



Kommunen in neuem Licht

Praxiserfahrungen zur LED
in der kommunalen Beleuchtung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Impressum

Kommunen in neuem Licht

Praxiserfahrungen zur LED in der kommunalen Beleuchtung

Herausgegeben durch:

Wjatscheslaw Pepler, Christoph Schiller und Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt

Fachgebiet für Lichttechnik

Hochschulstrasse 4a

64289 Darmstadt

office@lichttechnik.tu-darmstadt.de

gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
im Rahmen des Projektes »EvalKomm« (Förderkennzeichen 13N11100)

verantwortlicher Projektträger im Auftrag des BMBF:

VDI Technologiezentrum GmbH

VDI-Platz 1

40468 Düsseldorf

Titelfoto:

LED-Beleuchtung in St. Georgen © Hess AG

Gestaltung und Umsetzung:

Bartkowiak GmbH & Co. KG, Tönisvorst

Druck:

Siebel Druck und Grafik, Lindlar

Düsseldorf, Mai 2013

Kommunen in neuem Licht

Praxiserfahrungen zur LED
in der kommunalen Beleuchtung



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Resümee

Mit dem Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht« unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die rasche Markteinführung der neuen LED-Technologie in der kommunalen Anwendung. Der flächen-deckenden Einführung dieser neuen Technik kommt in den kommenden Jahren ein immenses Potential für einen effizienten Umgang mit Energie und bei der Gestaltung der Energiewende zu.

Zur Vorbereitung dieses Technologiewandels in der kommunalen Beleuchtung hat das BMBF in den letzten Jahren die Realisierung von zehn beispielhaften Demonstrationsprojekten zur Anwendung der LED im öffentlichen Raum gefördert. Durch eine übergreifende und unabhängige, wissenschaftliche Evaluation ist im Ergebnis aller Projekte erstmals eine umfassende empirische Daten- und Erfahrungsbasis entstanden, die die Vorteile und die Bedeutung der LED anhand praktischer Beispiele belegt.

Die vorliegenden Ergebnisse der Projekte des Wettbewerbes »Kommunen in neuem Licht« zeigen:

- Durch den Umstieg auf moderne LEDs lässt sich in allen kommunalen Anwendungsbereichen eine **Energieeinsparung von mindestens 50 %** realisieren.
- Die Umrüstung der Beleuchtungsanlagen auf LED erfordert **keine zusätzlichen Investitionen in die Infrastruktur**. Bei der Umstellung auf die neue Technologie kann kosteneffizient und modular auf die vorhandene Bausubstanz aufgesetzt werden.
- Mit der LED wird die **Qualität der Beleuchtung signifikant verbessert**. Unabhängig vom Altzustand lässt sich in allen Anwendungssituationen eine normgerechte Beleuchtung realisieren.
- Sämtliche Wettbewerbsprojekte belegen eine **hohe Nutzerakzeptanz in der Bevölkerung** für die neue LED-Technologie. Im Vergleich mit der konventionellen Technik wird die LED durchgehend als bevorzugte Lösung insbesondere in Hinblick auf Farbtreue, Helligkeits- und Sicherheitsempfinden bewertet.

In der Wahrnehmung kommunaler Entscheider hat sich – auch durch die Erfahrungen aus den zehn Wettbewerbsprojekten – die LED inzwischen als ökologisch sinnvolle und ökonomisch vorteilhafte Alternative etabliert. Der groß-flächige Umstieg auf die neue Technik muss jetzt aktiv vorangetrieben werden, um das volkswirtschaftliche Potential der LED vollständig zu erschließen. Auf diesem Weg soll der vorliegende Praxisbericht zum Bundeswettbewerb »Kommunen in neuem Licht« als Orientierungshilfe bei der Planung und Umsetzung zukünftiger LED-Projekte dienen.

Inhalt

01	Einleitung	6
<hr/>		
02	LED-Technologie für die kommunale Anwendung	8
<hr/>		
2.1	Die Vorteile der LED	8
2.2	LED-Leuchtentechnologie	12
2.3	»Kommunen in neuem Licht« und das Projekt »EvalKomm«	15
<hr/>		
03	Straßen- und Architekturbeleuchtung	18
<hr/>		
3.1	Straßenbeleuchtung in Deutschland	19
3.2	Ergebnisse der Wettbewerbsprojekte	22
<hr/>		
04	Innenraumbeleuchtung	28
<hr/>		
4.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	29
4.2	Fallbeispiele aus dem Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht«	31
<hr/>		
05	Zusammenfassung	40
<hr/>		

01

Einleitung

»Kommunen in neuem Licht«

Leuchtdioden stehen weltweit vor einer umfassenden Einführung in der Allgemeinbeleuchtung. Aufgrund ihrer technischen Vorteile gegenüber herkömmlichen Lichtquellen, ihrer positiven Wirkungen unter physiologischen Aspekten für die Menschen und der geringeren Belastungen für die Umwelt – die Vorteile der LED erstrecken sich auf Lebensdauer, Energieverbrauch, Flexibilität, Entsorgung und Wartung – ist davon auszugehen, dass sich diese Technik in den kommenden Jahren durchsetzen wird und konventionelle Leuchtmittel nahezu vollständig vom Markt verschwinden werden.

Es hat sich allerdings gezeigt, dass die LED-Technologie heutige Beleuchtungssysteme nicht einfach ersetzen kann. Die technische Planung, die Verarbeitung, die Installation, die Wartung und die Nutzung für das Wohlbefinden der Menschen setzen ein grundsätzlich geändertes Herangehen an die neuen Beleuchtungssysteme voraus. Darüber hinaus stellen hohe Anfangsinvestitionen für viele Anwendungen eine signifikante Hürde bei der Einführung der neuen Technologie dar.

Bei der Umstellung auf die neue Technologie in Deutschland kommt den Städten und Gemeinden als öffentlich sichtbaren Lichtenwendern aus mehreren Gründen eine Schlüsselrolle zu. Zum einen wird in der kommunalen Anwendung von der Außen- bis zur Innenbeleuchtung eine Vielzahl unterschiedlicher Szenarien abgebildet,

und die öffentliche Hand nimmt für zahlreiche private Anwender eine Vorbildfunktion mit signifikanter Hebelwirkung ein. Darüber hinaus ist die Beleuchtung für einen Großteil der kommunalen Aufwendungen für Energie verantwortlich. Gelingt hier eine großflächige Umstellung auf eine energieeffiziente Technologie, so trägt dies nicht nur zu einer signifikanten Entlastung der angespannten kommunalen Haushalte bei. Deutsche Städte und Gemeinden können durch die Umstellung auf LED ihren Energieverbrauch entscheidend reduzieren und so einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung und zum Gelingen der Energiewende leisten.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2009 den Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht« gestartet. Im Rahmen dieses Wettbewerbes waren die deutschen Städte und Gemeinden aufgefordert, innovative Konzepte und

Abbildung 1: LED-Beleuchtung in Königsfeld © Hess AG

Ideen zur Nutzung der LED mit hoher Breitenwirkung und Sichtbarkeit vorzustellen. Die zehn überzeugendsten Beiträge wurden durch das BMBF ausgezeichnet, und die im Wettbewerb erfolgreichen Kommunen werden bei der Umsetzung ihrer Ideen vom Ministerium mit insgesamt 20 Mio. € gefördert. Ziel ist dabei nicht die isolierte Umsetzung von Einzelprojekten zur LED-Technologie. Vielmehr sollen Demonstrationsprojekte mit hoher Übertragbarkeit entstehen, die in ihrer Summe eine breite Praxis- und Erfahrungsbasis für weitere Anwender darstellen.

Um eine wissenschaftlich fundierte Auswertung der Ergebnisse sicherzustellen, werden alle Projekte durch unabhängige Experten aus Hochschulen und Forschungsinstituten evaluiert. Neben spezifischen Fragestellungen der Einzelprojekte werden in allen Untersuchungen entscheidende Aspekte von übergeordneter Relevanz beantwortet: Welche Energieeinsparungen lassen sich in der praktischen Anwendung durch die LED erzielen? Garantiert die LED eine ausreichende Beleuchtungsqualität, die den verschiedenen Anwendungsfällen auch gerecht wird? Und, für die kommunale Anwendung besonders wichtig, wie beurteilen die Bürgerinnen und Bürger das neue Licht in ihrer Stadt?

Innerhalb des Wettbewerbes übernimmt die TU Darmstadt im Rahmen des Förderprojektes »EvalKomm« die Aufgaben zur projektübergreifenden Evaluierung aller Projekte. Dadurch wird seitens des Ministeriums sichergestellt, dass zentrale Fragestellungen in allen Projekten unter den gleichen Rahmenbedingungen beantwortet werden und die Datenbasis aus den verschiedenen Projekten vergleichbar bleibt.

Mit dem Abschluss aller Projekte und der Auswertung der Ergebnisse in diesem Jahr liegt nun erstmals eine umfassende, empirische Datensammlung zur Anwendung der LED in typischen Aufgabenfeldern kommunaler Beleuchtung vor. Gegenstand des vorliegenden Abschluss- und Praxisberichtes zum Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht« ist die Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse zur Energieeffizienz, zur Qualität

und zur Bewertung der Beleuchtungslösungen durch Anwender und Bewohner. Ziel ist nicht, hier sämtliche Einzelergebnisse aller Projekte dezidiert und im Detail vorzustellen. Auf Grund der Vielfalt der adressierten Aspekte – vom Einfluss der Beleuchtung auf ein Tourismuszentrum bis zur Untersuchung der Wirkung unterschiedlicher Arten von Tunnelbeleuchtung auf Fledermäuse – kann und soll ein solcher Bericht dies nicht leisten. Zur detaillierten Diskussion aller Einzelaspekte sei an dieser Stelle auf die öffentlich zugänglichen Abschlussberichte der Projekte in den entsprechenden Datenbanken des BMBF sowie auf entsprechende Veröffentlichungen und Broschüren der beteiligten Kommunen selbst verwiesen. Weiterführende Informationen z.B. zu spezifischen Projektinhalten und relevanten Ansprechpartnern stehen online über die Homepage zum Wettbewerb (www.kommunen-in-neuem-licht.de) zur Verfügung.

Mit dem vorliegenden Bericht werden, gesondert nach Anwendungen in der Straßen- und Außenbeleuchtung sowie der Innenbeleuchtung, die wesentlichen Ergebnisse aus den zehn Projekten des Wettbewerbes vorgestellt. Nach Einschätzung der Autoren zeichnen sich die an dieser Stelle diskutierten Ergebnisse durch ihre übergeordnete Relevanz und Allgemeingültigkeit aus. Dies bedeutet, die vorgestellten Resultate sind – bis zu einem gewissen Grad – unabhängig von der spezifischen Ausgestaltung eines Projektes. Damit soll, ganz im Sinne des Wettbewerbes und des BMBF, der vorliegende Bericht als wissenschaftliche Referenz und fundierte Erfahrungsbasis für die Umsetzung weiterer Projekte zur Anwendung der LED in der kommunalen Beleuchtung dienen.

02

LED-Technologie für die kommunale Beleuchtung

Leuchtdioden oder Light Emitting Diodes, kurz LED, werden in den kommenden Jahren konventionelle Leuchtmittel in vielen Anwendungen verdrängen und den Lichtmarkt weltweit revolutionieren. Um das volle Potential der LED nutzen zu können, ist ein gewisser Einblick in die technologischen Besonderheiten dieser Technologie unerlässlich.

Als Halbleitertechnologie fordert die LED dem Anwender oftmals ein deutlich tiefergehendes Verständnis technischer Begriffe und Zusammenhänge ab, als er dies in den vergangenen Jahrzehnten von den konventionellen, analogen Leuchtmitteln gewohnt war.

An dieser Stelle sollen die zentralen technischen Eigenschaften der LED und einer klassischen Leuchte gegenübergestellt sowie in Bezug auf die Anwendung im kommunalen Umfeld diskutiert werden. Selbstverständlich wird dabei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, vielmehr sollen die für die Umsetzung kommunaler Projekte relevanten Fragestellungen dem Anspruch dieses Ergebnisberichtes folgend in komprimierter Form vorgestellt werden.

2.1 Die Vorteile der LED

Eine der zentralen Kenngrößen der Beleuchtung ist die Effizienz des Leuchtmittels, also das Verhältnis zwischen abgestrahlter Lichtleistung in Lumen (lm) und dafür aufgewendeter Energie in Watt (W). Die Entwicklung der konventionellen, heute im Markt etablierten Leuchtmittel ist nahezu abgeschlossen. Die Effizienz sowohl der Leuchtstofflampe, als auch der Metall- und Natriumdampflampe konnte in den vergangenen Jahrzehnten nur unwesentlich verbessert werden. Die überwiegend in der Innenraumbeleuchtung verwendeten modernen Leuchtstofflampen weisen Effizienzen von bis zu 100 lm/W auf. Quecksilberdampflampen, deren Anteil in der deutschen Straßenbeleuchtung aktuell 35 % bis 40 % umfasst, liegen bei ca. 50 lm/W, während Natriumdampflampen, die vielerorts als mögliche Ersatzlichtquellen für die Quecksilberdampflampen betrachtet werden, heute eine Lichtausbeute von maximal 130 lm/W zeigen.

Abbildung 2: Straßenbeleuchtung in Norden-Norddeich
© VDI Technologiezentrum GmbH

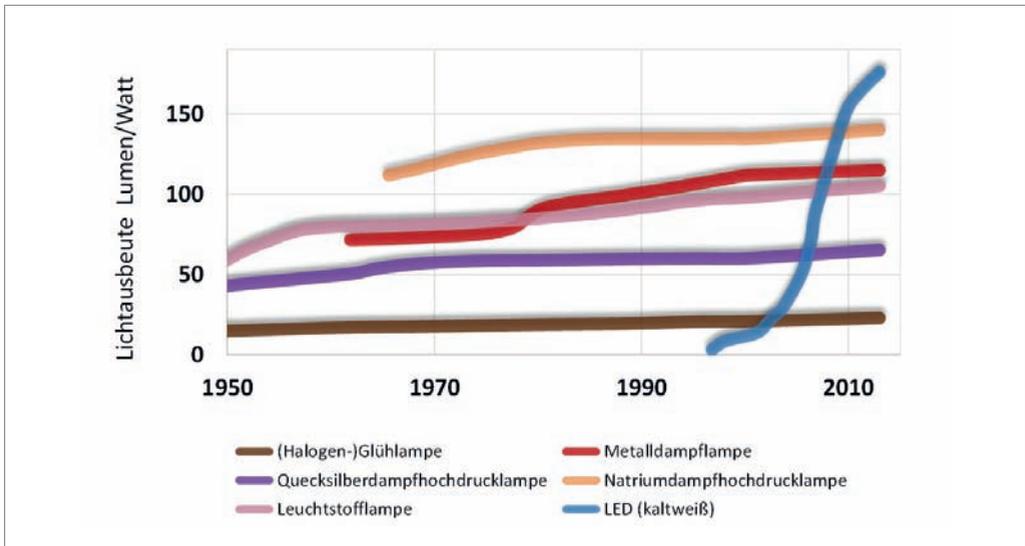


Abbildung 3: Entwicklung der Lichtausbeute verschiedener Leuchtmittel © TU Darmstadt

Im Gegensatz zu den konventionellen Leuchtmitteln ist die Entwicklung der LED geprägt durch eine permanente und rasante Effizienzsteigerung. Als typische Halbleitertechnologie lässt sich auch für die LED eine Art Mooresches Gesetz beobachten: Seit der Vorstellung der ersten LEDs hat sich über die letzten vierzig Jahre die Effizienz in etwa alle zehn Jahre verzehnfacht. Heutige Hochleistungs-LEDs mit kaltweißem Farbspektrum werden bereits mit Effizienzen von 150 lm/W gemessen. In den kommenden Jahren wird diese Entwicklung weiter voranschreiten – mit ein Grund dafür, dass die

LED die Lichttechnik in den kommenden Jahrzehnten dominieren wird – auch wenn sich die Geschwindigkeit der Effizienzsteigerung verlangsamen wird.

Die Umrüstung auf eine moderne und effektive LED-Beleuchtungstechnologie ermöglicht damit offensichtlich Energieeinsparungen in erheblichem Umfang. Neben der Notwendigkeit den CO₂-Ausstoß zu reduzieren, ist dies mit erheblichen Kosteneinsparungen verbunden. Der Preis für Energie wird in den nächsten Jahren weiter steigen, und der Handlungsdruck, die Nutzung von

	Energieeinsparung	CO ₂ -Einsparung	Kosteneinsparung
Straßenbeleuchtung	2,7 Milliarden KWh	1,6 Millionen Tonnen	400 Millionen €
Bürobeleuchtung	3,2 Milliarden KWh	1,9 Millionen Tonnen	475 Millionen €
Industriebeleuchtung	8,3 Milliarden KWh	5,0 Millionen Tonnen	1,2 Milliarden €
Private Beleuchtung	7,5 Milliarden KWh	4,5 Millionen Tonnen	1,1 Milliarden €

Tabelle 1: Einsparpotentiale der Beleuchtung in Deutschland pro Jahr nach Schätzungen des Zentralverbandes der Elektrotechnik und Elektronikindustrie (ZVEI)

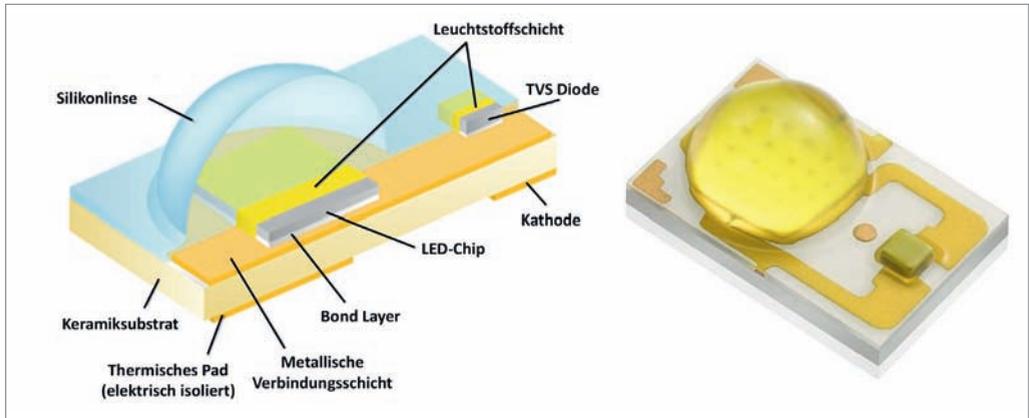


Abbildung 4: Struktureller Aufbau einer weißen LED mit einem blauen Chip und einem Leuchtstoff © TU Darmstadt

Energie so effizient wie möglich zu gestalten, wird weiter zunehmen. Nach Einschätzung des deutschen Zentralverbandes der Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) ist das mit der LED verbundene Einsparpotential enorm: Allein in der Straßen- und Außenbeleuchtung können deutsche Kommunen jährlich bis zu 2,7 Mrd. kWh Energie und damit verbunden 1,6 Mio. Tonnen an CO₂-Emission einsparen.

Bei einer LED wird weißes Licht immer durch die Überlagerung verschiedener Farben erreicht. Für Anwendungen in der Allgemeinbeleuchtung wird zur Weißlichterzeugung häufig die Kombination einer blauen LED mit einem entsprechenden Leuchtstoff, oder genauer: Phosphor, verwendet. Dieser lumineszierende Stoff absorbiert in der Regel die blaue Strahlung und wird dadurch zur Emission von grüner, gelber oder roter Strahlung angeregt.

Da nur ein Teil der blauen Strahlung absorbiert wird, ergibt sich somit eine Mischung von blauem mit grünem, gelbem und rotem Licht. Durch die additive Farbmischung entsteht dann »weißes« Licht. Eine geeignete Auswahl des verwendeten Leuchtstoffes bzw. die Kombination verschiedener Materialien und deren Konzentrationen ermöglicht es, den Weißton der LED zu variieren und je nach Anwendung gezielt einzustellen. Grundsätzlich wird dabei zwischen den drei in Tabelle 2 dargestellten Weißtönen unterschieden, wobei Licht mit hohem Rotanteil warm und mit hohem Blauanteil kalt wirkt.

Die Effizienz der LED ist dabei eng an den jeweiligen Weißton geknüpft. Während kaltweiße LEDs mittlerweile Spitzenwerte über 150 lm/W erreichen, liegen warmweiße LEDs mit 100-120 lm/W noch ein wenig dahinter. Allerdings hat sich die Effizienz in den letzten

Beschreibung des Weißtons	Ähnlichste Farbtemperatur [K]
warmweiß	2600 – 3700
neutralweiß	3700 – 5000
kaltweiß	5000 – 9500

Tabelle 2: Beschreibung des Weißtons und Zuordnung zur ähnlichsten Farbtemperatur

Lampentyp	Genereller Farbwiedergabeindex Ra
Glühlampen, Halogenglühlampen	100
Quecksilberdampfhochdrucklampen	60 – 70
Leuchtstofflampen	70 – 95
Kompaktleuchtstofflampen	80 – 85
Halogenmetaldampflampen	75 – 95
Natriumdampfhochdrucklampen	20 – 25
Weißer LEDs	65 – 95

Tabelle 3: Typische Farbwiedergabeindizes für unterschiedliche Leuchtmittel

fünf Jahren mehr als verdoppelt, mit weiterhin ansteigender Tendenz.

Für die Anwendung vollständig charakterisiert ist das Licht durch die Angabe der Farbtemperatur allerdings noch nicht. Weißes Licht setzt sich immer aus einem Spektrum unterschiedlicher Frequenzen zusammen. Wie vollständig die verschiedenen Farbbereiche in diesem Spektrum enthalten sind wird durch den sog. Farbwiedergabeindex (cri – colour rendering index) beschrieben. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 5 die Wirkung verschieden farbiger Objekte unter dem Licht mit niedriger und hoher Farbwiedergabe dargestellt. Die Wahl einer entsprechend hohen Farbwiedergabe

ist offensichtlich eng verbunden mit der unmittelbaren Beleuchtungssituation: In der Innenraumbelichtung mit vielen hochqualitativen Anwendungen im Büro, in Krankenhäusern, Verkaufsräumen, Museen oder in der Schule werden seit einigen Jahren vermehrt weiße LEDs verwendet, die eine hohe Lichtausbeute, eine hohe Farbwiedergabe zur farbgetreuen Darstellung der Objekte und eine stabile Farbtemperatur miteinander kombinieren.

Auch in der Außen- und Straßenbeleuchtung ist eine gute Farbwiedergabe von zentraler Bedeutung: Neben subjektiven Aspekten, ist eine gute Farbwiedergabe im Straßenverkehr vor allem auch für die Verkehrssicherheit



Abbildung 5: Farbige Objekte unter Licht mit niedriger (links) und hoher Farbwiedergabe (rechts) © TU Darmstadt



Abbildung 6: ein blaues Auto unter dem Licht einer Natriumdampf-Hochdrucklampe (links) und einer weißen LED (rechts) © TU Darmstadt

von Relevanz. Vergleicht man in einer typischen Beleuchtungssituation die Wirkung einer Natriumdampfampe mit eher schlechter Farbwiedergabe und eher gelbem Farbspektrum mit einer weißen LED mit guter Farbwiedergabe, so bleiben unter der Natriumdampfampe eine Reihe von Details verborgen (siehe Abbildung 6). Eine gute Farbwiedergabe trägt in der Praxis wesentlich zur frühzeitigen Identifizierung von Gefahrenquellen in den Dunkelstunden bei und leistet damit einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr.

Neben einer hohen Lichtausbeute und einer hervorragenden Lichtqualität und Farbwiedergabe, verfügt die LED in der Anwendung im Vergleich zu klassischen Leuchtmitteln noch über einige weitere Vorteile:

- Bei geeigneten Betriebsbedingungen weisen LEDs Lebensdauern von 30.000 – 50.000 Stunden auf – deutlich länger als die typischen Werte konventioneller Systeme.
- LEDs sind schnell schaltbar und dimmbar mit einer Ansprechzeit im Bereich von Millionstel-Sekunden. Dies ermöglicht durch gezielte Kombination mit entsprechenden Sensoren eine intelligente Ansteuerung und Nutzung von Licht. Während also LED-Leuchten quasi sofort nach dem Einschalten den vollen Lichtstrom liefern, benötigen beispielsweise Natriumdampfhochdruck-Leuchten bis zu 30 Minuten, um auf ihre volle Lichtstärke einzuschwingen..

- Das Licht einer LED enthält keine bzw. sehr wenige UV-Strahlungsanteile und LED-Straßenleuchten ziehen somit weniger Insekten als Leuchtstofflampen und Quecksilberdampfampfen an. Im Vergleich mit Quecksilberdampfampfen belegen aktuelle Ergebnisse, dass LED-Systeme eine 80 % niedrigere Verschmutzung auf Grund von Insektenbefall aufweisen.

2.2 LED-Leuchtenttechnologie

Generell müssen LED-Beleuchtungsanlagen wie alle Beleuchtungssysteme für die Innenraumbeleuchtung, für die technische Straßenbeleuchtung, für die dekorative Park- und Platzbeleuchtung sowie für die Architekturbeleuchtung (Gebäudeanstrahlung) unterschiedlich dimensioniert, konzipiert und gefertigt werden. Diese Leuchten erfüllen verschiedene lichttechnische Aufgabenstellungen und unterscheiden sich vor allem

- durch Bauformen, Abmessungen, Anschlüsse, Gehäuse, Gewicht und Schutzklassen;
- durch die Art der Steuerung, die Optiken und das thermische Managementsystem;
- durch die Lichtstärkeverteilung und die Realisierung einer entsprechenden Farbwiedergabe.

Im Vergleich zu klassischen Lösungen lassen sich aber einige charakteristische Unterschiede feststellen, was bei der Planung und dem Betrieb der Beleuchtungsanlagen entsprechend berücksichtigt werden sollte.



Abbildung 7: Für die Entwicklung relevante Bereiche einer modernen LED-Straßenleuchte © TU Darmstadt

Generell besteht eine moderne LED-Straßenleuchte aus folgenden Baugruppen:

Mechanische Baugruppe: Das Gehäuse sollte ästhetisch sein, vor allem aber auch thermisch ein möglichst geeignetes Design aufweisen. Die einzelnen LED-Baugruppen werden zusammen mit ihren Kühlkörpern über Befestigungselemente mit dem Gehäuse thermisch verbunden. Auf diese Weise wird eine optimale Ableitung der Wärme weg von den temperatursensiblen LED-Baugruppen hin zum Gehäuse realisiert. Die Oberfläche sollte glatt und ohne Profile sein, um Ablagerungen von Schmutz und Fremdkörpern aus der Umgebung wie z. B. Blätter von Bäumen oder Staub zu minimieren.

Elektronische Baugruppe: Die elektronische Baugruppe umfasst die Funktionseinheiten Vorschaltgerät, Steuereinheit (Mikrocontroller) und Treiberelektronik sowie die verwendete Leiterplatte mit aufgelöteten LEDs. Über Kabel und Stecker werden die einzelnen Komponenten verbunden und optionale Sensoren z. B. für Temperatur, Helligkeit und Bewegung eingebunden. Die Software im Mikrocontroller übernimmt die Überwachungs- und Betriebsfunktion für die ganze Leuchte.

Optische Baugruppe: Die Optik (Linsen, Reflektor) bestimmt die Verteilung des LED-Lichtstroms auf die zu beleuchtende Nutzfläche. Diese besteht im Wesentlichen aus den Fahrbahnen und Fußwegen. Zu einem geringen wohldosierten Teil sollte jedoch auch Licht auf die Umgebung gelenkt werden, um gestalterischen Aspekten der Stadtarchitektur gerecht werden zu können und eine ansprechende, Sicherheit schaffende Beleuchtungsumgebung zu ermöglichen. Die Abdeckscheibe der Leuchte ist dabei von großer optischer Bedeutung.

Vergleicht man die Strukturen einer LED mit einer konventionellen Leuchte in Abbildung 8, erkennt man eine Reihe von Gemeinsamkeiten, aber auch signifikante Unterschiede:

Gemeinsam ist allen Leuchten das Gehäuse, das Abdeckglas, die Anschlüsse sowie die Anforderungen an die Dichtheit der Leuchte hinsichtlich Spritzwasser, Staub und Feuchtigkeit, die entscheidend die Systemlebensdauer beeinflussen. Signifikante Unterschiede liegen zunächst in der Spannungsversorgung, wobei vor allem auf Grund der hohen Zündspannungen bei Entladungslampen das Vorschalt- und Zündgerät ein großes Volumen im Leuchteninnenraum einnehmen. Die

Versorgungsspannungen der direkten LED-Baugruppen liegen maximal bei 60 V, in der Regel eher zwischen 24V und 48V.

Entscheidende Unterschiede stellt man vor allem im Bereich der Optik fest, also der Art und Weise wie das erzeugte Licht moduliert und bereitgestellt wird. Bei konventionellen Leuchten besteht die Optik grundsätz-

lich aus recht einfachen Reflektoren mit beschichteten Aluminium-Halbzeugen. Der ganze Lichtstrom einer Leuchte wird vorwiegend von einer bzw. von wenigen Entladungslampen geliefert. Durch die spezifischen Charakteristika der Lampe und des Reflektors ist die Lichtverteilungskurve vollständig definiert und kann damit nur in den seltensten Fällen adaptiv geändert werden. Eine LED-Leuchte besteht dagegen in der Regel

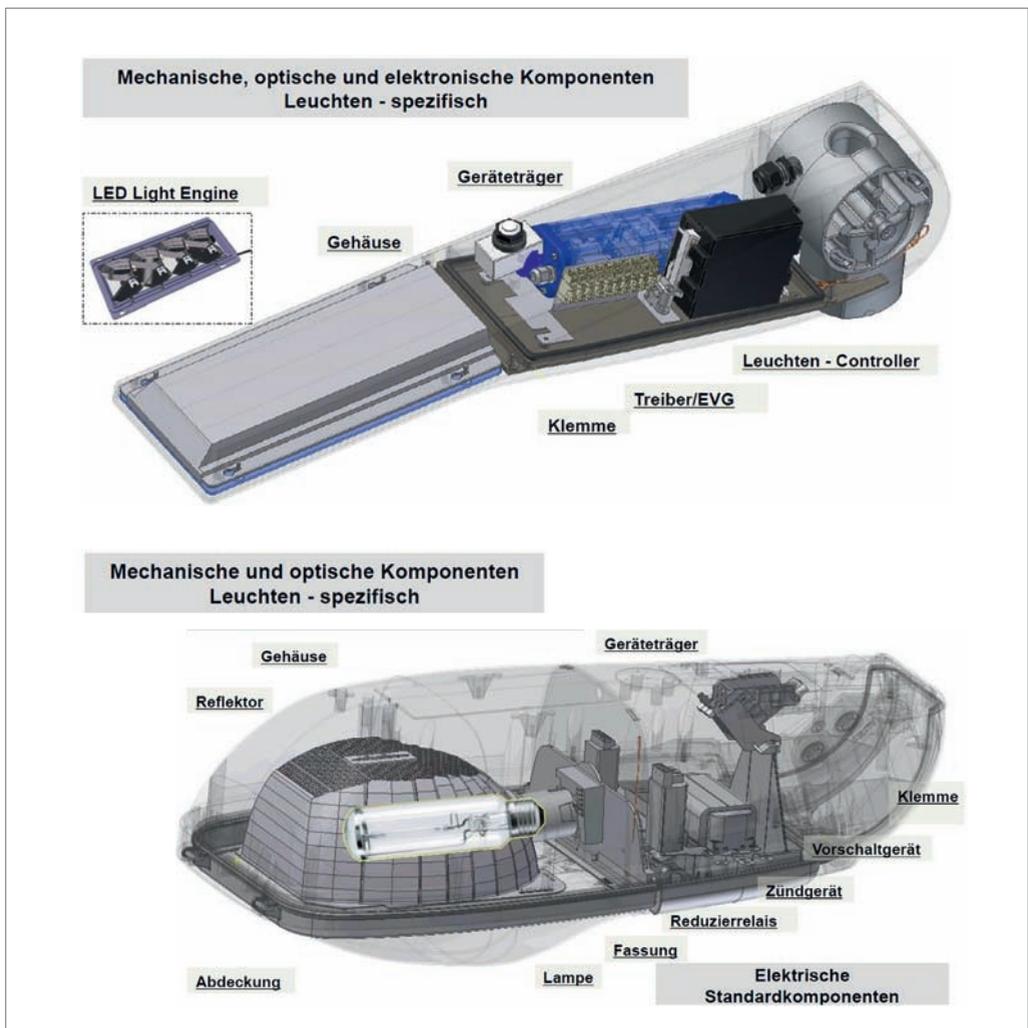


Abbildung 8: Typische Struktur einer LED- (oben) und einer klassischen Straßenleuchte (unten) © Siteco GmbH

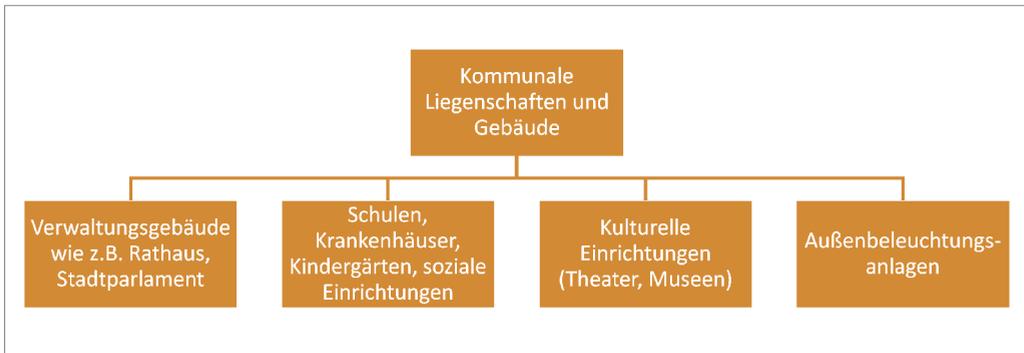


Abbildung 9: Struktur der kommunalen Liegenschaften

aus vielen Hochleistungs-LEDs, die gemeinsam den Lichtstrom der Leuchten einbringen. Da der Lichtstrom einer Leuchte in verschiedene Richtungen emittiert werden muss, übernehmen austauschbare LED-Module die räumliche Lichtverteilung. So gesehen gibt es LED-Innenraumleuchten mit separaten Lichtmodulen für den indirekten Anteil (auf die Decke und auf die Wände) und für den direkten Lichtanteil auf die Arbeitstische, wobei für die direkten und indirekten Anteile auch unterschiedliche Lichtfarben und Lichtmengen je nach Wetter, Uhrzeit etc. verschieden eingestellt werden können. In der Straßenbeleuchtung können unterschiedliche LED-Module in einer Leuchte z.B. die Beleuchtung verschiedener Verkehrsflächen übernehmen (Fußgängerzonen, Fußgängerüberwege, unterschiedliche Spuren einer Straße). Darüber hinaus verfolgen viele LED-Anbieter die Philosophie, dass die Lichtverteilungskurven der LED-Module sich zumindest teilweise überlappen und so die notwendige Lichtintensität auf der Straße erzeugen. Gegenüber der konventionellen Leuchtentechnik erscheint diese Methode des modularen Leuchtenaufbaus recht vorteilhaft, da man im Reparaturfall nur bestimmte defekte Module mit wenigen LEDs durch Module mit neuen LEDs der gleichen oder sogar bereits verbesserten Generationen ersetzen kann. Dies optimiert nicht nur das Ersatzteilmanagement, sondern schont auch die Umwelt durch kleinere Mengen zu entsorgender Elektronikbaugruppen.

2.3 Wettbewerb

»Kommunen in neuem Licht« und das Projekt »EvalKomm«

Mit dem Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht« fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der LED-Leitmarktinitiative die Umsetzung neuester Forschungsergebnisse im Bereich der Allgemeinbeleuchtung mit Leuchtdioden. Dazu wurden zehn Projekte im kommunalen Umfeld umgesetzt, welche das Potenzial der LED-Beleuchtung exemplarisch aufzeigen und später anderen Kommunen als Referenzprojekte verdeutlichen, wie die LED-Technologie auch in der eigenen Kommune zum Einsatz kommen kann. Auf diese Weise wird eine Breitenwirksamkeit der Maßnahme erzielt, so dass deutschlandweit Energie eingespart und die Beleuchtung bedarfsgerechter an die Nutzer angepasst wird.

Zur kommunalen Verwaltung gehört eine Anzahl von Liegenschaften, die gemäß dem Schema in Abbildung 9 strukturiert werden können, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird.

Die im Rahmen des Wettbewerbs eingereichten Beiträge decken die verschiedenen Einsatzfelder gut ab. Auf der Messe »Light + Building« wurden am 12.04.2010 von den 141 eingereichten Beiträgen die 10 Gewinner gekürt. Die ausgewählten Projekte umfassen sowohl repräsentative

	Kommune	Projekt
1	Landeshauptstadt Erfurt	Neugestaltung Nordhäuser Straße/Andreasstraße
2	Landkreis Görlitz	LED Saxony
3	Gemeinde Königfeld	LED-Netzwerk Schwarzwald
4	Stadt Wuppertal	LED-Beleuchtung auf der Nordbahntrasse
5	Stadt Trier	Porta Nigra – Das Tor zu mehr Energie-Effizienz
6	Stadt Norden	Ein Projekt mit Leuchtturmcharakter – LED-Beleuchtung in Norden-Norddeich
7	Landeshauptstadt München	LED als museale Allgemeinbeleuchtung – Neues Lichtkonzept in der städtischen Galerie im Lenbachhaus
8	Stadt Paderborn	Paderborner LED-Straßenbeleuchtung
9	Stadt Freiburg im Breisgau	LED Masterplan Freiburg

Tabelle 4: Gewinner des Wettbewerbs »Kommunen in neuem Licht« (<http://www.bmbf.de/de/13639.php>)



Abbildung 10: Gewinner des Wettbewerbs »Kommunen in neuem Licht« © VDI Technologiezentrum GmbH

Anwendungen in der Außenbeleuchtung (Straßenbeleuchtung, Tunnelbeleuchtung, Radwegbeleuchtung, Anstrahlung von Gebäuden und Brücken, Parkplätze, Markierungen für Sehbehinderte) als auch in der Innenraumbeleuchtung (Museen, Schulen). Neben der reinen Leuchtentechnik sollen auch Steuerungs- und Sensor-konzepte sowie die Lichtqualität überprüft werden.

Sämtliche Projekte des Wettbewerbes werden durch wissenschaftliche Partner aus der Region begleitet und evaluiert. Dabei stehen oftmals spezifische, individuelle Fragestellungen wie z.B. der Einfluss der Beleuchtung auf das Jagd- und Schwarmverhalten von Fledermäusen wie im Fall Wuppertal im Fokus der Einzeluntersuchungen. Relevante projektübergreifende Ergebnisse zu erfassen, aufzubereiten und zu analysieren ist Zielstellung des Projektes »EvalKomm« der TU Darmstadt, in dessen Rahmen dieser Praxisleitfaden entstanden ist. Alle zehn Projekte des Wettbewerbes wurden so einer unabhängigen, wissenschaftlich fundierten Evaluation unterzogen, die die anfänglich projektierten Werte erfasst und anschließend die installierten Beleuchtungsanlagen lichtmesstechnisch überprüft.

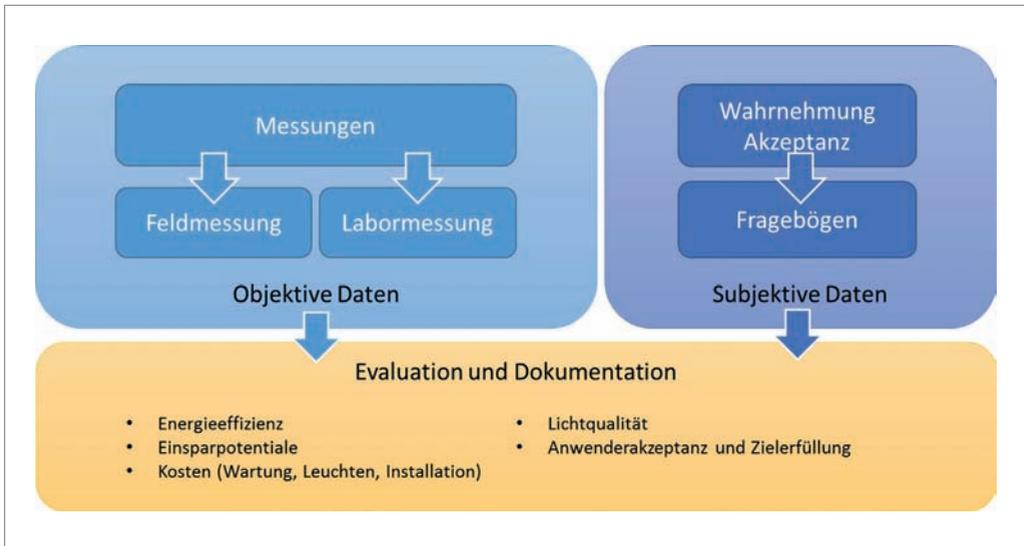


Abbildung 11: Arbeitsblöcke des Projekts »Evalkomm«

Die einzelnen Arbeitsblöcke des Projekts »Evalkomm« umfassen die folgenden Schritte:

- Messungen (Labormessungen der alten und der neuen Leuchten, Feldmessungen der alten und neu installierten Beleuchtungsanlagen) sowie lichttechnische Planung und Simulation der neuen LED-Anlagen;
- Untersuchung der Wahrnehmungsaspekte (Helligkeit, Blendung, Lichtfarben, Objektdetektion) sowie der generellen Akzeptanz der alten und neuen Beleuchtungsanlagen;
- Erstellung der Datenbank für die Evaluation und Dokumentation.

- Lichtstromabnahme in der Anlage über den Betriebszeitraum (Alterung);
- Wartungskosten;
- Ausfälle bei den LED-Leuchten (Ursache und Zeit des Ausfalls);
- Ergebnisse zum Akzeptanztest in den Beleuchtungsanlagen.

Soweit zugänglich wurden dabei zu allen Projekten die folgenden Daten unter einheitlichen Messvorschriften und Kriterien erhoben und anschließend miteinander verglichen:

- Energieverbrauch der LED-Anlagen;
- Beleuchtungsstärke und Leuchtdichtemessungen der Anlagen;
- Wichtigste Parameter der einzelnen verwendeten Leuchten (Lichtstärkeverteilung, Spektrum, Farbtemperatur, Farbort, Systemleistung);

03

Straßen- und Architekturbeleuchtung

Die verkehrsgerechte Ausleuchtung von Straßen und Plätzen sowie die stimmungsvolle Inszenierung der das Stadtbild prägenden Architektur gehören zu den zentralen Aufgaben in der kommunalen Lichtenwendung.

Die Straßenbeleuchtung im allgemeinen Sinn umfasst die ortsfeste Beleuchtung von Straßen und Tunneln in einer Stadt, in einer Gemeinde, auf einem Industriegebiet sowie auf den Zubringerstraßen zur Autobahn, darüber hinaus die Beleuchtung von Parkplätzen, Fußgängerbereichen und Fußgängerüberwegen. Eine ordnungsgemäße Straßenbeleuchtung soll die reibungslose Verkehrsabwicklung in den Dunkelstunden ermöglichen und die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer gewährleisten. Eine sachgemäß und situationsgerecht gestaltete Straßenbeleuchtung sorgt für eine gute Sicht und weniger Verkehrsunfälle. Sie senkt außerdem die Kriminalitätsrate und erhöht zugleich die gefühlte Sicherheit in den nächtlichen Stunden.

Die Architekturbeleuchtung dient gemeinsam mit der Straßenbeleuchtung einer sichtbaren Strukturierung des Stadtbildes und des Stadtgeschehens bei Nacht. Die Architekturbeleuchtung setzt die historisch, kulturell, religiös, wirtschaftlich und politisch bedeutenden Gebäude (wie z.B. Rathäuser, Stadttore und Kirchen) durch die Art der Beleuchtung, durch die Variation der Lichtfarben und Lichtstärken in Szene und steigert so

die Aufmerksamkeit und die Identifikation sowohl der Bewohner als auch der Besucher einer Stadt.

Entsprechend ihrer besonderen Bedeutung legen acht der zehn im Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht« ausgezeichneten Kommunen den Schwerpunkt in ihren Projekten auf die Außenbeleuchtung:

- Die Stadt **Norden-Norddeich**, mit einer situativ steuerbaren LED-Straßenbeleuchtung;
- Die Stadt **Rietberg**, mit einer vollständigen Umrüstung des historischen Stadtkerns auf LED;
- Die Stadt **Paderborn**, mit einer flächendeckenden Umrüstung auf LED in großen Teilen des Stadtgebietes;
- Die Stadt **Wuppertal**, mit der durchgehenden LED-Ausleuchtung ihrer »Nordbahntrasse«;
- Die Stadt **Erfurt**, mit einer intelligenten, an die jeweilige Verkehrsdichte angepassten LED-Straßenbeleuchtung;
- Die Städte **Görlitz und Löbau** mit einer lichttechnischen Neugestaltung historischer Wegenetze und Architektur;
- Das **LED-Netzwerk Schwarzwald** um die Gemeinde Königsfeld, mit einer flächendeckenden Sanierung der Straßen- und Außenbeleuchtung;

Abbildung 12: Beleuchteter Münsterplatz in Villingen © Hess AG

- Die **Stadt Freiburg**, mit einer Umstellung der historischen Straßenbeleuchtung auf LED im gesamten Stadtzentrum.

In diesem Kapitel sollen die übergeordneten Ergebnisse dieser Projekte zusammengefasst und präsentiert werden. Neben der Auswertung der Energieeffizienz der umgesetzten Projekte stehen dabei vor allem die Untersuchungen zur »lichttechnischen Bewertung« und zur »Akzeptanz bei Anwendern und Bürgern« der LED-Lösungen im Vordergrund der vorliegenden Diskussion.

3.1 Straßenbeleuchtung in Deutschland

In Deutschland beleuchten ungefähr 9 Millionen Leuchten öffentliche Straßen, Wege und Plätze. Für ihren Betrieb benötigen deutsche Kommunen und Gemeinden jährlich rund 4 Mrd. kWh an elektrischer Energie, was eine jährliche CO₂-Emission von über 2 Millionen Tonnen bedeutet. Dies entspricht Energiekosten von knapp 740 Mio. € und damit rund einem Drittel sämtlicher Aufwendungen der kommunalen Haushalte für Energie.

In der Straßenbeleuchtung lässt sich aktuell in Deutschland ein gravierender Sanierungs- und Investitionsstau feststellen. Gut ein Drittel aller derzeit installierten Leuchten ist bereits (teilweise weit) über 20 Jahre alt und die verwendete Technologie entspricht bei Weitem nicht mehr dem heutigen Stand der Technik. So werden immer noch ca. 35 – 40 % aller Leuchten mit Quecksilberdampfleuchten betrieben, die auf Grund der Ökodesign-Richtlinien der Europäischen Kommission ab 2015 innerhalb der EU nicht mehr vertrieben werden dürfen.

Vergleicht man allein die typischen Effizienzwerte der unterschiedlichen, in der Straßenbeleuchtung heute verwendeten Leuchtmittel, so wird das volkswirtschaftliche Potential der LED-Technologie unmittelbar deutlich: Bei einer Untersuchung aktueller, am Markt erhältlicher Systeme durch die TU Darmstadt weisen LED-Leuchten



Abbildung 13: Technische LED-Straßenbeleuchtung in Freiburg
© TU Darmstadt

Systemeffizienzen zwischen 70 und 100 lm/W auf, während für typische Quecksilberdampfleuchten nur rund halb so hohe Werte zwischen 30 und 50 lm/W festgestellt werden konnten. Bezogen auf die zur Straßenbeleuchtung aufgewendeten Energiekosten lässt sich der LED damit ein jährliches **Einsparpotenzial von 2 Mrd. kWh**, in etwa die Jahresleistung des AKW Biblis A, oder **360 Mio. €** an Stromkosten zuschreiben.

Projektsteckbrief

Freiburg im Breisgau

vollständige Umrüstung der historischen Altstadt auf LED

- Straßentypen: S4, S5
- Anzahl Lichtpunkte: 303
- realisierte Energieeinsparung
 - absolut: 23.100 kWh pro Jahr
 - relativ: 64 %
- besondere Projekthighlights:
 - Lichttechnische Inszenierung des Münsters und der historischen Stadttore



Abbildung 14: LED-Beleuchtung in Rietberg © Fotograf Niklas Reiners

Um Kosten zu sparen, passen heute viele Kommunen ihre Beleuchtung an den aktuellen Bedarf, d.h. an die zu einer bestimmten Jahres- oder Uhrzeit erwartete Verkehrsdichte, an. In der Praxis bedeutet dies allerdings oft, dass Teile der Straßenbeleuchtung in verkehrsarmen Abend- und Nachtstunden gedimmt oder teilweise sogar ausgeschaltet werden. Eine in Hinblick auf die Verkehrssicherheit unter Experten stark umstrittene Praxis. Auch hier bietet die LED als Halbleitertechnologie ein immensens Verbesserungspotential. Im Gegensatz zu konventionellen Leuchtmitteln lassen sich LEDs viel energiesparender und ohne signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer dimmen und elektronisch ansteuern. In Kombination z.B. mit Funkmeldern und Präsenz- oder Bewegungsmeldern lassen sich so intelligente LED-Beleuchtungslösungen aufbauen, die situativ das Beleuchtungsniveau regeln und an den tatsächlichen Bedarf anpassen. Entsprechende Systeme sind am Markt bereits verfügbar und wurden z.B. in den Wettbewerbsprojekten der Städte Norden und Erfurt sehr erfolgreich eingesetzt.

Lichttechnische Anforderungen und Güte-merkmale in der Außenbeleuchtung

Die technischen Anforderungen und alle weiteren, wesentlichen Gütekriterien an jede Art ortsfester Verkehrsbeleuchtung werden für Deutschland durch eine Reihe von Normen bestimmt:

- DIN 67523 – Beleuchtung von Fußgängerüberwegen;
- DIN 67524 – Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen;
- DIN EN 13201 – Straßenbeleuchtung;
- DIN EN 67528 – Beleuchtung von Parkflächen.

Maßgeblich zur Planung und Vermessung von Beleuchtungsanlagen im Bereich der Straßenbeleuchtung ist die Norm DIN EN 13201. In ihr sind alle relevanten Berechnungsvorschriften und Güte-merkmale festgelegt. Aus einer großen Parameterliste innerhalb der Norm (Verkehrsteilnehmer, Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer, Umfeld der Straße,...) ergeben sich für die relevanten

Gütemerkmale bestimmte Minimalanforderungen, die bei der Lichtplanung berücksichtigt und im späteren Betrieb zu jedem Zeitpunkt eingehalten werden müssen.

Ein zentraler Punkt bei der Realisierung der DIN EN 13201 ist die Festlegung der entsprechenden Beleuchtungsklasse für die betreffende Straße durch die kommunale Verwaltung. Diese Klassifizierung in unterschiedliche Beleuchtungsklassen erfolgt vorrangig nach der objektiven Analyse der maximal erlaubten Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer, der Dichte des Verkehrsaufkommens und der jeweiligen

Beleuchtungssituation. Gemäß den Kriterien der DIN werden in Deutschland 70 % bis 75 % aller Straßen als Anliegerstraße mit zugeordneter Beleuchtungsklasse S4 und S5 klassifiziert. Entsprechend befasst sich der Großteil der vorliegenden Projekte aus dem Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht« mit diesem Straßentyp und den zugeordneten Beleuchtungsklassen.

Für die S-Beleuchtungsklassen ist die Beleuchtungsstärke die maßgebliche lichttechnische Größe – im Gegensatz zu den Hauptverkehrsstraßen der ME-Klassen, bei denen die Leuchtdichte die primäre Kenngröße darstellt.

	Titel
DIN EN 13201-2	Gütemerkmale
DIN EN 13201-3	Berechnung der Gütemerkmale
DIN EN 13201-4	Methoden zur Messung der Gütemerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen

Tabelle 5: Wesentliche Bestandteile der Norm DIN EN 13201

Klasse	Horizontale Beleuchtungsstärke	
	E/lx [Wartungswert]	E_{min} /lx [Wartungswert]
S1	15	5
S2	10	3
S3	7,5	1,5
S4	5	1
S5	3	0,6
S6	2	0,6
S7	unbestimmt	unbestimmt

Tabelle 6: Lichttechnische Anforderungen der S-Beleuchtungsklassen gemäß DIN EN 13201



Abbildung 15: Beispiel einer Beleuchtungssituation mit guter (links) und schlechter (rechts) Gleichmäßigkeit © Trilux GmbH

Darüber hinaus kommt vor allem der Gleichmäßigkeit der Beleuchtungslösung eine entscheidende Bedeutung zu. In Abbildung 15 ist dazu eine typische Situation gezeigt: Wird eine Straße homogen beleuchtet, so sind alle Verkehrsteilnehmer gut wahrnehmbar. Werden dagegen einige Leuchten z. B. aus Kostengründen ausgeschaltet und die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung signifikant reduziert, so sind die Verkehrsteilnehmer – wie in diesem Beispiel die Fahrradfahrerin – nicht mehr unmittelbar zu erkennen. Die Ungleichmäßigkeit in der Beleuchtung stört eine stabile Adaptation und Wahrnehmbarkeit der Verkehrsteilnehmer und erhöht sowohl die Anzahl als auch die Grade der Gefahrenquellen im Straßenverkehr.

3.2 Ergebnisse der Wettbewerbs-Projekte

Acht der zehn vom BMBF geförderten Demonstrationsprojekte aus dem Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht« befassen sich mit Anwendungen der LED in der kommunalen Straßen- und Außenbeleuchtung. Das Aufgabenspektrum über alle Projekte hinweg umfasst dabei eine Vielzahl von Aspekten und reicht von der gezielten Umsetzung sensorgesteuerter und intelligent vernetzter Leuchtensysteme (wie z.B. in Norden-Norddeich) bis zur

großflächigen Umrüstung ganzer Stadtteile auf ein speziell für das Projekt entwickeltes LED-System in Paderborn. Vom Umfang liegen die Projekte zwischen einigen hundert (bei teuren historischen Leuchten) und über tausend Lichtpunkten (bei großräumiger Umrüstung der Straßenbeleuchtung in Wohngebieten mit günstigeren technischen Leuchten). An dieser Stelle sollen und können nicht sämtliche Details aus allen Projekten dargestellt und diskutiert werden, hierzu sei erneut auf die öffentlich zugänglichen Abschlussberichte der Einzelprojekte verwiesen. Vielmehr sollen hier übergeordneten Ergebnisse aller Projekte zur Qualität der lichttechnischen Lösungen, zur erzielten Energieeffizienz und Energieeinsparung sowie zur Akzeptanz der LED-Lösungen bei Anwohnern und Bürgern zusammengefasst und diskutiert werden.

Lichttechnische Qualität der LED-Lösungen

Vor der Umrüstung auf die neuen LED-Leuchtmittel wurde in allen Projekten der Altbestand systematisch vermessen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Altanlagen die lichttechnischen Anforderungen der Norm in Bezug auf das geforderte Helligkeitsniveau und/oder die Gleichmäßigkeit der Lichtverteilung in vielen Fällen nicht erfüllt haben. In einigen Fällen waren die Beleuchtungsniveaus

auch deutlich höher als durch die Norm vorgegeben, was unter Aspekten der Energieeffizienz ebenfalls keine optimale Lösung darstellt.

Die Anforderungen des BMBF an die Demonstrationsprojekte sehen vor, dass mit der Umrüstung auf LED eine normgerechte Beleuchtungslösung zu gewährleisten ist, ohne das dabei das Beleuchtungsniveau signifikant über der Vorgaben der Norm hinausgeht. Aus Kostengründen wurde in den Projekten in den allermeisten Fällen die Anzahl der Lichtpunkte nicht verändert, nur in wenigen Ausnahmesituationen wurden vereinzelt neue Masten aufgestellt. Um mit der Umrüstung auf LED eine normgerecht Beleuchtung sicherzustellen, wurde in allen Projekten auf Basis von Simulationsdaten eine spezifische Lichtplanung durchgeführt, mit deren Hilfe die lichttechnischen Kriterien an die Leuchten bestimmt werden konnten. Nach erfolgter Umrüstung wurden sämtliche Anlagen entsprechend der ursprünglichen Analyse des Altbestandes erneut lichttechnisch vermessen.

Als Ergebnis dieser Messungen zeigt sich, dass unabhängig von der Qualität der Altanlage mit der Umrüstung auf LED bis auf sehr wenige, begründete Ausnahmefälle in allen Projekten eine **normgerechte Beleuchtung realisiert** werden konnte.

Effizienz der LED-Lösungen und realisierte Energieeinsparungen

Die überwiegende Mehrzahl der Straßen in den Wettbewerbsprojekten sind Anliegerstraßen oder verkehrsberuhigte Zonen der Beleuchtungsklassen S3 bis S6. Die installierten Leuchtentypen können dabei grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilt werden: Technische Leuchten, wie man sie heute in großer Zahl an deutschen Straßen findet, und dekorative, teilweise historische Leuchten, die das Stadtbild stilbildend mitgestalten. Die technischen Leuchten wurden innerhalb der Projekte mit der Umrüstung auf LED komplett getauscht. Teilweise wurden hierzu, wie im Fall Paderborn, sogar eigenständige Konzepte neu entwickelt. Die historischen Leuchten sollten dagegen, auf Grund ihrer prägenden Bedeutung



Abbildung 16: Anwohnerstraße mit LED-Beleuchtung in Rietberg © VDI Technologiezentrum GmbH

für das Stadtbild, erhalten werden. In diesem Fall kamen passende LED-Retrofitssysteme mit angepasster Lichtverteilung zur Anwendung.

Projektsteckbrief

LED-Saxony

Sanierung historischer Wegeverbindungen zwischen den Städten Görlitz und Löbau

- Straßentypen: S5, S6
- Anzahl Lichtpunkte: 296
- realisierte Energieeinsparung
 - absolut: 78.400 kWh pro Jahr
 - relativ: 61%
- besondere Projekthighlights: Ausgestaltung der »Via Regia« inkl. Beleuchtung bedeutender architektonischer Wegemarken



Abbildung 17: Typische LED-Straßenbeleuchtung in Königsfeld © Hess AG

Auch wenn die Ausgangssituation in allen Projekten im Detail durchaus sehr unterschiedlich gewesen ist, so zeigen die Ergebnisse des Energiemonitorings in allen Projekten eine eindeutige Tendenz: Mit dem Umstieg auf LED lässt sich die installierte Anschlussleistung der

Leuchten mehr als halbieren. Der Energieverbrauch konnte, bei mindestens gleichbleibender, meistens aber verbesserter Ausleuchtung, damit **um mindestens 50 %** reduziert werden.

Projektsteckbrief

Stadt Rietberg

Umsetzung eines ganzheitlichen Lichtkonzeptes für den Altstadtkern

- Straßentypen: S3, S4
- Anzahl Lichtpunkte: 202
- realisierte Energieeinsparung
 - absolut: 54.100 kWh pro Jahr
 - relativ: 50 %
- besondere Projekthighlights:
 - Aufbau eines LED-basierten Leitsystems zur Verbesserung der Orientierung sehbehinderter und älterer Verkehrsteilnehmer

Das Beispiel der Gemeinde Königsfeld aus dem LED-Netzwerk Schwarzwald illustriert dieses Ergebnis im Detail. Im Rahmen des Projektes wurden sämtliche Außenleuchten der Gemeinde, insgesamt 325 Stück, auf LED umgerüstet. Typische Anwendungsfelder umfassen dabei diverse Anlieger- und Wohnstraßen, mehrere Hauptdurchfahrtsstraßen, den Kurpark der Gemeinde sowie den zentralen Rathausplatz. Durch den Einsatz effizienter LED-Systeme konnte die Gemeinde ihren Energieverbrauch um insgesamt 78.000 kWh im Jahr reduzieren, was gegenüber dem Altzustand einer Reduktion um 63 % entspricht. In den kommenden zehn Jahren wird der Haushalt damit um 150.000 € an Stromkosten entlastet. Zusätzlich kann die Kommune ihre CO₂-Emissionen in diesem Zeitraum um 475 Tonnen senken.

Akzeptanz bei Nutzern, Anwohnern und Bürgern

Kommunale Beleuchtung ist kein Selbstzweck, der mit möglichst geringem Energieeinsatz erledigt werden muss. Vielmehr gestaltet die Außenbeleuchtung einen Raum, in dem Menschen leben, arbeiten und sich erholen. Sie gibt Straßen und Gebäuden ein Gesicht und spiegelt das Selbstverständnis der Bewohner einer Stadt wider. Neben dem Faktor Effizienz ist also die Akzeptanz in der Bevölkerung ein entscheidendes Kriterium für den nachhaltigen Umstieg auf eine neue Lichttechnologie. In allen Projekten des Wettbewerbes ist die Befragung

der Bevölkerung zur Einschätzung und Wahrnehmung der Beleuchtung ein zentraler Bestandteil der wissenschaftlichen Begleitmaßnahmen gewesen. Neben einigen projektspezifischen Besonderheiten wurden in allen Projekten die Bürger nach ihrer Einschätzung insbesondere zur Helligkeit und Gleichmäßigkeit der Beleuchtung, zur Erkennbarkeit von Gegenständen und Personen, zur Lichtstimmung und Lichtfarbe sowie zur subjektiven Gesamteinschätzung der Beleuchtungssituation befragt – und dies jeweils sowohl vor als auch nach der Umrüstung auf LED.

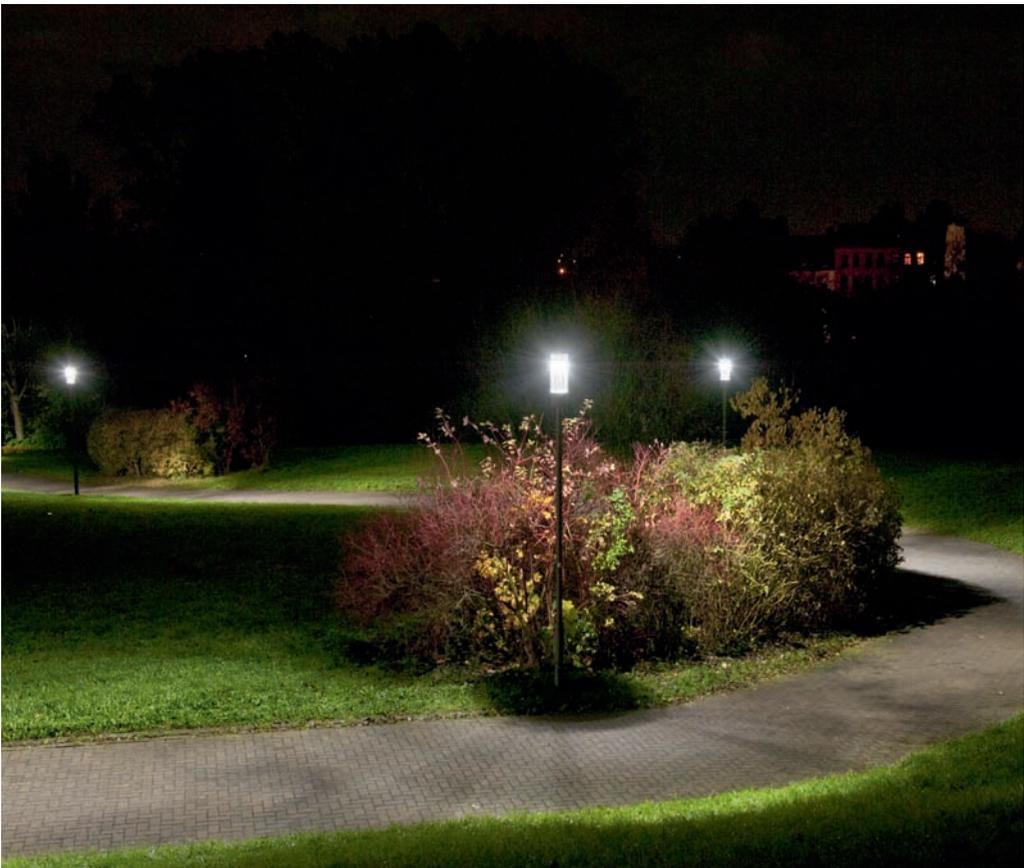


Abbildung 18: LED-Parkbeleuchtung in Görlitz © VDI Technologiezentrum GmbH

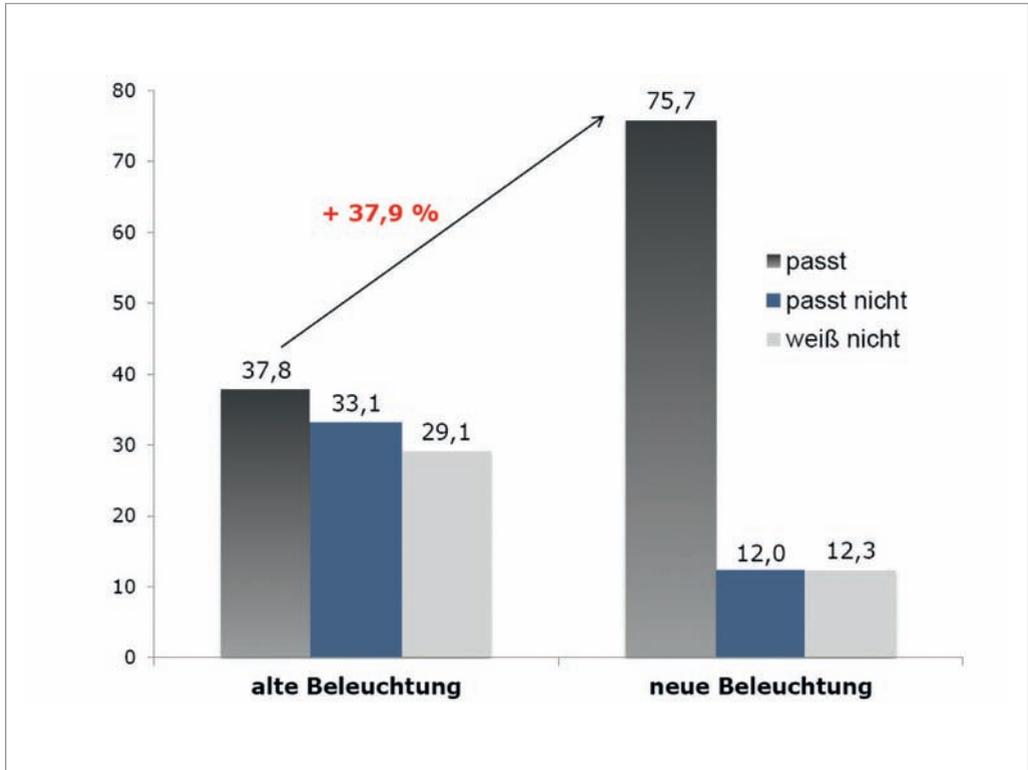


Abbildung 19: Repräsentative Ergebnisse der Akzeptanzuntersuchungen im LED-Netzwerk Schwarzwald © FH Furtwangen

Projektsteckbrief

LED-Netzwerk Schwarzwald

Interkommunales Netzwerk der Kommunen Königsfeld, Mönchsweiler, St. Georgen und Villingen-Schwenningen

- Straßentypen: S4, S5
- Anzahl Lichtpunkte: 839
- realisierte Energieeinsparung
 - absolut: 159.500 kWh pro Jahr
 - relativ: 55%
- besondere Projekthighlights:
 - Vollumstellung der Beleuchtung in der »LED-Gemeinde« Königsfeld

Vergleichbar den Ergebnissen zur Effizienz der LED-Systeme lässt sich trotz aller spezifischer Unterschiede im Detail ein allgemeiner Trend bei der Bewertung der Beleuchtungslösungen durch die Bürger feststellen: Die Altbeleuchtung wird häufig von den Befragten in allen wesentlichen Kriterien als ausreichend empfunden, im unmittelbaren Vergleich allerdings wird **die LED-Beleuchtung als durchweg positiver und als insgesamt bessere Lösung** bewertet. In der Wahrnehmung der Befragten zeigt die LED insbesondere unter den Aspekten Farbtreue, Helligkeits- und Sicherheitsempfinden deutliche Vorteile gegenüber den Altanlagen.

Zur weiteren Diskussion dieser Ergebnisse sei erneut das LED-Netzwerk aus dem Schwarzwald um die Gemeinde Königsfeld beispielhaft erwähnt. In einer repräsentativen

Umfrage durch die Fachhochschule Furtwangen wurden knapp 400 Personen aus den beteiligten Städten und Kommunen zu ihrer Einschätzung der Beleuchtungssituation vor und nach der Umrüstung befragt. Waren gut ein Drittel der Befragten mit dem Gesamteindruck der Beleuchtung vor der Umrüstung zufrieden, so bewerteten 75% der Beteiligten die Beleuchtung nach der Umrüstung auf LED als insgesamt gute Lösung.

Aufgeschlüsselt in unterschiedliche Teilaspekte zeigen die Ergebnisse, dass insbesondere im Bereich des subjektiven Helligkeitsempfindens die Altanlage als eher zu dunkel empfunden, während die LED-Lösung als optimal, sogar leicht zu hell wahrgenommen wird. Ein Trend, der sich in den Resultaten zur Farbwiedergabe und zur Identifikation von Personen und Hindernissen fortsetzt: Auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr

gut) lassen sich vor der Umrüstung Farben und Personen eher schlecht identifizieren (2.4 bzw. 2.8 im Mittel aller Befragten), während dies unter der LED-Beleuchtung von den Bürgern als gut bis sehr gut eingeschätzt wird (4.0 bzw. 4.2 im Mittel aller Befragten). Entsprechend positiv wird auch die Steigerung des subjektiven Sicherheitsempfindens durch die Umrüstung der Altanlagen auf LED bewertet.



Abbildung 20: Straßenszene mit LED-Illumination in Rietberg © Niklas Reiners



04

Innenraumbeleuchtung

Die Innenraumbeleuchtung stellt deutlich andere Anforderungen als die Straßenbeleuchtung. Während auf der Straße hauptsächlich die Erkennbarkeit von Hindernissen und eine gute Orientierung in der Dunkelheit sichergestellt werden muss, spielen in der Innenraumbeleuchtung keinen unmittelbaren andere Qualitätskriterien eine tragende Rolle. Beiden gemein ist dennoch, dass die Beleuchtung möglichst energiesparend und wirtschaftlich sein muss.

Bis vor wenigen Jahren waren höchste Effizienz und gleichzeitig hervorragende Lichtqualität bei LEDs noch ein Widerspruch. LEDs waren entweder hocheffizient bei verminderter Lichtqualität, oder aber erfüllten höchste Ansprüche an die Beleuchtung bei allerdings deutlich geringeren Lichtleistungen. Anwendungen in der Straßenbeleuchtung konnten und können mit diesem Kompromiss gut leben, und die LED konnte sich hier entsprechend schnell gegenüber anderen Technologien etablieren. Hochqualitative Leuchtdioden dagegen hatten es aber aufgrund einer geringeren Effizienz deutlich schwerer, sich in der Allgemeinbeleuchtung gegen hocheffiziente Leuchtstofflampen durchzusetzen und besetzten bis vor kurzem vor allem Nischenanwendungen z.B. in der Akzentbeleuchtung.

Stand heute ist die LED-Technik so weit ausgereift, dass höchste Anforderungen an Lichtqualität und gleichzeitig

hohe Effizienz keinen Widerspruch mehr darstellen. Moderne LEDs stellen in vielen Bereichen eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative zur klassischen Leuchtstofflampe dar, und in der Innenraumbeleuchtung werden in immer mehr Anwendungsgebieten LED-Beleuchtungslösungen verstärkt eingesetzt. Vor allem die günstigen Wartungs- und Betriebskosten sind für die öffentliche Hand oft ausschlaggebend für eine Entscheidung zugunsten einer Lösung mit LED-Beleuchtungssystemen.

Zunächst werden in diesem Abschnitt die rechtlichen Rahmenbedingungen und die Güteigenschaften der Innenbeleuchtung erläutert, wobei diese unabhängig von den verwendeten Lichtquellen gelten. Danach werden als Beispiele erfolgreich umgesetzter LED-Projekte, die im Rahmen der »Kommunen in neuem Licht« gefördert wurden, eine Schulsanierung in Trier und die neue Beleuchtung der Städtischen Galerie im Lenbachhaus in München vorgestellt.

Abbildung 21: LED-Innenraumbeleuchtung aus dem Projekt LED-Saxony © Stadt Görlitz

4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Wie in der Straßenbeleuchtung auch ist die Einhaltung von verschiedenen Mindestanforderungen die Voraussetzung für eine gute Innenraumbeleuchtung. Diese sind als quantitative und qualitative Gütemerkmale festgelegt und in Normen und Regelwerken veröffentlicht. Auf Grund der Vielfalt der Anwendungsfälle sind die der Innenbeleuchtung zugeordneten Regelwerke deutlich komplexer und umfangreicher als in der Außenbeleuchtung.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Innenräume öffentlicher Gebäude gleichzeitig auch Arbeitsstätten sind. Für die Ausstattung der Räumlichkeiten gelten damit durch das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) in Kombination mit der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) bestimmte Anforderungen. Ziel des Arbeitsschutzgesetzes ist es, die Gesundheit aller Beschäftigten durch entsprechende Maßnahmen zu schützen. Die Arbeitsstättenverordnung setzt Zielvorgaben für die Arbeitsräume. Dabei werden neben zahlreichen Kriterien an z.B. die Lüftung und Temperierung der Arbeitsräume und an die innerbetrieblichen Verkehrswege, Türen und Tore, insbesondere auch Mindestanforderungen an die Beleuchtung von Arbeitsstätten fixiert.

Die einzelnen Vorschriften sind in den »Technischen Regeln für Arbeitsstätten« (ASR) konkretisiert. Die für die Beleuchtung relevante Regel ist die ASR A3.4 in der aktuellen Fassung vom April 2011. Die Regel gilt als Stand der Technik der Arbeitsmedizin, der Arbeitshygiene und der arbeitswissenschaftlichen Erkenntnisse für das Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten. Die Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung gelten beim Einhalten der Technischen Regel als erfüllt. Die Nichtanwendung bestimmter Anforderungen kann durch betriebstechnische Besonderheiten begründet werden. In solchen Fällen ist im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung vom Arbeitgeber zu entscheiden, welche Maßnahmen zur Sicherheit und zum Gesundheitsschutz der Beschäftigten durchgeführt werden müssen. Die ASR A3.4 in der aktuellen Fassung beruht auf der berufsgenossenschaftlichen

Regel BGR 131, Teil 2 »Leitfaden zur Planung und zum Betrieb der Beleuchtung« des Fachausschusses »Einwirkungen und arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren« der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung.

Die Regeln stützen sich bei der Festlegung der Gütemerkmale der Beleuchtung sowie der Vorschriften zu den einzuhaltenden Mindest- bzw. Grenzwerten auf die DIN EN 12464 »Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten. Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen«. Diese Norm ist ein wesentlicher Beitrag zur Harmonisierung der bis dahin in Europa teils unterschiedlichen Normen und Empfehlungen im Bereich der künstlichen Beleuchtung und gilt in den CEN-Staaten. In Deutschland hat sie seit 2007 die DIN 5035 Teil 2 »Richtwerte für Arbeitsstätten in Innenräumen und im Freien« abgelöst.

Die ASR A3.4 weicht mit ihren Anforderungen teilweise von der DIN EN 12464-1 ab. Diese legt zwar die Planungsgrundlagen für die Beleuchtungsanlagen fest, berücksichtigt aber die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Beschäftigten nicht.

Weitere Informationsquellen, die eine Erwähnung hier verdienen, sind

- die Broschüre Nr. 114 »Beleuchtung 2011 – Hinweise für die Innenraumbeleuchtung mit künstlichem Licht in öffentlichen Gebäuden«, aufgestellt und herausgegeben vom Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV) beim Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und
- VBG-Fachinformation BGI 856 »Beleuchtung im Büro – Hilfen für die Planung der künstlichen Beleuchtung in Büroräumen«, herausgegeben durch die Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG) mit Unterstützung der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG).

Diese greifen im Wesentlichen wieder auf die BGR 131 und DIN EN 12464-1 zurück. Die Empfehlungen des AMEV sind im Bereich der öffentlichen Verwaltung in



Abbildung 22: Raum mit neutralweißer (links) und warmweißer (rechts) Beleuchtung im direkten Vergleich © TU Darmstadt

der Regel verbindlich, soweit nicht verwaltungsinterne Regelungen wie Erlasse oder Verwaltungsvorschriften Gegenteiliges vorsehen.

Folgende Güteerkmale der Beleuchtung sind in den verschiedenen Regelwerken und Empfehlungen nahezu übereinstimmend definiert und mit Mindest- und Höchstwerten versehen:

Beleuchtungsniveau Das Beleuchtungsniveau hat einen großen Einfluss auf die Sehleistung. Die Beschäftigten müssen unter der gegebenen Beleuchtung ihre Aufgabe auf dem Bildschirm, Papier oder sonstigen Arbeitsmitteln sicher, schnell und ermüdungsfrei erkennen und erledigen können.

Das Beleuchtungsniveau wird hauptsächlich durch die Beleuchtungsstärke E in Lux beschrieben. Die einzuhaltenden Mindestwerte sind in der DIN EN 12464-1 für unterschiedliche Bereiche und Verkehrszonen innerhalb von Gebäuden, industriellen und handwerklichen Tätigkeiten, sowie Ausbildungs- und Gesundheitseinrichtungen festgelegt.

Leuchtdichte Die Leuchtdichte im Gesichtsfeld bestimmt unter anderem den Adaptationszustand der Augen. Eine ausgewogene Adaptationsleuchtdichte wird benötigt um die Sehschärfe, die Kontrastempfindlichkeit und die Leistungsfähigkeit der Augenfunktionen, wie beispielsweise die Akkommodation, zu erhöhen.

Zu hohe Leuchtdichten sollten vermieden werden, da diese Blendung verursachen können. Große Leuchtdichteunterschiede bewirken eine ständige Re-Adaptation der Augen, was mit der Zeit zu einer Ermüdung führt. Sie können auch vom Arbeitsfeld ablenken, da die Aufmerksamkeit auf die Flächen mit höherer Helligkeit konzentriert wird. Zu niedrige Leuchtdichten, aber auch geringe Leuchtdichteunterschiede lassen dagegen eine unattraktive und wenig anregende Umgebung entstehen.

Blendungsbegrenzung Der Grad der Direktblendung, die durch Leuchten, Fenster oder beleuchtete Flächen hervorgerufen wird, wird gemäß der DIN EN 12464-1 durch das UGR-Verfahren (Unified Glare Rating, CIE 117) beurteilt. Die Berechnung erfolgt entweder mit Hilfe von Lichtberechnungsprogrammen oder der UGR-Tabellen, die von Leuchtenherstellern zur Verfügung gestellt werden.

Lichtrichtung Ein Raum und Objekte darin wirken angenehm und natürlich, wenn diese so beleuchtet sind, dass ihre Form und Oberflächenstrukturen erkennbar sind. Um eine gute Körperwiedergabe zu erreichen, sollte ein ausgewogenes Verhältnis zwischen diffuser und gerichteter Beleuchtung sichergestellt werden.

Lichtfarbe und Farbwiedergabe Die Farbeigenschaften einer Lichtquelle werden hauptsächlich durch die Lichtfarbe und die Farbwiedergabe beschrieben.

Welche Lichtfarbe zur Beleuchtung von Räumen verwendet und als angenehm empfunden wird, hängt individuell von der gewünschten Raumwirkung ab. Daher werden in den Normen auch keine Empfehlungen zur Wahl der Lichtfarbe gegeben.

Für die Sehleistung und das Wohlbefinden ist es sehr wichtig, dass die Farben der Umgebung, der Objekte im Raum sowie die menschliche Haut natürlich und wirklichkeitstreu wiedergegeben werden. Auch Sicherheitsfarben und Kennzeichen sollen als solche erkennbar sein. Die Farbwiedergabe wird mit Hilfe des Allgemeinen Farbwiedergabeindex Ra angegeben. Er zeigt an, wie unverfälscht farbige Objekte unter einer bestimmten Lichtquelle dargestellt werden. Der höchstmögliche Wert von $Ra=100$ entspricht dabei einer vollständigen Farbwiedergabe unter natürlichem Licht. Der Ra Wert von Leuchtstofflampen liegt zumeist zwischen 70 bis 95. Mit LEDs können Werte von 75 – 95, in speziellen Fällen (s.u.) sogar bis zu 98 erreicht werden.

5.2 Fallbeispiele aus dem Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht«

Im Rahmen von »Kommunen in neuem Licht« sind zwei Projekte mit dem Schwerpunkt Innenraumbeleuchtung gefördert worden, deren Anforderungen und Zielsetzungen nicht unterschiedlicher hätten sein können, die aber

so einen guten Überblick über die gesamte Bandbreite der Anwendungen ermöglichen. Der erste Fall behandelt die Umrüstung eines Schulzentrums in Trier mit dem Ziel, eine zum Lernen möglichst komfortable und anregende Beleuchtung zu schaffen. Das zweite Projekt umfasst die Beleuchtung von Kunstobjekten im Lenbachhaus in München. Höchstmögliche Lichtqualität und Flexibilität in der Präsentation stehen hier im Vordergrund.

5.2.1 Schulbeleuchtung im Projekt »KomLicht« der Stadt Trier

Die Stadt Trier ist mit der Umrüstung des Schulzentrums Mäusheckerweg im Wettbewerb vertreten. Das Schulzentrum besteht aus Gymnasium, Real- und Grundschule. Das Zentrum wurde zwischen 1975 und 1980 erbaut und wird derzeit von ca. 1400 Schülern besucht.

Ziel des vom BMBF geförderten Projektes war es das komplette Schulzentrum mit LED-Beleuchtung auszustatten: Schulklassen, Flure und Außenanlage. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt. Die Beleuchtung in Fachklassen, Kunst- und Musikräumen bestand vor der Umrüstung aus 38 mm Standardleuchtstofflampen der älteren Generation und konventionellen Vorschaltgeräten in einfachen weißen Rasterleuchten, welche in eine Akustikdecke installiert waren.



Abbildung 23: Schulzentrum am Mäusheckerweg in Trier © Philips GmbH



Abbildung 24: Typische Beleuchtungssituation in einem Klassenraum vor der Umrüstung auf LED © Philips GmbH

Die Erfassung des Altzustandes ergab eine Beleuchtungssituation, die typisch für viele Schulzentren in Deutschland ist. Die Klassenräume waren entweder zu dunkel oder ohne triftigen Grund zu hell beleuchtet. Die Gleichmäßigkeit war sehr niedrig, da die Lampen in den Räumen nicht alle gleichzeitig und in regelmäßigen Abständen gewechselt wurden. In den Räumen wurden Bereiche mit neuen Lampen und unterschiedlich gealterten Lampen sowie Zonen mit ausgefallenen Lampen vorgefunden. Dadurch ergaben sich unterschiedliche Beleuchtungsniveaus und die Räume waren sehr ungleichmäßig ausgeleuchtet. Der Farbwiedergabeindex lag ebenfalls unter dem vorgeschriebenen Mindestwert von 80. Die spezifische elektrische Anschlussleistung in den vermessenen Räumen betrug vor der Umrüstung auf LED zwischen 4,1 und 5,3 W/m²100lx.

Leistung	44,9 W
Lichtstrom	3577 lm
Leuchteneffizienz	79,7 lm/W
Farbwiedergabeindex	82
Farbtemperatur	4000 K

Um einen aussagekräftigen Vergleich zwischen der alten Anlage und der LED-Beleuchtung ziehen zu können, wurde in einigen Räumen die alte Beleuchtung gewartet, d.h. es wurden die Leuchten gereinigt und neue Leuchtstofflampen installiert. Damit wurde ein Soll-Zustand der konventionellen Beleuchtung mit Leuchtstofflampen hergestellt. Die erneute Vermessung der Räume ergab, dass das Beleuchtungsniveau sehr hoch ausgelegt war, was in manchen Fällen sogar zur Überschreitung der Blendungshöchstwerte führte. Die Farbwiedergabe erreichte den Grenzwert und die Anschlussleistung verringerte sich durch die Wartung auf 1,7 bis 3,5 W/m² 100 lx. Die LED-Leuchten für die Umrüstung der Klassen wurden aufgrund der lichttechnischen Messdaten und einer Bemusterung in ausgewählten Klassenräumen definiert. Die wichtigsten Kenndaten der gewählten Leuchte sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Eine detaillierte Lichtplanung, die sowohl die Abstrahlcharakteristik der Leuchte als auch die Geometrie der Klassenräume berücksichtigt, wurde vom Hersteller bereitgestellt. Um eine schnelle und kosteneffiziente Umrüstung zu ermöglichen, wurde darüber hinaus besonders auf die Kompatibilität der Leuchten mit der vorhandenen Infrastruktur geachtet. Die neuen LED-Leuchten konnten also ohne weitere, zusätzliche bauliche Maßnahmen in den Klassen installiert werden.

Das Helligkeitsniveau wurde in den Räumen mit der LED-Beleuchtung mit Hilfe von Helligkeitssensoren exakt auf die geforderten 500 Lux eingestellt und wird im Raum gleichmäßig und konstant gehalten. Eine Blendung ist nicht vorhanden. Das Licht wird in der Tiefe des



Tabelle 7: Kenndaten der LED-Leuchte für die Klassenräume im Schulzentrum »Mäusheckerweg« © TU Darmstadt



Abbildung 25: Typische Beleuchtungssituation in einem Klassenraum nach Umrüstung auf LED inkl. Tafelbeleuchtung und Tageslichtsteuerung © Philips GmbH

Raumes so nachgeregelt, dass sich in Kombination mit dem einfallenden Tageslicht ein homogenes Beleuchtungsniveau ergibt.

Die Anschlussleistung beträgt zwischen 1,6 und 1,9 W/m² 100 lx. Es handelt sich dabei um Maximalwerte während der Dunkelstunden, die im tatsächlichen Betrieb während der Schulzeit, wenn viel natürliches Licht vorhanden ist, nicht abgerufen werden. Die Helligkeitssteuerung hält das Beleuchtungsniveau im Raum

konstant und reduziert dabei automatisch die künstliche Beleuchtung und damit auch die abgerufene Leistung.

In einem Raum mit besonders hohem Anteil an natürlichem Licht konnte der Energieverbrauch und damit die Energiekosten um 90 % reduziert werden. Durch die unterschiedlichen Raumgrößen und -geometrien sowie verschiedenen natürlichen Lichteinfall ergaben sich ansonsten Einsparungen von 60 – 85 % gegenüber dem Altbestand.

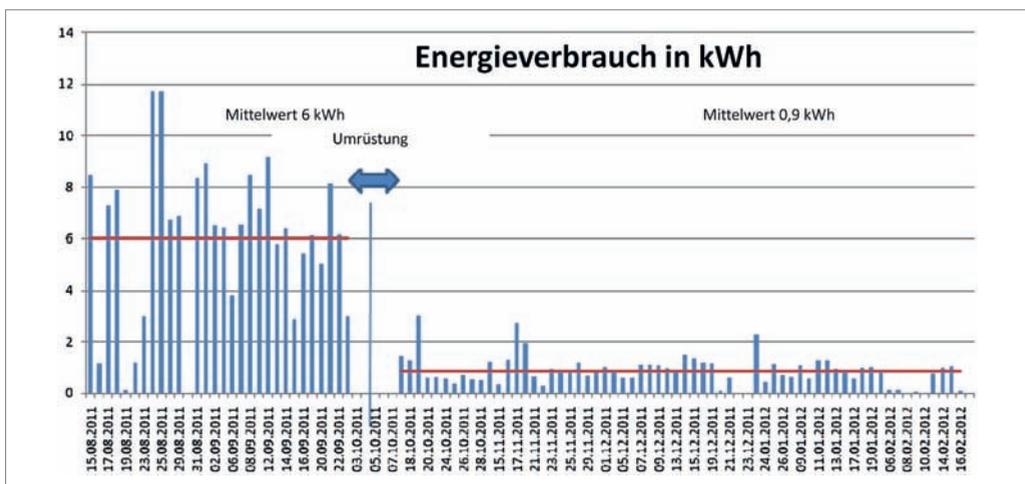


Abbildung 26: Gemessener Energieverbrauch eines exemplarischen Schulraums vor und nach der Umrüstung © FH Trier

	Altanlage	LED-Anlage
Anschlussleistung	1.590 W	244 W
Spezifische Anschlussleistung	23,7 W/m ²	3,6 W/m ²
Energieverbrauch	1.429 kWh/a	155,7 kWh/a

Tabelle 8: Energieverbrauch in einem einzelnen Klassenraum mit einer Größe von 67 m² und Beleuchtungsstärke von 500 Lux

	Altanlage	LED-Anlage
Gesamtenergieverbrauch	162.900 kWh/a	≈ 40.725 kWh/a
Kosten	26.000 €	≈ 6.500 €

Tabelle 9: Energieverbrauch aller Klassenräume im Schulzentrum unter der Berücksichtigung vergleichbarer Betriebszeiten © FH Trier

Auf Basis der gemessenen Werte zum Energieverbrauch, lässt sich der Energieverbrauch pro Betriebsstunde extrapolieren. Dieser Zwischenschritt ist notwendig, weil sich die zugrundeliegenden Messdaten in Bezug auf die Betriebszeiten sehr stark unterscheiden. Dass in einem Raum, der an einem Messtag nur für eine Unterrichtsstunde verwendet wird, weniger (Beleuchtungs-)Energie verbraucht wird, als in einem Raum, der über einen

ganzen Schultag beleuchtet wird, ist trivial und erlaubt noch keine Aussage über die durch die Beleuchtungsart bedingte Energieeinsparung. Erst mit der »Normierung« der verbrauchten Energie auf eine einzelne Betriebsstunde, wird ein Vergleich und damit die Berechnung einer Energieeinsparung aufgrund der Umrüstung der Beleuchtung sinnvoll.

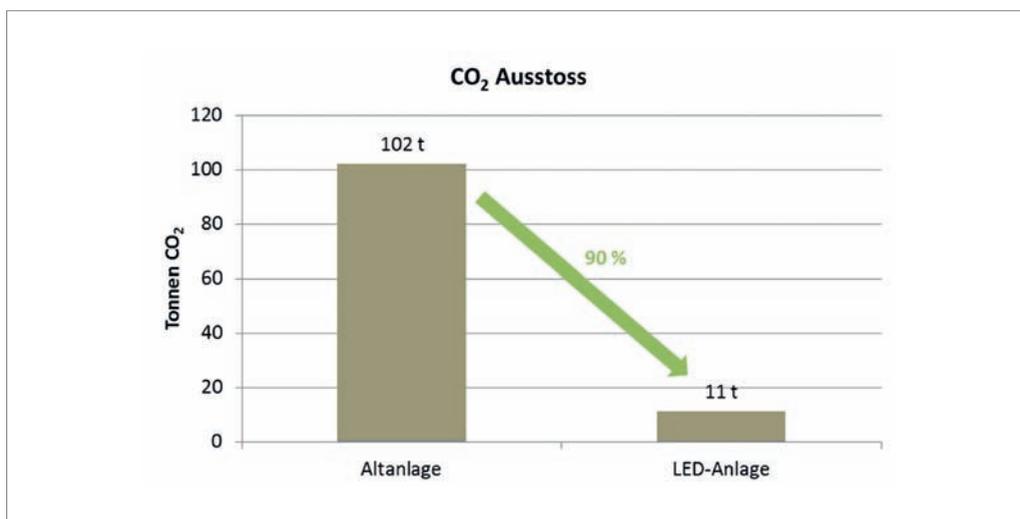


Abbildung 27: Erzielte CO₂-Reduktion durch die Umrüstung des Schulzentrums mit LEDs

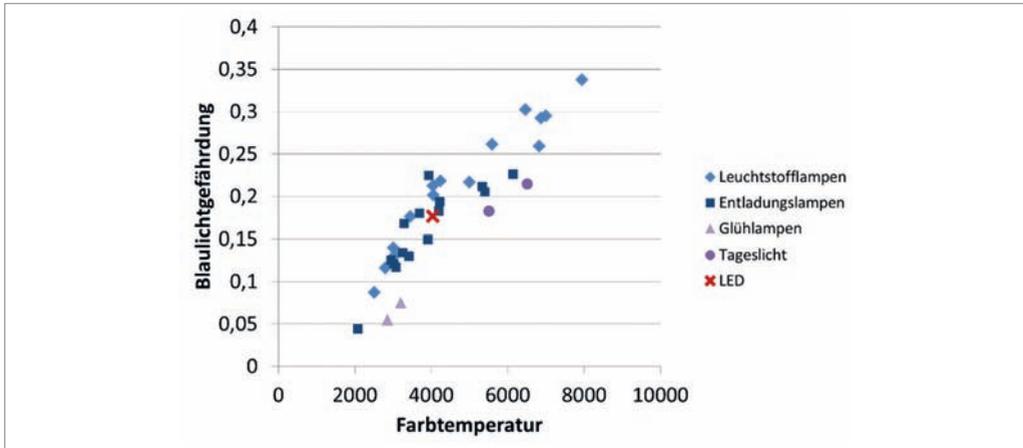


Abbildung 28: Blaulichtgefährdung verschiedener Lichtquellen im Vergleich zu den eingesetzten LEDs © TU Darmstadt

Insgesamt kann von einer Einsparung von **50 %** durch die reine Umrüstung der Beleuchtung ausgegangen werden. Durch die zusätzlichen Einsparungen der Regelungstechnik kann eine **enorme Gesamtersparnis von 75 %** erzielt werden.

Parallel zur lichttechnischen und energetischen Vermessung der Musterräume wurde eine Befragung der Schüler und der Lehrer zur subjektiven Wahrnehmung sowohl der alten als auch der neuen LED-Beleuchtung durchgeführt. Die gewählte LED-Lösung hat durchgehend eine bessere Bewertung als die Altanlage mit den Leuchtstofflampen erhalten. Die Schulangehörigen befanden, dass die Beleuchtungssituation und damit auch das Wohlbefinden insgesamt sich deutlich verbessert haben. Auf einer Skala entsprechend den Schulnoten von 6 (ungenügend) bis 1 (sehr gut) bewerteten die 600 befragten Schüler und 44 befragten Lehrkräfte die alte Beleuchtungsqualität der Altanlagen als befriedigend (Note 2,72 im Mittel aller Befragten), während die neue LED-Beleuchtung als gut bis sehr gut eingeschätzt wurde (Note 1,8 im Mittel aller Befragten). Die automatische Helligkeitssteuerung wird ebenfalls sowohl von den Lehrern als auch den Schülern als angenehm empfunden, sie trägt nach Einschätzung der meisten Befragten zu einer guten und entspannten Arbeits- und Lehrumgebung bei.

Neben dem Wohlbefinden und Gefallen der Beleuchtung ist auch das Thema einer möglichen Gefährdung der Schüler und Lehrer durch die LED-Strahlung von großer Wichtigkeit. Neben möglichen Augenschäden durch die ultraviolette und infrarote Strahlung steht sichtbares, blaues Licht im Verdacht chronische Schäden an der Netzhaut hervorzurufen. Um diese Frage im Vorfeld des Projektes fundiert zu beantworten, wurden unterschiedliche Lampenspektren, inklusive der im Schulzentrum eingesetzten LEDs, mit der spektralen Bewertungsfunktion zur Bewertung der Gefahr für die Netzhautschädigung aus der DIN EN 62471 »Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen« von 2008 bewertet und mit einander verglichen. In der Abbildung 28 sind die einzelnen Werte aufgetragen, wobei alle Lichtquellen zur besseren Vergleichbarkeit auf das gleiche Helligkeitsniveau normiert wurden. Die Gefährdung steigt mit der Farbtemperatur, da kaltweiße Strahlung einen höheren Blauanteil als warmweiße besitzt. Ebenso muss selbstverständlich für eine gute Farbwiedergabe ein blauer Strahlungsanteil vorhanden sein, sonst würden blaue Objekte eben nicht als blau wahrgenommen werden können. **Die LED ist dabei nicht schädlicher als die anderen Lichtquellen** mit gleicher Farbtemperatur.

Erstmals wird mit dem Projekt der Stadt Trier in einem Schulbau die Klassenraumbeleuchtung komplett mit Leuchtdioden und unter Nutzung von Tageslicht- und Anwesenheitssensorik ausgeführt. Bereits in der Testphase gab es ein positives Echo bei Schülern und Lehrern für die Beleuchtungslösungen mit LEDs. Eine absolut innovative und zukunftsorientierte Beleuchtungslösung ist hier vor allem durch die konsequente Beachtung der Qualitätsanforderungen für die Beleuchtungsplanung und die Ausrichtung des Gesamtsystems auf größtmögliche Effizienz geschaffen worden. Auch in Bezug auf die Wartung der Beleuchtungsanlage setzt die Beleuchtungsanlage neue Maßstäbe. Die »Deutsche Energie-Agentur« hat das Schulprojekt in Trier bereits im Jahr 2012 mit dem »Good Practice« Siegel ausgezeichnet.

5.2.2 Museale Beleuchtung in der Städtischen Galerie im Lenbachhaus der Stadt München

Die Städtische Galerie im Lenbachhaus gehört zu den besten kulturellen Adressen Deutschlands. Die Sammlung der Werke aus der Gruppe »Der Blaue Reiter« genießt internationalen Ruhm. Ziel des Demonstrationsprojektes der Stadt München ist es, in diese einmalige Museumsatmosphäre eine neue Beleuchtungsinstallation ausschließlich auf LED-Basis einzubringen.

Die Beleuchtung von Kunst ist eine der anspruchsvollsten Aufgaben in der Beleuchtungstechnik. Historische Kunstwerke entstanden unter dem Licht von Sonne und Kerze. Diese Lichtquellen besitzen eine zwar verschieden gewichtete, aber dennoch lückenlose Verteilung der Spektralanteile. Jede Farbe eines Kunstwerks wurde mit genug Licht versorgt, um einen kontextgetreuen visuellen Eindruck erzeugen zu können. Besonders gesättigte Farben erscheinen unter Licht mit isolierten Spektrallinien zu wenig von den gedeckten Farben differenziert, da manche Farbstoffe gar nicht angeregt werden. Die moderne Museumsbeleuchtung muss aber das Originalbild möglichst natürlich darstellen können. Die bisherigen Leuchtstofflampen können dies nur zum Teil oder mit hohen Effizienzeinbußen leisten. Der Einsatz von Leuchtdioden erlaubt es erstmals, ein gleichmäßiges Spektrum aus mehreren Lichtfarben zusammenzusetzen, in dem es (nahezu) keine Lücken gibt, und trotzdem einen guten Wirkungsgrad zu erzielen. Museumsbesucher finden so einen gleichbleibend hochwertigen Farbeindruck vor.

Der Einsatz in Museen stellt eine besondere Herausforderung für die LED dar, aber auch eine Chance, die vielfältigen Möglichkeiten der neuen Technik aufzuzeigen und zu nutzen. Neben der besonders guten



Abbildung 29: Vision des Neuen Lenbachhaus inkl. Erweiterungsbau © Foster und Partner

Farbwiedergabe des weißen Lichts, bieten LEDs auch die Möglichkeit, gesättigte Farben oder beliebige Farbstimmungen auf Knopfdruck bereit zu stellen. So kann das Licht auf die spezifische Farbigkeit der Werke einzelner Künstler, Kunstrichtungen und auch Epochen individuell abgestimmt werden. Die Einstellung einer neuen Lichtstimmung erfolgt per Knopfdruck innerhalb von Sekundenbruchteilen. Ein Leuchtenwechsel – bisher gängige Praxis in der musealen Beleuchtung – ist nicht mehr erforderlich, wodurch in der Vorbereitung einer Ausstellung signifikant Zeit und Geld gespart werden können. Teure Lampenwechsel während der Ausstellung, bei denen zusätzlich die Kunstwerke entfernt werden müssen, entfallen wegen der hohen Lebensdauer der LEDs ganz.

Mit der Generalsanierung der Galerie im Lenbachhaus der Landeshauptstadt München entstehen kleine museale Räume (Kabinette), die mit jeweils unterschiedlichen Lichtsystemen ausgestattet werden. In den Altbau-bereichen sind es die umlaufenden **Voutenleuchten**, die von der Wandseite Licht an die Decke werfen. Des Weiteren sind **Lichtdecken** geplant, die je Raumgröße aus drei bis fünf Lichtfeldern bestehen. Im obersten Geschoss sind zur Beleuchtung mit Tageslicht nordgerichtete **Shedleuchten** vorgesehen. Die Reflexionsfläche des Shed für Tageslicht wird auch als Reflexionsfläche für das Kunstlicht benutzt. Damit lässt sich fast unmerklich Tageslicht mit Kunstlicht mischen. Bei allen drei Systemen entsteht ein museales Allgemeinlicht, das den gesamten Raum in Licht taucht und somit eine blend- und schattenfreie Beleuchtung für die Exponate bietet.

Mit der vollständigen Nutzung der LED innerhalb des Neuen Lenbachhauses setzt die Stadt München völlig neue Maßstäbe in der musealen Beleuchtung:

- Vollständige Helligkeitssteuerung mit kontrollierter Farbanpassung;
- Farbtemperatur zwischen 2800K und 6000K frei einstellbar zur Gestaltung differenzierter Licht-Atmosphären und Darstellung von Kunstwerken verschiedener Epochen;

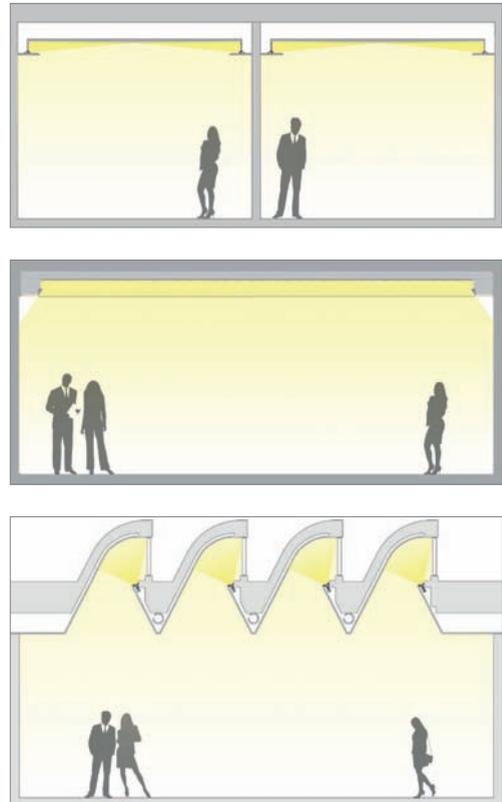


Abbildung 30: Skizzen der drei geplanten Leuchtentypen: Voute (oben), Lichtdecke (Mitte) und Shed (unten) © Städtische Galerie im Lenbachhaus der Stadt München

- Gestaltung unterschiedlicher Lichtmilieus und definierter Lichtstimmungen mit gleichzeitig höchster Farbwiedergabe;
- Optimales Zusammenspiel zwischen natürlichem und künstlichem Licht ohne Schatten oder Streifenbildung;
- Absolut flimmerfreie Beleuchtung;
- Höchster konservatorischer Schutz, nahezu vollständige Unterdrückung von IR- und UV-Strahlung;
- Kompakte Bauform und hohe Lebensdauer;
- Effiziente Beleuchtung mit mindestens 30 % Energieeinsparung.

Zur Umsetzung dieser in der Summe äußerst ambitionierten Ziele wurden die unterschiedlichen Leuchtentypen vor der Umrüstung des Museums zunächst in drei eigens dafür aufgebauten Musterräumen begutachtet. Das in diesen Musterräumen erarbeitete Leuchtenkonzept besteht aus LED Modulen mit jeweils 10 weißen und farbigen, individuell steuerbaren Einzel-LEDs. Sämtliche Leuchten wurden umfassend lichttechnisch charakterisiert, um die Einhaltung der vorgegebenen Kriterien zu kontrollieren. Die Ergebnisse überzeugen sowohl die Fachleute aus der Lichttechnik, als auch aus der Museumswelt. Mit den so aufgebauten Leuchten können über eine interaktive Steuerung unterschiedlichste Lichtstimmungen erzeugt werden. Das Spektrum reicht (nahezu) stufenlos vom warm- ins kaltweiße mit frei einstellbaren Farbtemperaturen zwischen 2.800K und 6.000K. Entscheidend dabei ist, dass für sämtliche Einstellungen höchste Farbwiedergabewerte mit einem CRI > 90 sichergestellt werden. Dazu wurden im Rahmen des Projektes mehrere zehntausend Datensätze zur

individuellen Ansteuerung der Einzel-LEDs vermessen und aufgenommen.

Neben der Darstellung unterschiedlichster Weißtöne erlaubt das Beleuchtungssystem im Neuen Lenbachhaus selbstverständlich auch das Einstellen beliebiger, gesättigter Farben – natürlich zu Lasten der Farbwiedergabe. Insgesamt ermöglicht das LED-System dem Museum die **freie Konfiguration einer beliebigen farbigen oder weißen Beleuchtungssituation**. Ein absolutes Novum in der internationalen Museumslandschaft, das international neue Maßstäbe bei der Darstellung und Präsentation von Kunstwerken setzt.

Ein ebenfalls sehr kritisches Thema bei der Museumsbeleuchtung ist der Erhalt und Schutz der Kunstgegenstände gegen schädigende Einflüsse. Es ist bekannt, dass vor allem energiereiches, blaues Licht die Farben eines Gemäldes ausbleicht und damit die Kunstwerke schädigt. Insbesondere weiße LEDs, die auf einem blauen LED-Chip basieren und die auch im Lenbachhaus zur Anwendung kommen, stehen immer wieder im Verdacht, besonders schädlich zu sein. Sämtliche konservatorischen Aspekte wurden im Vorfeld der Umrüstung auf die LED daher eingehend untersucht.

Die Grundlage für die Diskussion des Schädigungspotentials jeder Art von künstlicher Beleuchtung stellt der aktuelle CIE-Report Nr. 157 »Control of damage to museum objects by optical radiation« dar. Entsprechend der Vorgaben wurden für die im Museum gemessenen Lichtspektren bei unterschiedlichen Farbtemperaturen die zugeordneten Schädigungspotentiale kalkuliert und vermessen. Zum Vergleich wurden diese auch für unterschiedliche Spektren von Leuchtstoff-, Entladungs- und Glühlampen unterschiedlicher Farbtemperatur und Farbwiedergabe bestimmt. Diese Lichtquellen besitzen üblicherweise einen hohen ultravioletten und infraroten spektralen Anteil, der bei Anwendungen in Museen mit entsprechenden Filtern stark reduziert wird. Beim Vergleich der verschiedenen Lichtquellen wurde der Effekt dieser Filterung entsprechend berücksichtigt, um so eine möglichst praxisnahe Analyse zu erhalten.



Abbildung 31: Typische Beleuchtungssituation mit LED im neuem Lenbachhaus © Städtische Galerie im Lenbachhaus der Stadt München

Dimmbarkeit (frei einstellbar)	0 – 500 Lux
Farbtemperatur	2.800 – 6.000 Kelvin
Farbwiedergabe	91 – 96, je nach Farbtemperatur
Energieersparnis (gegenüber Anschlussleistung Altbestand)	20 – 60 %
Einstellen von beliebigen (gesättigten) Farben	unbegrenzt möglich

Tabelle 10: Kenndaten der neuen Museumsbeleuchtung

Das Ergebnis dieser Analyse ist eindeutig: Im Vergleich mit konventionellen Leuchtmitteln lässt sich **kein erhöhtes Schädigungspotential** der im Lenbachhaus verwendeten LED-Systeme nachweisen. Bei allen relevanten Farbtemperaturen weist die LED-Lösung ein geringeres Potential zur Schädigung der Farbpigmente in den Kunstwerken als die untersuchten und in vielen Museen verwendeten Leuchtstoff- oder Entladungslampen auf. Auch unter konservatorischen Aspekten stellt die LED damit eine bevorzugte Alternative zur Ausleuchtung und Darstellung einmaliger Kunstgegenstände dar.

Innerhalb der Sanierungs- und Erweiterungsmaßnahmen wurde im Münchner Lenbachhaus die LED-Technik zu einem integralen Bestandteil des Beleuchtungskonzepts.

Den individuellen Anforderungen eines Museums mit verschiedenen und regelmäßig wechselnden Ausstellungen bietet die LED-Technik völlig neue und einzigartige Lösungen. Ohne aufwändige Umrüstungen lassen sich mit der LED verschiedenste Lichtstimmungen und Atmosphären unmittelbar einstellen – und das bei garantiert höchsten Ansprüchen an Farbwahrnehmung und Darstellung. Auch aus konservatorischer Sicht stellt die LED die bevorzugte Lösung zur Beleuchtung der Kunstwerke in der Städtischen Galerie dar. Die installierten Lösungen belasten die wertvollen Gemälde und Ausstellungstücke im Lenbachhaus signifikant weniger stark als konventionelle Leuchtstoff- und Entladungslampen.

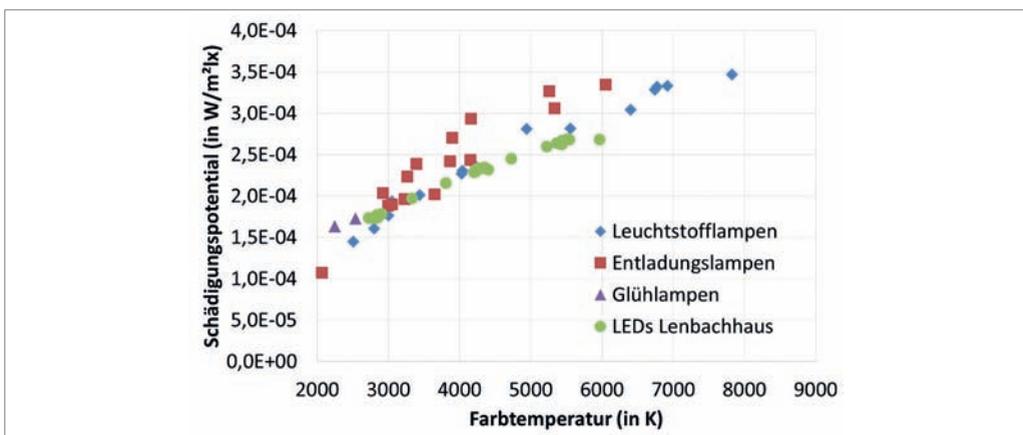


Abbildung 32: Vergleich der Schädigungspotentiale unterschiedlicher Lichtquellen mit den im Lenbachhaus eingesetzten LEDs
© TU Darmstadt

05

Zusammenfassung

Mit dem Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht« hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in den letzten zweieinhalb Jahren zehn Städte und Gemeinden bei der Realisierung ihrer Konzepte zur Demonstration der Leistungsfähigkeit der LED-Technologie in der kommunalen Praxis gefördert. Damit ist erstmals eine umfassende empirische Erfahrungsbasis zur Anwendung der neuen Technik in der kommunalen Praxis geschaffen worden. Auf dieses Fundament können deutsche Kommunen zukünftig bei der Planung und Umsetzung eigener Projekte aufbauen.

Um dies zu gewährleisten, werden mit dem Projekt »EvalKomm«, in dessen Rahmen der vorliegende Praxisbericht entstanden ist, alle zehn Demonstrationsprojekte unter einheitlichen Maßstäben und Rahmenbedingungen unabhängig und wissenschaftlich fundiert evaluiert. Zum Start des Wettbewerbes im Jahr 2009 stand der LED-Technik eine breite, flächendeckende Markteinführung noch bevor. Viele Fragen zur Praxistauglichkeit, zur Effizienz der neuen Technologie außerhalb von Laborresultaten sowie zur Akzeptanz des neuen Lichtes bei Anwendern und Nutzern waren noch nicht abschließend geklärt, was für die Diffusion der LED in die Anwendung eine signifikant hohe Hürde darstellte.

Abbildung 33: Demianiplatz mit Kaisertrutz in Görlitz
© Stadt Görlitz

Das Spektrum der zehn Wettbewerbsprojekte deckt in seiner Vielfalt einen Großteil kommunaler Beleuchtungsaufgaben ab. Die Aufgabenstellung der Projekte reicht dabei von der Straßen- und Architekturbeleuchtung bis zur Beleuchtung von Schulklassen und Ausstellungsräumen in Museen. Unabhängig aller projektspezifischer Eigenheiten belegt die übergreifende Evaluierung der Projekte einige wesentliche Aspekte zur Anwendung der LED-Technologie von übergeordneter Bedeutung.

Die Ergebnisse der Projekte des Wettbewerbes »Kommunen in neuem Licht« zeigen:

- Die LED-Technologie stellt für die meisten Anwendungsfälle kommunaler Beleuchtung heute eine **technologisch ausgereifte Alternative** zu konventionellen Leuchtmitteln dar. In allen Projekten des Wettbewerbes konnten sowohl in der Straßen- als auch in der Innenbeleuchtung LED-Lösungen realisiert

werden, die in ihren lichttechnischen Eigenschaften deutlich über die Möglichkeiten konventioneller Leuchtmittel hinausgehen.

- Durch die Umrüstung auf LED wird der Energieverbrauch für die Beleuchtung signifikant reduziert. Die Ergebnisse der unabhängigen Evaluierung belegen für alle Projekte, unabhängig von den spezifischen Eigenheiten und Zielstellungen, eine **Steigerung der Energieeffizienz von mindestens 50 %** sowohl in der Außen- als auch in der Innenbeleuchtung. Durch die Kombination der reinen LED-Komponenten mit zusätzlichen intelligenten Steuerungselementen kann die Systemeffizienz der Beleuchtungslösungen weiter gesteigert werden. Abhängig von der spezifischen Anwendung sind in diesem Fall sogar Energieeinsparungen von 75 % belegbar.
- Die Umrüstung der Beleuchtungsanlagen auf LED und die Realisierung der oben dargestellten Energieeinsparung erfordert **keine zusätzlichen Investitionen in die Infrastruktur**. Bei der Umstellung auf die neue Technologie kann kosteneffizient und modular auf die vorhandene Bausubstanz aufgesetzt werden.
- Die LED-Technologie ermöglicht eine auf die jeweilige Situation abgestimmte Lichtplanung. In allen Projekten des Wettbewerbes konnte so die **Qualität der Beleuchtung signifikant verbessert** werden. Unabhängig vom Altzustand lässt sich in allen Anwendungssituationen eine normgerechte Beleuchtungslösung realisieren.
- Sämtliche Projekte belegen eine **hohe Nutzerakzeptanz in der Bevölkerung** für die neue LED-Technologie. Im Vergleich mit der konventionellen Technik wird die LED durchgehend als bevorzugte Lösung insbesondere in Hinblick auf Farbtreue, Helligkeits- und Sicherheitsempfinden bewertet.

Seit dem Beginn des Wettbewerbes »Kommunen in neuem Licht« vor vier Jahren konnte sich die LED in der Wahrnehmung kommunaler Entscheider – auch durch das Beispiel der zehn Wettbewerbsprojekte – als ökologisch sinnvolle und ökonomisch vorteilhafte Technologie für Anwendungen in der Innen- und Außenbeleuchtung etablieren. Die Basis für eine umfassende Nutzung dieser Technologie ist damit gelegt. Jetzt muss das volkswirtschaftliche Potential, das die LED für die erfolgreiche Umsetzung und Ausgestaltung der Energiewende nachweislich bietet, zügig genutzt werden.

Im Rahmen der LED-Leitmarktinitiative der Bundesregierung haben aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und das Ministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) die Aufgabe übernommen, die Überführung der LED in die flächendeckende Anwendung zu forcieren und zu fördern. Auf diesem Weg soll und wird der vorliegende Praxisbericht aus dem Wettbewerb »Kommunen in neuem Licht« eine wichtige Entscheidungshilfe bei der Planung und Umsetzung neuer, effizienter LED-Projekte darstellen.

