

Straßenbeleuchtung mit LEDs und konventionellen Lichtquellen im Vergleich – Eine licht- und wahrnehmungstechnische Analyse aus einer wissenschaftlich begleiteten Teststraße in Darmstadt

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Schiller, Dipl.-Ing. Thomas Kuhn, Dipl.-Ing. Marvin Böll, Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik

1. Einleitung

Derzeit wird weltweit eine intensive Diskussion über den Klimawandel, die globale Erwärmung und die Lösungsansätze zur Verminderung der CO₂-Emissionen geführt. Das Bewusstsein und der Wille zur Erhaltung und Schonung der Umwelt bestimmen mittlerweile das Handeln in der Politik, in der Industrie sowie im täglichen gesellschaftlichen Leben. Große Potentiale zur Energieeinsparung werden in der Innenraumbeleuchtung, in der Außenbeleuchtung und in der automobilen Lichttechnik gesehen. Innerhalb der Außenbeleuchtung bietet die Straßenbeleuchtung sehr vielversprechende Einsparmöglichkeiten. Die gilt für Deutschland ebenso wie für den Großteil aller weiteren Industrienationen. Die Potentiale für Europa können am Beispiel der Schweiz wie folgt beschrieben werden:

- Laut einer Studie der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz im Auftrag des WWF hat die Mehrzahl der Kantonshauptstädte in der Schweiz einen im Vergleich zu anderen europäischen Ländern sehr hohen jährlichen Energieverbrauch pro Kilometer beleuchteter Straße [1]. Abbildung 1 zeigt, dass die Werte des Energieverbrauchs von einer energiesparsamen Stadt wie St. Gallen mit 8 MWh/(km·a) und einer Stadt wie Genf mit 37 MWh/(km·a) um den Faktor 4 bis 5 auseinander liegen. Diese Bilanzen sind höchstbedenklich, da die meisten technischen Leuchten für die Beleuchtungskategorie S4, die am Deutschen Bundeswettbewerb „Energieeffiziente Stadtbeleuchtung“ im Herbst 2008 teilgenommen haben, einen Energieverbrauch zwischen 2,5 MWh/(km·a) und etwa 7,8 MWh/(km·a) aufweisen [2]. Der von der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz empfohlene Richtwert liegt hingegen bei 8 MWh/(km·a) für kleinere Gemeinden und bei 12 MWh/(km·a) für größere Städte.

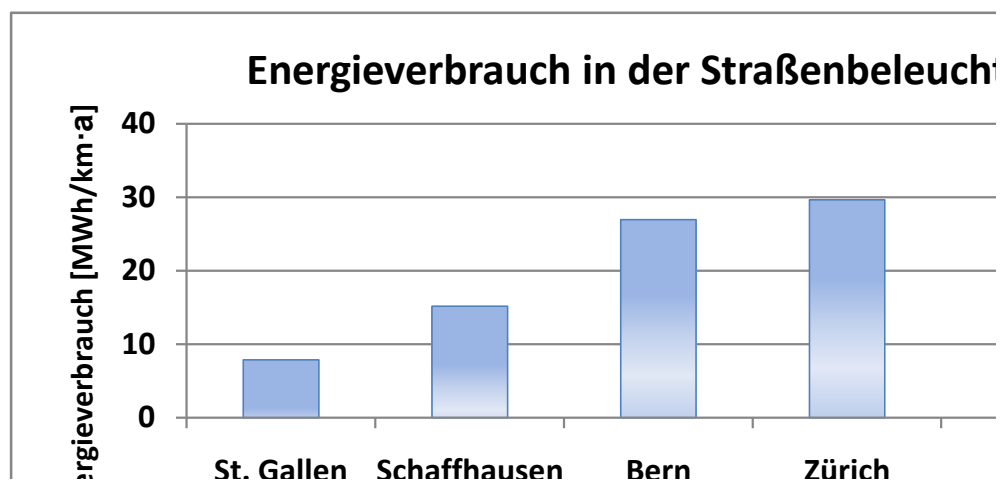


Abbildung 1: Energieverbrauch einiger Kantonsstädte in der Schweiz nach [1]

- Die Beleuchtung benötigt weltweit etwa 2,35 % der produzierten Primärenergie und macht etwa 19 % der gesamten elektrischen Energie aus (s. Abbildung 2). Das entspricht 2700 TWh pro Jahr. Bei einem geschätzten Energiepreis von 15 Cent pro kWh berechnen sich die jährlichen Stromkosten der Welt zu einer Summe von 405 Milliarden Euro. In Deutschland werden jährlich bis zu 4 Mrd. kWh an Strom für die Beleuchtung von Straßen, Plätzen und Brücken verbraucht und etwa eine Summe von 760 Millionen Euro dafür ausgegeben. Dadurch werden jährlich über 2 Millionen Tonnen CO₂ ausgestoßen [3].

Beleuchtung entspricht 19% des weltweiten Stromverbrauchs

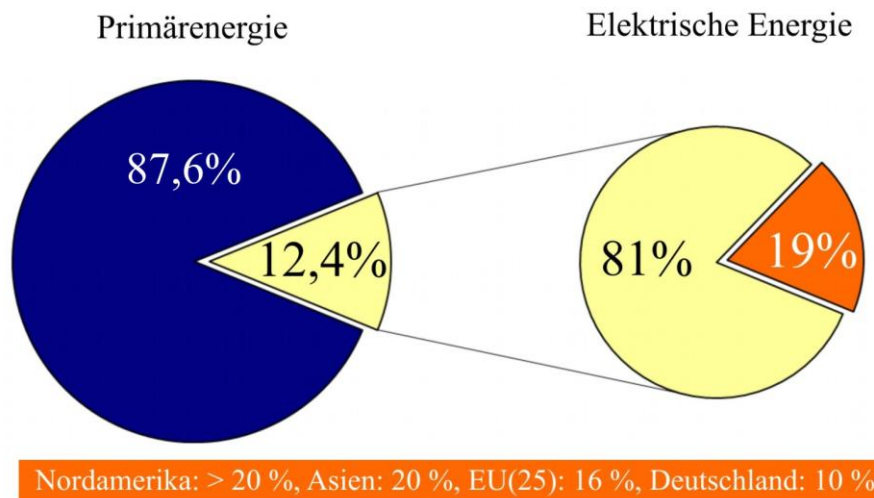


Abbildung 2: Weltweiter Stromverbrauch von Beleuchtungsanlagen nach [5]

- In Deutschland gibt es etwa 9,1 Millionen Straßenleuchten, von denen ein Drittel älter als 30 Jahre ist und veraltete ineffiziente Lichttechnologien verwendet. Etwa 35% bis 40% aller Leuchten werden noch mit Quecksilberdampfhochdrucklampen betrieben. Diese erhalten ab 2015 infolge ihrer geringen Lichtausbeute im Bereich der Europäischen Union kein CE-Zeichen mehr und dürfen deshalb nicht mehr vertrieben werden. Das Einsparpotential für die Kommunen liegt bei ca. 400 Millionen Euro pro Jahr [4].

Auf der Suche nach Lösungsansätzen zur Energieeinsparung müssen die meisten europäischen Länder eine Reihe von Fragestellungen beantworten:

- Welche Lampentechnologien sollte man verwenden, wenn die Quecksilberdampfhochdrucklampen demnächst vom Markt genommen werden? Ist die LED-Leuchtentechnologie reif für eine breite Anwendung oder sollte man die heute verfügbare konventionelle Leuchten- und Lampentechnologie weiterhin verwenden, bis die LED-Leuchtentechnologie eine zuverlässige und langzeitstabile Technologie sein wird?
- Ist die Natriumdampfhochdrucklampe wegen der schlechten Farbwiedergabe (R_a -Werte um 20-25) für eine attraktive und verkehrssichere Beleuchtung einer modernen Stadt im 21. Jahrhundert geeignet? Sind Halogenmetaldampflampen mit einer Lebensdauer von

12000 Stunden bzw. 3 Jahren und dem im Vergleich zu Natriumdampfhochdrucklampen höheren Anschaffungskosten ökonomisch vertretbar?

- Wie hoch ist das zusätzliche Einsparpotential, wenn eine moderne Freiform-Reflektoroptik und elektronische Vorschaltgeräte verwendet werden?
- Ist das weiße Licht von LED-Leuchten bezüglich der Wahrnehmung der Lichtfarben (warmweiß, neutralweiß oder tageslichtweiß), der Farbwiedergabe, der Detektierbarkeit von Objekten und der Akzeptanz in der Wahrnehmung das Licht der Zukunft?

Um diese Fragen praxisnah und konkret beantworten zu können, befasste sich das Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt in einem Feldtest auf einer realen Teststraße mit dem Vergleich der verschiedenen Technologien. Nachfolgend werden ausgewählte Teile der gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassend beschrieben.

2. Teststraße - lichttechnische Ausführungen und Testergebnisse

2.1. Beschreibung der Teststraße

Die ausgewählte Teststraße ist eine gerade Anliegerstraße mit einer Länge von ca. 500 m. Für den Vergleich der verschiedenen Beleuchtungstechnologien wurde die Teststraße in vier lichttechnische Teilabschnitte eingeteilt (s. Abb. 3). Für jeden der vier Abschnitte wurde zwischen zwei Lichtpunkten ein Messfeld M definiert, welches für die lichttechnischen Messungen verwendet wurde.



Abbildung 3: Einteilung der vier Teilabschnitte der Teststraße

Abbildung 4 zeigt das Foto eines Ausschnittes der Teststraße nach der Umrüstung der einzelnen Lichtpunkte. Rechts im Bild ist noch eine Leuchte mit Quecksilberdampfhochdrucklampe zu sehen (Abschnitt 1). Weiter links folgen 2 Abschnitte mit unterschiedlichen Natriumdampfhochdrucklampen und ganz hinten im Bild ist in weiß die LED-Beleuchtung zu erkennen (Abschnitt 4).



Abbildung 4: Foto der Teststraße in der Nacht (Ausschnitt); Abschnitte von links nach rechts: LED, HST, SON-H, HME

Nach einer detaillierten Analyse der Verkehrssituation und aller weiteren relevanten Parameter vor Ort wurde die Straße gemäß DIN EN 13201 in die Beleuchtungskategorie S4 eingestuft. Diese Klasse setzt eine mittlere Beleuchtungsstärke von 5 lx auf der Fahrbahn voraus. Die vier Teilabschnitte haben eine leicht voneinander abweichende Geometrie (

Tabelle 1). In der derzeitigen Straßenbeleuchtung ist dies häufig vorzufinden. Für einen fairen Vergleich müssen die Messergebnisse auf eine einheitliche Geometrie umgerechnet werden (s. Abschnitt 2.2).

Tabelle 1: Geometrie der vier Teilabschnitte der LED-Teststraße in Darmstadt

| Messfeldnummer | Mastabstand [m] | Fahrbahnbreite [m] | Lichtpunkthöhe [m] | L [lx] |
|----------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------|
| 1 | 35,13 | 6,7 | 6,3 | - |
| 2 | 34,86 | 6,72 | 6 | - |
| 3 | 34,59 | 6,73 | 6,14 | 0 |
| 4 | 29,3 | 6,5 | ca. 6,14 | - |

Im Urzustand wurde die Straße mit elf Jahre alten Kofferleuchten beleuchtet, die mit 80 W Quecksilberdampfhochdrucklampen (HME) bestückt waren. Diese Beleuchtung erfüllte in den vier Messfeldern im besten Fall die Beleuchtungsklasse S6 mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von max. 3 lx. Die Beleuchtungsklasse S4, die nach heutigen Kriterien der DIN EN 13201 erforderlich wäre, wurde im Urzustand in keinem der vier Abschnitte erfüllt. Abbildung 5 zeigt die gemessenen mittleren Beleuchtungsstärken der Messfelder M1-M4 der vier Abschnitte im Urzustand der Teststraße sowie die entsprechenden Einteilungen der Klassen S4-S6 gemäß DIN EN 13201.

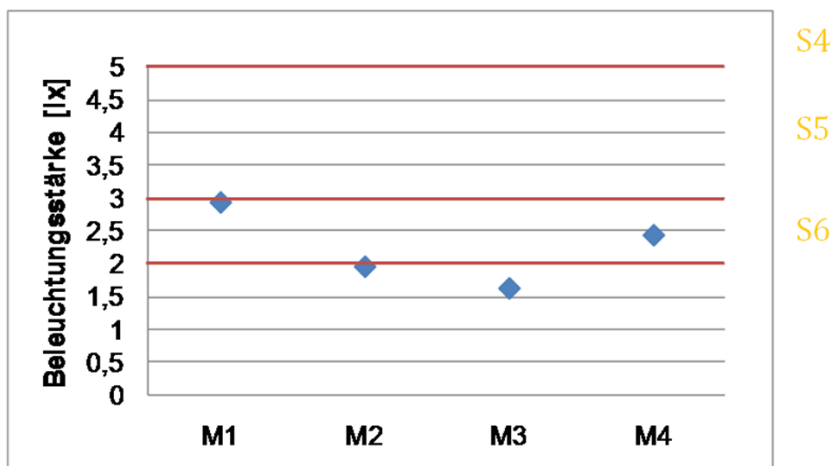


Abbildung 5: Lichttechnische Klassenzuordnung der 4 Teilabschnitte im Urzustand gemäß DIN EN 13201

2.2.Umrüstung: Labor- und Feldtestergebnisse

Für die Tests wurden für die vier Teilabschnitte unter Erfüllung der Beleuchtungsklasse S4 unterschiedliche Beleuchtungstechnologien eingesetzt. Die Reihenfolge der verwendeten Technologien entspricht einer heute üblichen Praxis in der Modernisierung der Straßenbeleuchtungstechnik:

1. Teilabschnitt: Alte Kofferleuchten mit HME (Quecksilberdampfhochdrucklampen) 125 W und KVG (konventionelles induktives Vorschaltgerät); die 125 W-HME-Lampen sind notwendig, um die S4-Klasse zu erfüllen; mit 80W HME ist dies nicht erreichbar
2. Teilabschnitt: Alte Kofferleuchten mit Natriumdampfhochdrucklampe SON-H 68 W (Austauschleuchtmittel) und KVG
3. Teilabschnitt: Neue Leuchte nach dem „Stand der Technik“ mit neuer Optik und HST-Lampe 70W (Natriumdampfhochdruck) und EVG (dimmbares elektronisches Vorschaltgerät)
4. Teilabschnitt: LED-Leuchten Typ DL10, dimmbare Elektronik

Alle verwendeten Straßenleuchten wurden sowohl vor der Umrüstung (Urzustand), als auch nach der Umrüstung im Labor mit einem Goniophotometer auf ihre lichttechnischen und elektrischen Parameter vermessen. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Vermessungen. Dabei ist zu erkennen, dass ein Wechsel von einer unsauberen Leuchte mit einer alten 80 W HME-Lampe zu einer geputzten Leuchte mit einer neuen HME-Lampe eine Steigerung des Lichtstroms und der Lichtausbeute um Faktor 1,74 (24,2 lm/W zu 13,9 lm/W) mit sich bringt. Ein Vertreter vom Stand der Technik mit konventioneller Beleuchtungstechnologie (Typ SR50 für den 3. Teilabschnitt) liefert mit einer Facettenformoptik und einem elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) eine Effizienz von 69,6 lm/W. Die entspricht dem Faktor 2,87 gegenüber der Effizienz der geputzten Kofferleuchte mit einer sauberen HME-Lampe von 24,2 lm/W. Die DL10-Leuchte mit LED-Technologie liefert eine Effizienz von 48 lm/W.

Tabelle 2: Ergebnisse der Vermessung der Leuchten im Labor

| Zustand | Leuchte | Lampe | Lichtstrom der Leuchte | Leistung | Effizienz |
|------------|-------------------------|----------------------|------------------------|--------------|-----------|
| Urzustand | Schmutziger Koffer, KVG | HRL 80 W (gebraucht) | 1290 lm | 93,0 W | 13,9 lm/W |
| | Geputzter Koffer, KVG | HME 80 W (neu) | 2270 lm | 93,7 W | 24,2 lm/W |
| Messfeld 1 | Geputzter Koffer, KVG | HME 125 W | 4040 lm | 145,7 W | 27,7 lm/W |
| Messfeld 2 | Geputzter Koffer, KVG | SON-H 68 W | 3520 lm | 84,0 W | 41,9 lm/W |
| Messfeld 3 | SR50, EVG | HST 70 W | 0 bis 5520 lm | 0 bis 79,3 W | 69,6 lm/W |
| Messfeld 4 | DL10, EVG | LED | 0 bis 5700 lm | 0 bis 121 W | 48 lm/W |

Nach der Installation der jeweiligen Leuchten in den vier Teilabschnitten wurden die Beleuchtungsstärke (S-Klasse) auf der Fahrbahn sowie die elektrische Leistung der Leuchten im jeweiligen Abschnitt gemessen. Da die vier Teilabschnitte leicht unterschiedliche Geometrie haben (s.

Tabelle 1), werden die messtechnischen Ergebnisse auf die gleiche Geometrie aller 4 Teilabschnitte rechnerisch korrigiert. Tabelle 3 zeigt den zusammenfassenden Überblick.

Tabelle 3: Elektrische Leistungsaufnahme der Leuchten für die Erfüllung der Beleuchtungs-kategorie S4

| Lampe | Mittlere Beleuchtungsstärke | Leistung der Leuchte |
|-----------------|-----------------------------|----------------------|
| HME 125 W, KVG | 5,4 lx | 134,2 W |
| SON-H 68 W, KVG | 6,3 lx | 80,0 W |
| HST 70 W, EVG | 6,3 lx | 60,8 W |
| LED, EVG | 6,3 lx | 68 W |

Wie Tabelle 3 zeigt, ist im ersten Teilabschnitt für die Erzielung einer mittleren Fahrbahnbeleuchtungsstärke von 5,4 lx eine elektrische Gesamtleistungsaufnahme von 134,2 W je Lichtpunkt notwendig. Die eigentlich angestrebte Beleuchtungsstärke von 6,3 lx im Mittelwert konnte mit der Quecksilberdampfhochdrucklampe trotz des Lampentausches von 80 W auf 125 W nicht erzielt werden. Tauscht man die 125 W HME-Lampe gegen die SON-H-Lampe 68 W aus (Teilabschnitt 2), werden für eine größere mittlere Beleuchtungsstärke von 6,3 lx auf der Fahrbahn nur noch 80 W je Lichtpunkt benötigt. Bei jährlich 4100 Brennstunden lassen sich somit etwa 54,2 W und 222,2 kWh pro Leuchte und Jahr einsparen. Bei einem Strompreis von 15 Cent/kWh entspricht dies etwa 33,3 Euro pro Jahr.

Verwendet man eine moderne Leuchte mit einem elektronischen Vorschaltgerät und einer 70 W HST-Lampe, braucht man nur noch etwa 60,8 W für die gleiche mittlere Beleuchtungsstärke von 6,3 lx (Teilabschnitt 3). Das entspricht einer Einsparung von 19,2 W pro Lichtpunkt und ca. 79 kWh pro Leuchte und Jahr. Bei einem Strompreis von 15 Cent entspricht dies einer Einsparung von etwa 11,80 Euro pro Jahr. Um eine mittlere Beleuchtungsstärke von 6,3 lx auf der Fahrbahn zu erreichen, ist bei der LED-Leuchte eine elektrische Leistung von 68 W notwendig. Bei 4100 Brennstunden im Jahr und einem Mastabstand von 30m ergibt sich bei der verwendeten LED-Straßenleuchte ein jährlicher Energieverbrauch von 9,3 MWh/(km·a) pro Kilometer beleuchteter Straße.

Besonders interessant ist es, wenn man die moderne konventionelle SR50-Leuchte und die LED-Leuchte DL10 miteinander vergleicht (Tabelle 2 und Tabelle 3). Die Lichtausbeute der SR50-Leuchte beträgt 69,6 lm/W, die der DL10-Leuchte 48 lm/W. Das entspricht einem Faktor von 1,45. Aus Tabelle 3 geht hervor, dass die SR50-Leuchte für die gleiche Straßengeometrie und für die gleiche mittlere Fahrbahn-Beleuchtungsstärke von 6,3 lx etwa 60,8 W verbraucht, während die LED-Leuchte etwa 68 W dafür benötigt. Das entspricht einem Faktor von nur 1,12. Das ist lichttechnisch und numerisch der Beweis dafür, dass man mit der LED-Technologie und einer entsprechenden Optik das Licht sehr gut gezielt dorthin lenken kann, wo es auch benötigt wird. Das ist ein mit der LED-Technologie verbundener Vorteil, der die Energieeffizienz deutlich steigern kann.

Die in diesem Artikel beschriebene Betrachtung der Energieeffizienz im Sinne eines seriösen Vergleichs verschiedener Lampen- und Leuchtentechnologien ist eigentlich nicht neu. Im Zuge der heutigen Koexistenz unterschiedlicher Technologien ist diese Herangehensweise aber mehr denn je zu empfehlen. Alternativ wird heutzutage häufig die Lichtausbeute der

Lichtquellen bei einer bestimmten Betriebsbedingung angegeben. So gibt ein Teil der LED-Halbleiterindustrie die Lichtausbeute der LEDs heute um 100 lm/W bei 25 °C pn-Übergangstemperatur an. Dies entspricht der Betriebsbedingung einer normalen Straßenleuchte jedoch nur in den seltensten Fällen. Der bessere Weg ist die Angabe der Gesamlichtausbeute der Leuchte als Verhältnis des Lichtstroms der Leuchte zu der elektrischen Eingangsleistung. Somit werden die Wirkungsgrade der Elektronik, der Optik und der Lichtquellen gemeinsam berücksichtigt. Bei dieser eher energetisch orientierten Betrachtung wird allerdings die Lichtverteilungskurve der Leuchte und somit ein wesentlicher Teil der Lichtqualität außer Acht gelassen.

Um dieses Defizit zu umgehen ist es sinnvoll, die elektrische Leistungsaufnahme einer Leuchte zu ermitteln, die sie für die normgerechte Beleuchtung einer konkreten Straßengeometrie benötigt. So könnte eine Fragestellung beispielsweise lauten: Welche elektrische Leistung benötigen die zur Verfügung stehenden Leuchten unterschiedlicher Technologien bei den gegebenen Parametern Mastabstand, Masthöhe, Fahrbahnbreite für die normgerechte Beleuchtung gemäß der Beleuchtungsklasse S4.

Eine analoge Vorgehensweise wurde auch in der Teststraße in Darmstadt angewendet. Auf Basis der lichttechnischen und elektrischen Vermessung von zahlreichen Straßenleuchten mit konventionellen Lampen und LEDs als Lichtquellen ist mittlerweile eine umfangreiche Datenbank entstanden. Unter Annahme von genormten typischen Straßengeometrien (Fahrbahnbreite, Lichtpunkthöhe, Lichtpunktüberhang, Mastabstand, Auslegerwinkel etc.) kann anhand der Messdaten sehr verlässlich überprüft werden, welche Beleuchtungsklassen von einer Leuchte erfüllt werden. Alternativ können einzelne Parameter variiert werden, um beispielsweise zu beurteilen, welchen maximalen Mastabstand bestimmte Leuchten unter Einhaltung einer Beleuchtungsklasse zulassen. Ebenso kann die Energieeffizienz der Leuchten, falls möglich auch im gedimmten Zustand, für eine konkrete Straßenanordnung ermittelt werden.

Bei der Betrachtung der in der Teststraße verwendeten LED-Leuchte vom Typ DL10 ist festzuhalten, dass die verwendeten LEDs dem Stand der LED-Technologie aus dem Zeitraum um Sommer/Herbst 2008 entsprechen. Berücksichtigt man die Weiterentwicklung der LEDs bis zum aktuellen Stand vom Sommer 2009, so wären für die Erfüllung der S4-Klasse nicht mehr 68 W, sondern nur noch 56,6 W erforderlich. Das bedeutet, dass die DL10-Leuchtentechnologie unter Verwendung aktueller LEDs aus der heutigen Sicht bereits eine bessere Energieeffizienz und bessere Beleuchtungswirkungsgrade aufweisen würde, als dies bei einer sehr guten konventionellen Leuchtentechnik mit 60,8 W (s. Tabelle 3) der Fall wäre.

Im Zuge der Diskussion über einen nachhaltigen Technologiewandel ist es lichttechnisch, energetisch und wirtschaftlich wenig sinnvoll, eine Leuchte einer neuen Technologie zu verwenden, die gleich gut oder schlechter als eine Standardleuchte der konventionellen Art ist, nur weil man eine neue Technologie einsetzen möchte. Eine für die alltägliche Beleuchtungspraxis sehr interessante und relevante Fragestellung ist deshalb, ab welcher Leuchteneffizienz eine neue LED-Straßenleuchte im Sinne der Energieeffizienz in der Straßenbeleuchtung eingesetzt werden sollte. Betrachtet man die Messwerte der Leuchteneffizienz einer geputzten Kofferleuchte mit einer neuen 68W SON-H-Lampe (Natriumdampf Lampe) und mit konventionellem Vorschaltgerät, so erhält man gemäß Tabelle 2 einen Wert von 41,9 lm/W. Eine neue

Kofferleuchte mit der gleichen Lampe und mit EVG hat eine Leuchteneffizienz von etwa als 48-50 lm/W. Durch die Ergebnisse aus der Teststraße in diesem Projekt und durch weitere Messungen zahlreicher LED-Leuchten im Lichtlabor der TU Darmstadt ist die oben gestellte Frage wie folgt zu beantworten: ab einer Leuchteneffizienz von etwa 50 lm/W sind LED-Leuchten für eine effiziente Straßenbeleuchtung von heute geeignet.

Diese Fragestellung setzt jedoch eine Lichtverteilung voraus, die an die Straßenbeleuchtung angepasst ist. An dieser Stelle sei deshalb auch erwähnt, dass einige der im Lichtlabor vermessenen LED-Leuchten eine Lambertsche Lichtverteilung aufweisen. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn LEDs in Leuchten eingebaut werden, ohne eine zusätzliche Optik mit Linsen oder Reflektoren zu verwenden. Durch das Fehlen einer geeigneten lichtlenkenden Optik kann zwar eine hohe Effizienz der Leuchte erzielt werden. Die so erzeugte „Lichtverteilung“ ist aber in der Regel für eine qualitative Beleuchtung im Sinne der Anforderungen der DIN EN 13201 nicht geeignet.

2.3. Dimmverhalten von LED-Leuchten und konventionellen Leuchten im Vergleich

Generell setzt sich die Effizienz einer Leuchte aus der Effizienz der Lichtquellen, aus der Wirkungsgrad der Optik und nicht zuletzt aus der Wirkungsgrad der Elektronik zusammen, welche in einem engen Zusammenhang mit dem Betriebsverhalten der Lichtquellen selbst steht.

In der heutigen Beleuchtungspraxis ist man im Sinne der Energieeffizienz bestrebt, die Lampen der Straßenbeleuchtung im Verlauf der Nacht entsprechend der Verkehrsstärke ab einem bestimmten Zeitpunkt zu dimmen. Im Lichtlabor der TU Darmstadt wurde im Verlauf des Projektes für die Teststraße das Dimmverhalten einer LED-Leuchte und einer Leuchte mit Natriumdampf-Hochdrucklampe sowie EVG in einer 3 m großen Ulbricht-Kugel gemessen. Je nach Dimmstufe wurde dabei der Lichtstrom abgelesen und auf den jeweils maximalen Wert normiert. Die Messwerte sind in Abbildung 6 graphisch dargestellt. Die Dimmkurve der LED-Leuchte ist linear – bei einer Reduktion des Lichtstroms um 50%, können auch 50% der zuvor benötigten Energie eingespart werden. Reduziert man den Lichtstrom bei der Leuchte mit Natriumdampfhochdrucklampe den Lichtstrom ebenfalls um 50%, können elektrisch gesehen lediglich knapp 30% der zuvor benötigten Energie eingespart werden. Das entspricht einem Verlust von 20% an elektrischer Leistung gegenüber der LED-Leuchte. In der Konsequenz bedeutet dies, dass Entladungslampen beim Dimmen deutlich ineffizienter werden und hohe Verluste mit sich bringen. Dieser Nachteil besteht bei LED-Leuchten nicht.

Hinzu kommt, dass die untersuchte Natriumdampfleuchte mit dem EVG nur bis zu ca. 40% der elektrischen Leistung gedimmt werden kann. Bei der LED-Leuchte ist ein kontinuierliches Absenken des Lichtstromes und der Leistung bis auf theoretisch 0% möglich. Der in Abbildung 6 gemessene Offset für die LED-Leuchte stellt lediglich die Verluste der Vorschalt elektronik dar (Standby-Verbrauch). Dieser Aspekt sollte bei zukünftigen LED-Elektronikkonzepten noch verbessert werden, um im völlig gediminten Modus einer LED-Leuchte auch keine Energie mehr verbrauchen zu müssen.

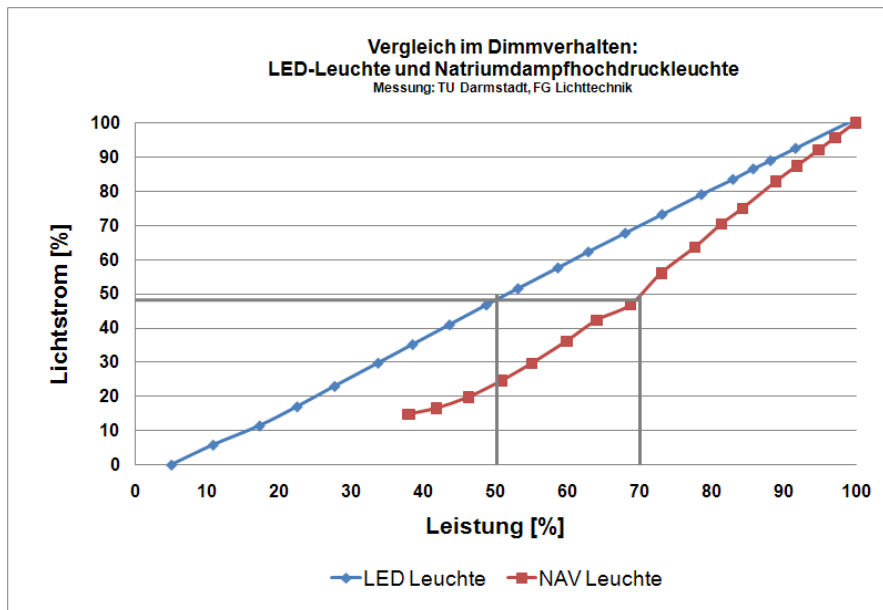


Abbildung 6: Dimmkurven einer LED-Leuchte und einer Leuchte mit Natriumdampf-Hochdrucklampe

3. Wahrnehmungstest und Akzeptanz der Straßenbeleuchtung

Ein Wechsel von bisher verwendeten konventionellen Leuchtentechnologien zu der LED-Technologie ist nur nachhaltig, wenn neben dem Aspekt der Energieeffizienz auch die stark subjektiv geprägten Faktoren der Wahrnehmung und Akzeptanz der Straßenbeleuchtung berücksichtigt werden. Um diesen Faktoren Rechnung zu tragen, wurde die folgende Vorgehensweise gewählt:

- a) Durchführung von Anwohnerbefragungen: Es wurden 660 Fragebögen an die unmittelbaren Anwohner der Versuchsstraße persönlich verteilt. Insgesamt wurden 36 auswertbare Fragebögen abgegeben. Das durchschnittliche Alter der 36 Beantworter liegt bei 64 Jahren, was durchaus entsprechende Ergebnisse für die Wahrnehmung einer demographisch im Wandel befindlichen westeuropäischen Gesellschaft ermöglicht.
- b) Tests mit Testpersonen unter Anleitung eines Versuchsleiters: aus der Sicht eines *Fußgängers* wurde die lichttechnische Qualität der Beleuchtung in den vier Teilabschnitten beurteilt. Insgesamt 21 Testpersonen gingen nachts in Gruppen langsam zweimal durch die Straße und füllten die Fragebögen für jeden Teilabschnitt aus. Die Testpersonen hatten dabei zusätzlich die Aufgabe, die Auffälligkeit der Warnwesten von zwei etwa 20 m im Voraus laufenden Personen unter den unterschiedlichen Lampenstrahlungen zu beurteilen (s. Abb. 7). Das durchschnittliche Alter der Testpersonen liegt bei 29 Jahren.



Abbildung 7: Auffälligkeit der Warnwesten unter dem gelben Licht der SON-H 68 W Lampen (linkes Bild) und dem weißen Licht der HME 125 W-Lampen (rechtes Bild)

- c) Tests mit Testpersonen unter Anleitung eines Versuchsleiters: aus der Sicht eines *Autofahrers* wurde die lichttechnische Qualität der Beleuchtung in den vier Teilabschnitten beurteilt. Ein Auto mit ausgeschaltetem Abblendlicht fuhr mit einer Geschwindigkeit von maximal 30 km/h zweimal die Straße entlang. Nach jedem Abschnitt füllten Fahrer und Beifahrer die Fragebögen aus. Insgesamt wurden 21 Autofahrer zur Bewertung herangezogen.
- d) Mesopische Tests zur Reaktionszeit, Farbwahrnehmung und Detektierbarkeit von Objekten unter dem Licht des jeweiligen Teilabschnitts. Diese Tests dauern bis zum Winter 2009/2010 an und sind nicht Gegenstand dieses Artikels.

Die Fragebögen für die Kategorien a) bis c) sind im Prinzip ähnlich und berücksichtigen folgende Wahrnehmungsaspekte:

1. Generelle Helligkeit auf der Fahrbahn
2. Erkennbarkeit von Bordsteinkanten
3. Erkennbarkeit von Hindernissen
4. Erkennbarkeit von Personen bzw. Testpersonen mit „Warnwesten“
5. „Gefühlte Sicherheit“
6. Farbwiedergabe
7. Farbe des Lichtes

Ein höherer Wert auf der Bewertungsskala entspricht einem besseren und positiveren Eindruck der bewertenden Testpersonen für den jeweiligen Parameter. Alle Ergebnisse wurden einer sorgfältigen statistischen Auswertung unterzogen, auf deren Ergebnisse in diesem Artikel verzichtet wird. Abbildung 8 zeigt zusammenfassend die gemittelten Ergebnisse der befragten, eher älteren Anwohner. Bei allen 7 Fragen schnitt die LED-Beleuchtung am besten ab. Bezüglich der Wahrnehmung von Helligkeit (Frage 1) und Farbe (Frage 7) ist die positive Bewertung von der LED-Beleuchtung deutlich. Auch bei den Fragestellungen bezüglich der Erkennbarkeit von Bordsteinkanten (Frage 2), Hindernissen (Frage 3) und der für die älteren Personen sehr wichtigen „gefühlten Sicherheit“ (Frage 5), zeigt das Bild der Ergebnisse eine eindeutige Tendenz.

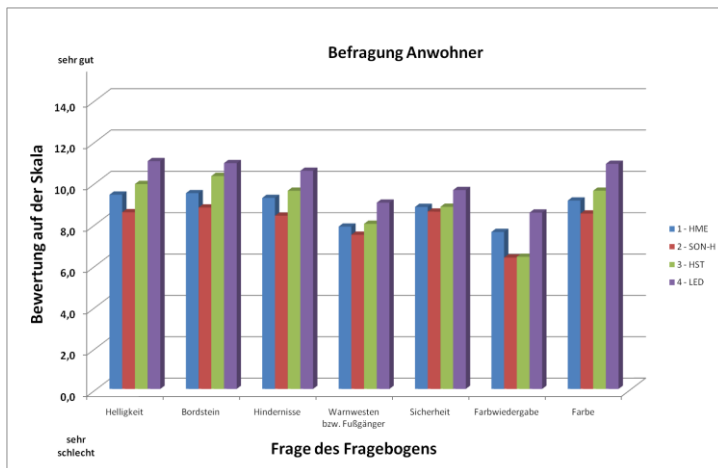


Abbildung 8: Bewertungen der Anwohner für die vier Teilabschnitte mittels Fragebogen

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der befragten, eher jungen Fußgänger. Bei der Betrachtung der gemittelten Werte fällt auf, dass die Bewertung des LED-Teilabschnitts für sechs der sieben Wahrnehmungsaspekte (Fragen des Fragebogens) aus Sicht der Testpersonen am besten ausfällt. In der Frage nach der Auffälligkeit der Testpersonen mit den Warnwesten (Frage 4) ist die Bewertung für das LED-Licht die zweitbeste. Statistisch gesehen ist der Unterschied zwischen dem LED-Abschnitt und den anderen drei Abschnitten in den Fragen 5, 6 und 7 (gefühlte Sicherheit, Farbwiedergabe und Farbbevorzugung) signifikant. In Frage 4 (Auffälligkeit von Warnwesten) wird das weiße Licht der Quecksilberdampfhochdrucklampe (Teilabschnitt 1) und das Licht der LED-Leuchten sehr positiv bewertet.

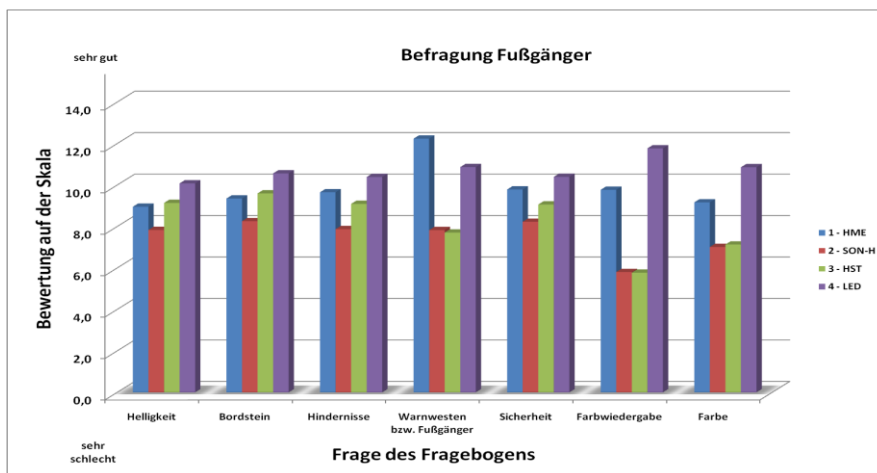


Abbildung 9: Bewertungen der Fußgänger für die vier Teilabschnitte mittels Fragebogen

Vergleicht man die Ergebnisse aus den Befragungen der Anwohner und der Testpersonen als Fußgänger, so fällt auf, dass sich insbesondere die Ergebnisse rund um die Wahrnehmung der Farbaspekte (Fragen 4, 6 und 7) voneinander unterscheiden. Die jüngeren Testpersonen (Abb. 9) bewerten das weiße Licht der Quecksilberdampfhochdruckleuchten und der LED-Leuchten

im Vergleich zu den gelben Natriumdampfhochdruckleuchten deutlich positiver. Bei der Bewertung der gleichen Fragestellungen durch die Anwohner ist diese Tendenz nicht zu erkennen und die Unterschiede zwischen den Lichtquellen verschwimmen. Ein Grund für diese Beobachtung könnte im Durchschnittsalter der beiden Personengruppen liegen. Die Linse des menschlichen Auges vergilbt mit zunehmendem Alter stark. Dadurch lässt sie den kurzwelligen blauen Anteil des Lichtes schlechter durch. Im Ergebnis werden die weißen Lichtquellen etwas „wärmer“ wahrgenommen, als dies in der Realität der Fall ist. Abschließend kann der Grund für diese Beobachtung an dieser Stelle nicht geklärt werden.

4. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde in Ergänzung zu der Veröffentlichung [6] der Autoren messtechnisch nachgewiesen, dass einige wenige Leuchtentypen der heutigen LED-Leuchtentechnik bereits die Energieeffizienz und Beleuchtungswirkungsgrade der besten konventionellen Leuchtenkonfigurationen erreichen. Die Ergebnisse der Studie erbringen zum ersten Mal wissenschaftlich unter realen Bedingungen den Nachweis, dass die LED-Beleuchtung bezüglich der Wahrnehmbarkeit von Objekten, der Farbwiedergabe, des Helligkeitseindrucks und der „gefühlten Sicherheit“ besser als bisherige Lichtquellen wie Quecksilberdampfhochdrucklampen und Natriumdampfhochdrucklampen bewertet werden. Dies gilt sowohl für junge als auch für ältere Personengruppen. Der Schwerpunkt der vorliegenden Studie liegt eher auf den energetischen und beleuchtungstechnischen Aspekten der verschiedenen Beleuchtungstechnologien. Ein weiteres wichtiges Kriterium für den Erfolg der LED-Technologie ist die Lebensdauer und Langzeitstabilität. Ergebnisse hierzu lassen sich aufgrund der kurzen verstrichenen Zeitspanne noch nicht formulieren. Aus diesem Grund wird die Teststraße in Darmstadt noch einige Jahre in Betrieb bleiben, um die Langzeitstabilität der LED-Leuchten unter den realen Betriebsbedingungen untersuchen zu können.

Zusätzlich zu den energetischen und beleuchtungstechnischen Anforderungen, die heute lediglich einige wenige LED-Straßenleuchtentypen in Labor- und Feldtests erfüllen konnten, gibt es zahlreiche weitere Aspekte, die den nachhaltigen Erfolg der LED-Technologie in der Straßenbeleuchtung beeinflussen werden.

Hierzu zählen:

- die Langzeitstabilität und die Wartungsstabilität,
- die Preisgestaltung,
- die Beziehungen zwischen Leuchtenherstellern und Zulieferern wie LED-Herstellern und Elektronikfirmen,
- der Aufbau von Kompetenz in der LED-Technologie in den Entwicklungsabteilungen der Leuchtenindustrie und
- die intelligente Ansteuerung von LED-Leuchten.

Nur wenn dieses Netzwerk an Faktoren aufeinander abgestimmt wird, kann die Bereitschaft zum flächendeckenden Einsatz und zur Förderung der LED-Technologie in den Kommunen

nachhaltig positiv beeinflusst werden. Dieser dynamische Prozess wird sich noch über viele Jahre erstrecken, bevor die LED-Technologie einen nennenswerten Marktanteil in der Straßenbeleuchtung erreichen kann. Die wichtigsten Grundsteine für diese Entwicklung sind bereits gelegt.

Die in diesem Artikel beschriebene Studie in Darmstadt wurde von der Technischen Universität Darmstadt konzeptionell und wissenschaftlich unabhängig ausgearbeitet und durchgeführt. Ein herzlicher Dank der Autoren gilt der Stadt Darmstadt und der HSE Technik GmbH & Co. KG für das Bereitstellen der Teststraße sowie die tatkräftige Unterstützung insbesondere bei der Umrüstung und technischen Betreuung der Straße vor Ort. Die Autoren bedanken sich ebenfalls bei der Firma Siteco Beleuchtungstechnik GmbH für das Bereitstellen der verwendeten LED-Leuchten und der zugehörigen Steuerungstechnik. Diese Unterstützung und die sehr gute Zusammenarbeit aller Beteiligten haben die Durchführung dieser Studie stark erleichtert.

Literatur:

- [1] Schweizerische Agentur für Energieeffizienz S.A.F.E, Energieeffiziente Beleuchtung, Eine Analyse der Straßenbeleuchtung der Kantonshauptstädte, Studie im Auftrag des WWF, September 2006, http://assets.wwf.ch/downloads/2006_09_28_studie_strassenbeleuchtung_khs_korr_d.pdf
- [2] Bundeswettbewerb Energieeffiziente Stadtbeleuchtung, Erster Teil - Technikwettbewerb, http://www.bundeswettbewerb-stadtbeleuchtung.de/pdf_files/090211_SammlungStadtbeleuchtung.pdf, 11.02.2009
- [3] http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/39504.php
- [4] Waldorf, J.: Eine Chance für Kommunen durch eine zukunftsweisende Beleuchtungssanierung, Vortrag des ZVEI in München am 10.09.2008
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Weltklimarat, www.ipcc.ch
- [6] Kuhn, T.; Schiller, C.; Khanh, T. Q.: Eine Analyse aktueller LED-Straßenleuchten aus lichttechnischer Sicht, Zeitschrift Licht, Pflaum Verlag (München), Heft 1/2 , 2009, S. 88-93