundkörper musste in einer Art erfolgen, die es diesen erlauben sollte, die für die Erzeugung der gewünschten Lichtverteilung benötigte Ausrichtung einzunehmen. Da die LED-Linse-Einheiten für die Erzeugung jeder weiteren Lichtverteilung, auch wenn nur die absoluten Werte für die mittlere Beleuchtungsstärke bzw. Leuchtdichte geändert werden sollen, neu ausgerichtet werden müssen, wird es nicht möglich sein, den gleichen Grundkörper zu verwenden. D.h., dass für jede neue Lichtverteilung ein neuer Lichtpunkt konstruiert werden muss. Dies ist ein grundsätzlicher Nachteil des Multi-Point-Prinzips und war der Beweggrund für die Entwicklung der neuen Optik nach einem weiteren Ansatz.

### 3.5 Multi-Layer-Prinzip



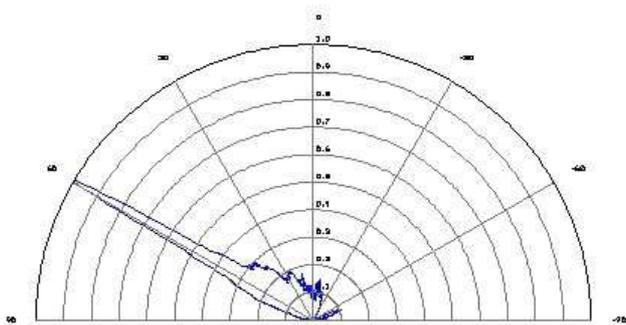
**Abb. 14: Multi-Layer-Prinzip**

Zur Realisierung eines Lichtpunktes nach dem Multi-Layer-Prinzip werden Einheiten verwendet, die

alleinstehend bereits die gewünschte Lichtverteilung erzeugen (siehe Abb. 14). Die absoluten Werte für die Beleuchtungsstärke bzw. Leuchtdichte werden durch Skalierung (Erhöhung der Anzahl der LED-Linsen-Einheiten im Lichtpunkt) erreicht. Ein Vorteil dieser Technik ist, dass hier einheitliche Linsen mit einheitlichen Ausrichtungen verwendet werden können. Der modulare Aufbau eines solchen Multi-Layer-LED-Lichtpunktes ermöglicht es, den Lichtstrom bedarfsgerecht einzustellen, wodurch eine effizientere Nutzung der Licht- und somit der elektrischen Energie möglich wird. Die hier angeführten Vorteile ließen diesen Ansatz als den vielversprechendsten für die Entwicklung des optischen Systems für Hochleistungs-LEDs erscheinen.

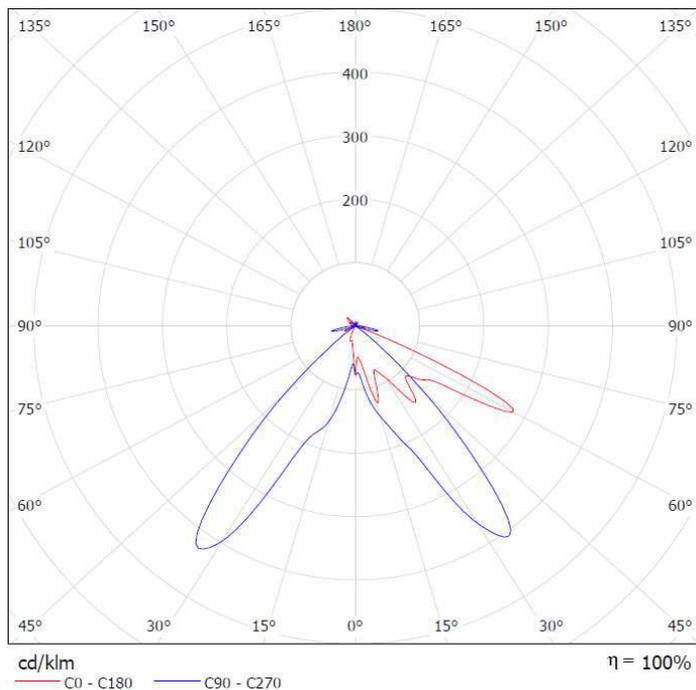
Als Leuchtmittel für diese Entwicklungstätigkeit wurde ebenfalls die Hochleistungs-LED Rebel der Fa. Lumileds gewählt. Die Linsenentwicklung erfolgte unter Zuhilfenahme eines eigens für diese Zwecke entwickelten Software-Programms. Mit diesem Programm ist es u.a. möglich, Strahlengänge durch beliebig angeordnete optische Komponenten zu simulieren, wobei von der verwendeten Lichtquelle die tatsächlich gemessenen photometrischen Daten importiert werden können.

Die ersten Schritte bei der Entwicklung der Linse betrafen die Lichtverteilung der LED-Linse-Einheit in der C90-C270 Ebene. In Abb. 15 ist die Lichtverteilung eines der ersten Entwürfe der Linse, der Linse des Typs 01, dargestellt.



**Abb. 15: Lichtverteilungskurve in der C90-C270 Ebene der Linse des Typs 01**

Die Lichtverteilung der weiterentwickelten Linse des Typs 02, ist in Abb. 16 dargestellt.



**Abb. 16: Lichtverteilungskurve der Linse des Typs 02**

Die an das hier neu zu entwickelnde optische System für Beleuchtungssysteme mit Hochleistungs-LEDs gestellten Zielvorgaben konnten bereits mit der Linse der nächsten Entwicklungsstufe (Typ 03) sehr gut erfüllt werden. Mit dieser Linse ist es möglich, Lichtverteilungen zu erzeugen, die die in der Norm EN 13201 definierten Anforderungen der CE-Beleuchtungsklassen erfüllen. Bei diesen Beleuchtungsklassen darf die Gesamtgleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke den Wert 0,4 nicht unterschreiten. Den Hauptunterschied zwischen den einzelnen CE-Beleuchtungsklassen machen die Werte für die mittlere Beleuchtungsstärke aus. Bei der Erfüllung dieser Werte kommen die Vorteile des Multi-Layer-Prinzips zur Gänze zum Tragen. Die Anzahl der LED-Linse-Einheiten im Lichtpunkt richtet sich einfach nach den geforderten Absolutwerten der Beleuchtungsstärke. Eine Herabsetzung oder Erhöhung der Anzahl von Einheiten hat dabei nur geringe Auswirkungen auf die Konstruktion des Lichtpunktes selbst. Weiters erlaubt dieses Prinzip bedarfsgerechte Einstellungen des Lichtstromes. Diesen Vorteilen steht die hohe Komplexität der Linse, die für die Erzeugung der gewünschten Lichtverteilung nötig ist, gegenüber. Der hier aufgebrachte Entwicklungsaufwand war dementsprechend hoch. Aufgrund der hohen Komplexität der Linse wurde es auch als wichtig erachtet die berechneten Ergebnisse durch Messungen an entsprechendem Muster der Linse zu überprüfen. Ein Muster der Linse des Typs 02 wurde angefertigt und die bei den verschiedenen Messungen erhaltenen Ergebnisse mit den berechneten verglichen. Die Ergebnisse stimmten gut überein. Der Anteil des von der Hochleistungs-LED erzeugten Lichtes, welcher auf eine senkrecht zur optischen Achse der LED liegenden Bildebene von der Linse projiziert wird, beträgt 80 %. Bei der berechneten Linse beträgt dieser 83%. Die Lichtverteilungen der beiden Linsen weichen nur leicht von einander ab. Die Ursachen dafür konnten ermittelt werden und lassen sich mit einem etwas höheren Aufwand, vor allem bei der Herstellung des Linsenwerkzeugs, beseitigen.

## 4 Ausblick und Empfehlungen

Im Rahmen dieses Projekts wurden die Vor- und Nachteile zweier LED-Lichtpunkt-konzepte – Multi-Point- und Multi-Layer-Konzept – genau untersucht. Aus den Ergebnissen folgt die Empfehlung für die Konzipierung weiterer Lichtpunkte nach dem Multi-Layer-Prinzip, da die Vorteile dieses Prinzips deutlich überwiegen. Die hier entwickelte hocheffiziente Optik nach dem Multi-Layer-Prinzip ermöglicht Lichtverteilungen, die eine Erfüllung der in den CE-Beleuchtungsklassen definierten Anforderungen an die Straßenbeleuchtung ermöglichen. In weiterer Folge soll eine Optik entwickelt werden, die die Erfüllung der ME-Beleuchtungsklassen erlaubt und eine ähnlich hohe Effizienz von 80% und darüber aufweist, um damit einen großen Teil der in der Norm EN 13201 definierten Anforderungen abzudecken. Hierbei soll ebenfalls das Multi-Layer-Prinzip angewendet werden.

Bei der Linsenentwicklung wurde als Lichtquelle eine einzelne Hochleistungs-LED definiert. Zwei oder mehrere LEDs in einem Verbund als Lichtquelle würden einige Vorteile, wie z.B. Redundanz bei Ausfall einer LED und eine massive Reduktion der eingesetzten Materialien versprechen. Aus diesem Grund ist geplant, Optiken für LED-Gruppen zu entwickeln.

## 5 Literaturverzeichnis

- A. Kalles, „Oberflächenmodifikation von Polymethylmethacrylat durch Plasmabehandlung“, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2006
- U. Schulz, P. Munzert, N.Kaiser, „Vakuumbeschichtung von Kunststoffen für optische Anwendungen“, Galvanotechnik, Eugen G. Leuze Verlag, 2004
- „Komplexe mikro-optische Module“, [www.iof.fraunhofer.de/departments/micro-optics/modules](http://www.iof.fraunhofer.de/departments/micro-optics/modules), Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, 2008
- „Mikrooptik zur LED-Strahlformung“, [www.iof.fraunhofer.de/departments/micro-optics/modules](http://www.iof.fraunhofer.de/departments/micro-optics/modules), Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, 2008
- „Beleuchtung“, Technology First, Ausgabe 3, Premier Farnell, 2009

## IMPRESSUM

### **Verfasser**

HEI Eco Technology GmbH

Dieter Hornbachner  
Ameisgasse 65, 1140 Wien  
Tel.: +43/1/91 21 351-0  
Fax: +43/1/91 21 351-22  
Web: [www.hei.at](http://www.hei.at)

### **Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber**

Klima- und Energiefonds  
Gumpendorfer Straße 5/22  
1060 Wien  
[office@klimafonds.gv.at](mailto:office@klimafonds.gv.at)  
[www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at)

### **Disclaimer**

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

### **Gestaltung des Deckblattes**

ZS communication + art GmbH