

# **Untersuchung des Lichtstromverhaltens von LED-Leuchten in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur**

*Silvia Marx, Karsten Köth, Stephan Völker  
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik  
Einsteinufer 19, 10587 Berlin*

## **Einleitung**

Hochleistungsleuchtdioden werden immer häufiger im Bereich der Straßen- und Außenbeleuchtung eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen Lichtausbeute sowie der langen Lebensdauer stellen sie eine attraktive Alternative zur bestehenden Technologie dar. Bei tiefen Außentemperaturen, die im Bereich nördlicher Breitengrade häufig auftreten, weisen Niederdruckgasentladungslampen mitunter einen starken Rückgang des Nennlichtstroms auf. Für LED-Leuchten gilt ein negativer Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem emittierten Lichtstrom, so dass sich eine niedrige Umgebungstemperatur unter Umständen positiv auswirkt. Im Folgenden wird eine Untersuchung des Lichtstromverhaltens von LEDs und Kompaktleuchtstofflampen in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur vorgestellt.

## **Problemstellung und Ziel der Untersuchung**

In der Straßen- und Außenbeleuchtung werden typischerweise Nieder- und Hochdruckgasentladungslampen eingesetzt. Von den Gasentladungslampen werden die Quecksilberdampflampen laut EU-Verordnung ab 2015 verboten. Daher müssen in den nächsten Jahren ca. 35 Millionen Quecksilberdampflampen EU-weit umgerüstet werden [1]. Alternativen stellen u. a. Leuchtstoff- und Kompaktleuchtstofflampen, neuerdings aber auch vermehrt Leuchtdioden dar.

Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung des Lichtstromverhaltens von Leuchtdioden und Kompaktleuchtstofflampen in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur. Stärken und Schwächen der verschiedenen Lampentypen sollen unter möglichst realen Betriebsbedingungen getestet werden. Anhand eines Temperatur-Dependenz-Faktors (TDF) sollen die Lampen zudem vergleichbar gemacht werden.

## **Stand der Wissenschaft/Technik**

Bei Niederdruckgasentladungslampen ist der Lichtstrom stark vom optimalen Quecksilberdampfdruck und respektive von der Umgebungstemperatur abhängig. Bei einer Druckreduktion sinkt die zur Anregung nötige Quecksilberkonzentration, bei einer Druckerhöhung findet eine Selbstabsorption des Quecksilbers statt - in beiden Fällen sinkt der Lampenlichtstrom [2].

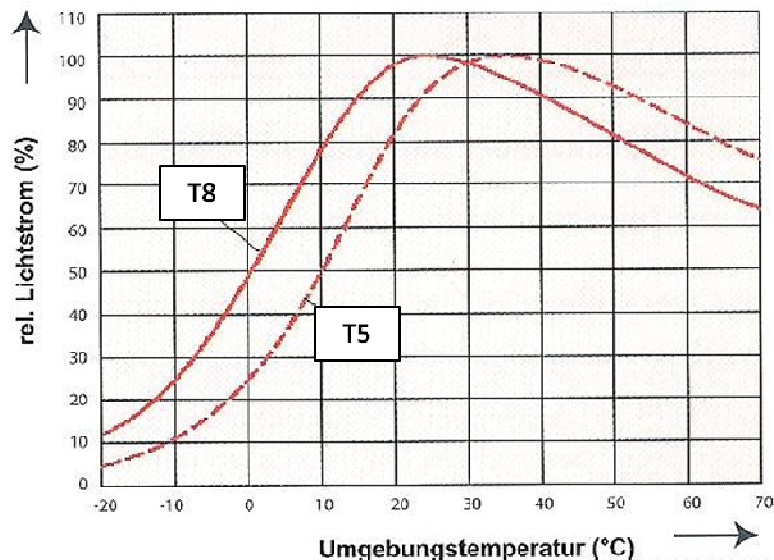


Abbildung 1: Abhängigkeit des Lichtstroms von T5- und T8-Leuchtstofflampen von der Umgebungstemperatur [2]

Auch bei Leuchtdioden zeigt sich eine starke Abhängigkeit des Lichtstroms von der Temperatur. Die LED reagiert jedoch im Gegenteil zu Leuchtstofflampen besonders empfindlich auf zu hohe Temperaturen im Halbleiter. Daher ist ein gutes Thermomanagement zur Wärmeabfuhr von besonderer Bedeutung.

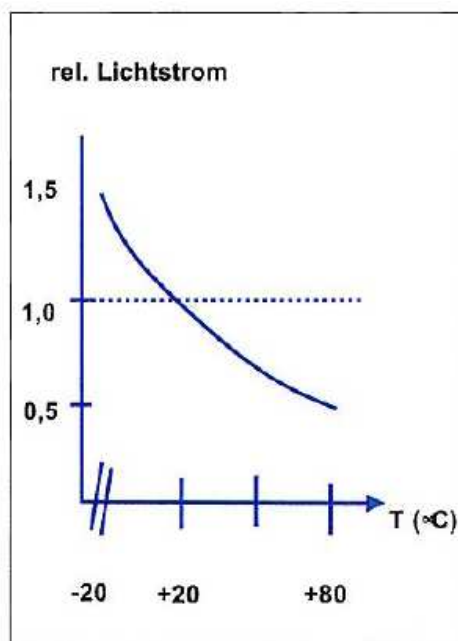


Abbildung 2: Abhängigkeit des LED-Lichtstroms von der Temperatur [2]

## Forschungshypothese

Aufgrund des negativen Zusammenhangs zwischen Lichtstrom und Umgebungstemperatur wird für LED-Leuchten ein besserer TDF erwartet als für

Kompaktleuchtstofflampen. Daraus wird die Hypothese abgeleitet, dass LED-Leuchten für tiefe Temperaturen die geeignetere Alternative darstellen, da ein Lichtstromrückgang vermieden werden kann.

## Messkonzept

Die DIN EN 13032-1 definiert zur Messung photometrischer Daten von Leuchten eine Umgebungstemperatur von 25°C. Laut Statistischem Landesamt liegt die durchschnittliche Jahrestemperatur in Berlin bei 8,8°C [3]. Aufgrund dieser starken Temperaturdifferenz sind die Testbedingungen laut DIN EN 13032-1 als praxisfremd zu bewerten. Für eine exakte Bestimmung des Lichtstroms unter realen Betriebsbedingungen sind zusätzliche Messungen bei tiefen Temperaturen notwendig. Hierzu werden diverse Musterleuchten mit Niederdruck-Gasentladungslampen und LED im Klimaprüfschrank VC<sup>3</sup> 4150 des Herstellers Vötsch Industrietechnik bei den folgenden Temperaturwerten gemessen: -10°C, -5°C, 0°C, +5°C, +10°C, +15°C, +20°C und +25°C. Dabei werden für die LED-Leuchte die Beleuchtungsstärke  $E$ , die Ist-Temperatur  $T_{U, \text{Ist}}$  im Klimaschrank, die Temperatur am LED-Kühlkörper  $T_{\text{Kühlkörper}}$ , die Temperatur  $T_{\text{LED-Chip}}$  möglichst nahe am LED-Chip, die Temperatur  $T_{\text{Leuchte, Innen}}$  in der Leuchte sowie die Temperatur  $T_{C, \text{EVG}}$  am  $T_C$ -Punkt des Vorschaltgerätes aufgezeichnet. Für die Kompaktleuchtstofflampen werden die Beleuchtungsstärke  $E$ , die Ist-Temperatur  $T_{U, \text{Ist}}$  im Klimaschrank, die Coldspot-Temperatur  $T_{\text{Coldspot}}$  an der Lampe, die Temperatur  $T_{\text{Sockel}}$  am Lampensockel, die Temperatur  $T_{\text{Leuchte, Innen}}$  in der Leuchte sowie die Temperatur  $T_{C, \text{EVG}}$  am  $T_C$ -Punkt des Vorschaltgerätes aufgezeichnet.

Die LED-Leuchte wurde zu Beginn der Messung solange betrieben, bis sich der Lichtstrom stabilisiert hatte. Die Kompaktleuchtstofflampen waren bei Anlieferung laut Leuchtenhersteller durch diesen gealtert.

Der Lichtstrom  $\Phi$  der Leuchten wurde zuvor im Drehspiegel-Goniophotometer bei einer Umgebungstemperatur  $T_U$  von 25°C gemessen.

Tabelle 1: Gemessene Lichtströme bei 25°C Umgebungstemperatur

| Leuchte/Lampenleistung | Umgebungstemperatur $T_U$ | Lichtstrom $\Phi$ der Leuchte |
|------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| LED 84 W               | 25°C ± 1,5°C              | 4.652 lm                      |
| CFL 55 W               | 25°C ± 1,0°C              | 3.140 lm                      |
| CFL 40 W               | 25°C ± 1,0°C              | 2.670 lm                      |
| CFL 24 W               | 25°C ± 1,0°C              | 1.480 lm                      |
| CFL 55 W Constant 1    | 25°C ± 1,0°C              | 3.070 lm                      |
| CFL 55 W Constant 2    | 25°C ± 1,0°C              | 2.956 lm                      |
| CFL 40 W Constant 1    | 25°C ± 1,0°C              | 2.700 lm                      |
| CFL 40 W Constant 2    | 25°C ± 1,0°C              | 2.986 lm                      |

Aus dem gemessenen Lichtstrom der Leuchte bei 25°C und der gemessenen Beleuchtungsstärke bei 25°C lässt sich ein Faktor c bestimmen, der zur Berechnung der Lichtströme bei anderen Umgebungstemperaturen dient.

Tabelle 2: Beleuchtungsstärken bei 25°C und Umrechnungsfaktoren c

| Leuchte/Lampe          | Lichtstrom<br>$\Phi_{25^\circ\text{C}}$<br>der<br>Leuchte | Beleuchtungsstärke<br>$E_{25^\circ\text{C}}$ | Umrechnungsfaktor<br>c |
|------------------------|---|--|------------------------|
| LED 84 W               | 4.652 lm  | 555 lx                                       | 8,38                   |
| CFL 55 W               | 3.140 lm  | 252 lx                                       | 12,46                  |
| CFL 40 W               | 2.670 lm  | 271 lx                                       | 9,85                   |
| CFL 24 W               | 1.480 lm  | 164 lx                                       | 9,02                   |
| CFL 55 W<br>Constant 1 | 3.070 lm  | 873 lx                                       | 3,52                   |
| CFL 55 W<br>Constant 2 | 2.956 lm  | 881 lx                                       | 3,36                   |
| CFL 40 W<br>Constant 1 | 2.700 lm  | 873 lx                                       | 3,09                   |
| CFL 40 W<br>Constant 2 | 2.986 lm  | 715 lx                                       | 4,18                   |

Die Messwerterfassung erfolgte alle 30 Sekunden. Pro Temperaturstufe wurden 540 Messwerte erfasst. Nachdem die Leuchten ein thermisches Gleichgewicht erreicht hatten, wiesen die Messwerte nur eine geringe Streuung von  $\pm 5\%$  für die gemessenen Beleuchtungsstärken und  $\pm 1\%$  für die gemessenen Temperaturwerte auf.

## Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Lichtstrommessungen in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Die Lichtströme sind für eine Temperatur von +25°C auf 1 normiert.

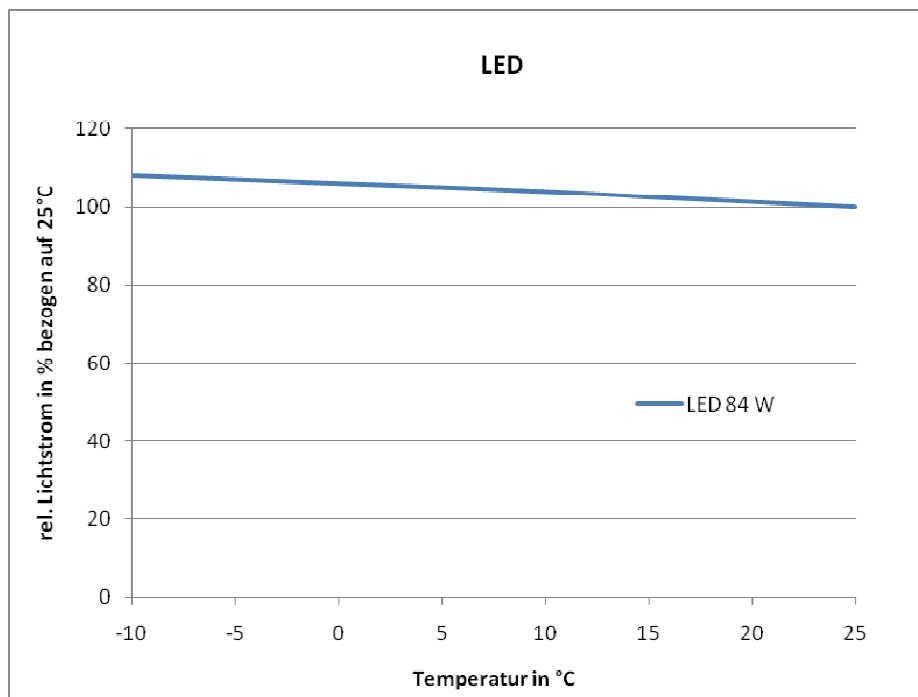


Abbildung 3: Lichtstromverhalten der LED-Leuchte

Der Lichtstrom der LED-Leuchte steigt kontinuierlich mit sinkender Temperatur (siehe Abbildung 3). Für den gemessenen Temperaturbereich ergibt eine Reduktion um 5°C eine Zunahme des Lichtstroms um 1%. Der maximale gemessene Lichtstrom von 5.025 lm wurde für eine Umgebungstemperatur von -10°C festgestellt.

Laut Hersteller sind die LEDs für einen Betriebstemperaturbereich von -30°C bis +85°C ausgelegt. Die maximal zulässige Junction-Temperatur beträgt +120°C. Die gemessenen Temperaturen nahe am LED-Chip betragen zwischen +22,5°C und +56,3°C .

Die gemessenen Werte der Temperaturen im Klimaschrank, in der Leuchte, am Kühlkörper, nahe am LED-Chip sowie am T<sub>c</sub>-Punkt des Vorschaltgerätes sind in folgender Abbildung dargestellt.

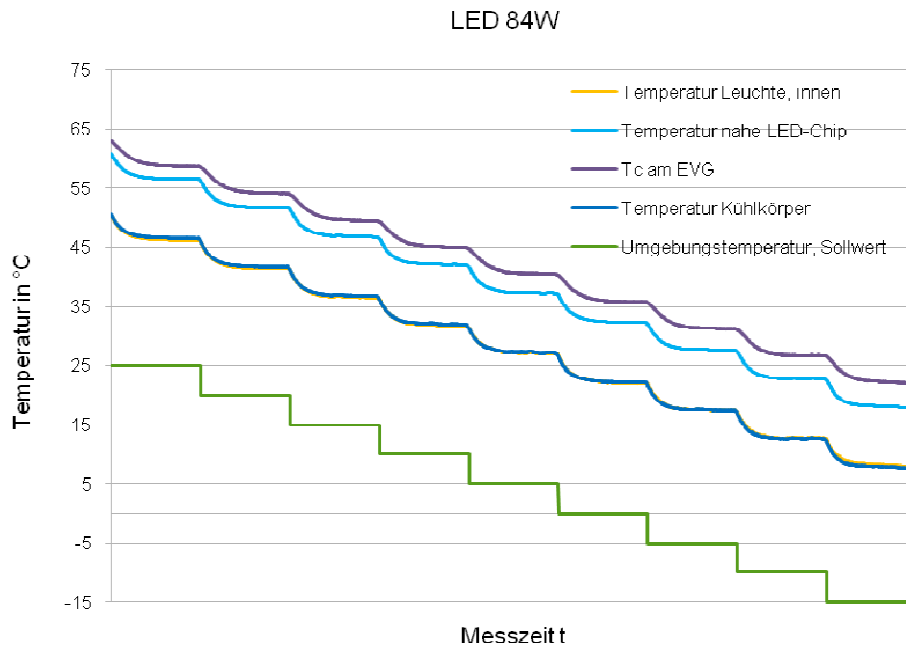


Abbildung 4: Gemessene Temperaturen der LED-Leuchte im Klimaprüfschrank

Der maximal zulässige Umgebungstemperaturbereich zur Erreichung der Nennlebensdauer  $T_a$  beträgt laut Datenblatt  $-25^{\circ}\text{C}$  bis  $+50^{\circ}\text{C}$ , der  $T_c$ -Punkt der Vorschaltgeräte zur Vermeidung unzulässiger Erwärmung von Bauteilen ist mit  $+80^{\circ}\text{C}$  angegeben.

Sämtliche Werte bewegen sich im zulässigen Betriebstemperaturbereich. Bei einer Umgebungstemperatur von  $+25^{\circ}\text{C}$  beträgt die Lufttemperatur innerhalb der Leuchte jedoch bereits  $+46^{\circ}\text{C}$ , die maximal zulässige Umgebungstemperatur beim Betrieb des Vorschaltgerätes ist mit  $+50^{\circ}\text{C}$  angegeben. Ein Betrieb der Leuchte bei höheren Umgebungstemperaturen als  $+25^{\circ}\text{C}$  könnte daher kritisch sein.

Möglicherweise beruht das kritische Thermomanagement der LED-Variante darauf, dass die Leuchte ursprünglich für Kompaktleuchtstofflampen konzipiert wurde und die Gehäuseform daher nicht die optimalen Geometrien für eine ausreichende Wärmeabfuhr bietet.

Die Ergebnisse derselben Leuchte, bestückt mit konventionellen Kompaktleuchtstofflampen verschiedener Wattagen, sind in Abbildung 5 dargestellt.

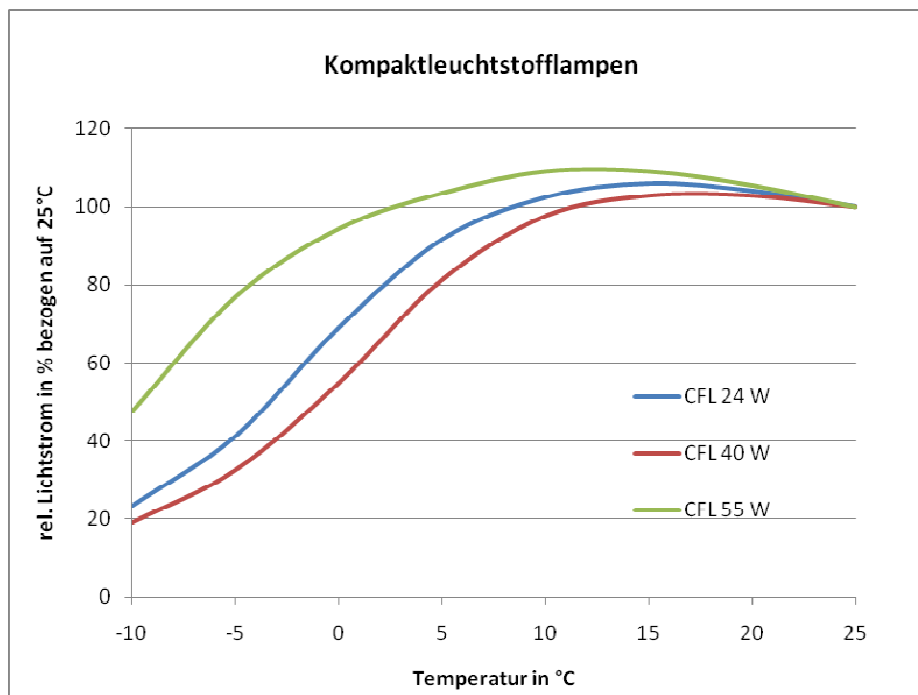


Abbildung 5: Lichtstromverhalten der Kompaktleuchtstofflampen

Das Lichtstrommaximum der 55 W-Variante von 3.427 lm wurde für Umgebungstemperaturen von 15°C und 10°C gemessen. Sinkt die Umgebungstemperatur auf -5°C bzw. -10°C, fällt der Lichtstrom um mehr als 25% bzw. mehr als 50% gegenüber dem Maximalwert ab. Laut Hersteller ist das Leuchtmittel auf eine Temperatur von 30°C optimiert. Für eine Umgebungstemperatur von 15°C bzw. 10°C betrug die gemessene Lufttemperatur in der Leuchte 36,76°C bzw. 31,84°C.

Das Lichtstrommaximum der 40 W-Variante von 2.719 lm wurde für Umgebungstemperaturen von 20°C und 15°C gemessen. Sinkt die Umgebungstemperatur auf 0°C bzw. -10°C, fällt der Lichtstrom um ca. 50% bzw. über 80% gegenüber dem Maximalwert ab. Für eine Umgebungstemperatur von 20°C bzw. 15°C betrug die gemessene Lufttemperatur in der Leuchte 43,89°C bzw. 39,84°C.

Das Lichtstrommaximum der 24 W-Leuchte von 1.546 lm wurde für eine Umgebungstemperatur von 15°C gemessen. Sinkt die Umgebungstemperatur auf 0°C bzw. -5°C, fällt der Lichtstrom um 35% bzw. mehr als 60% gegenüber dem Maximalwert ab. Für eine Umgebungstemperatur von 15°C betrug die gemessene Lufttemperatur in der Leuchte 34,63°C.

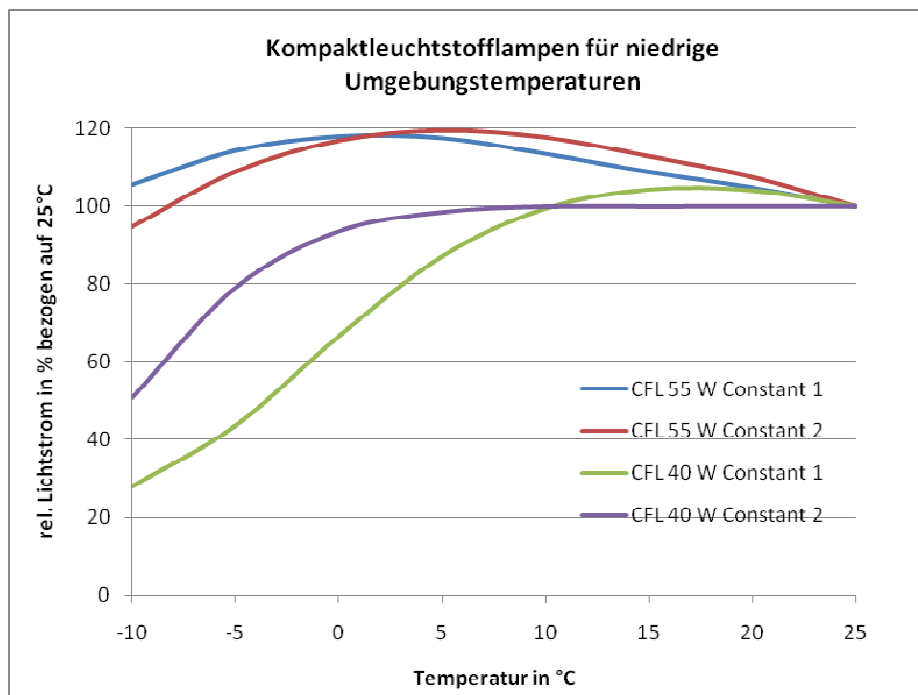


Abbildung 6: Lichtstromverhalten der Kompaktleuchtstofflampen für niedrige Temperaturen

Abbildung 6 zeigt die Lichtstromverläufe bei Bestückung mit Kompaktleuchtstofflampen für niedrige Umgebungstemperaturen. Bei diesen Lampen wird durch Zugabe von z. B. Amalgam der Betrieb mit Nennlichtstrom über einen erweiterten Temperaturbereich ermöglicht. Für die 55 W-Varianten zeigt sich ein Lichtstrommaximum im Bereich um 0°C. Die 40 W Constant 1 hat ihr Lichtstrommaximum bei ca. +15°C während die 40 W Constant 2 ein konstantes Lichtstrommaximum im Bereich von +25°C bis +5 °C aufweist. Bei sehr tiefen Temperaturen von -10°C sinkt der Lichtstrom der 40 W -Varianten drastisch.

Als Vergleichswert der verschiedenen Technologien wird ein Temperatur-Dependenz-Faktor (TDF) als Quotient aus dem ermittelten Lichtstrom bei einer Temperatur von +10°C ( $\Phi_{10}$ ) und dem ermittelten Lichtstrom bei einer Temperatur von +25°C ( $\Phi_{25}$ ) eingeführt:

$$\text{TDF} = \frac{\Phi_{10}}{\Phi_{25}}$$

Tabelle 3: Temperatur-Dependenz-Faktoren

| Leuchte/Lampenleistung | TDF  |
|------------------------|------|
| LED 84 W               | 1,04 |
| CFL 55 W               | 1,09 |
| CFL 40 W               | 0,98 |
| CFL 24 W               | 1,02 |
| CFL 55 W Constant 1    | 1,14 |
| CFL 55 W Constant 2    | 1,18 |
| CFL 40 W Constant 1    | 0,99 |
| CFL 40 W Constant 2    | 1,00 |



Der höchste TDF wird nicht wie vermutet von der LED-Variante sondern von den 55 W-Kompaktleuchtstofflampen für tiefe Umgebungstemperaturen erreicht.

Ein Vergleich der Lichtausbeuten bei +25°C, 0°C und -10°C zeigt, dass die LED-Variante bei sehr tiefen Temperaturen von -10°C die höchste Lichtausbeute aufweist. Bei den gewöhnlichen Kompaktleuchtstofflampen sinkt die Lichtausbeute kontinuierlich mit abnehmender Umgebungstemperatur, ebenso verhalten sich die 40 W-Varianten der Kompaktleuchtstofflampen für tiefe Temperaturen. Bei den 55 W-Varianten werden die höchsten Lichtausbeuten für ca. 0°C erreicht.

Tabelle 4: Lichtausbeuten bei verschiedenen Umgebungstemperaturen

| Leuchte/Lampenleistung | Lichtausbeute<br>$\eta$ bei 25°C | Lichtausbeute<br>$\eta$ bei 0°C | Lichtausbeute<br>$\eta$ bei -10°C |
|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| LED 84 W               | 55 lm/W                          | 59 lm/W                         | 60 lm/W                           |
| CFL 55 W               | 57 lm/W                          | 54 lm/W                         | 27 lm/W                           |
| CFL 40 W               | 66 lm/W                          | 36 lm/W                         | 13 lm/W                           |
| CFL 24 W               | 61 lm/W                          | 42 lm/W                         | 14 lm/W                           |
| CFL 55 W Constant 1    | 56 lm/W                          | 66 lm/W                         | 59 lm/W                           |
| CFL 55 W Constant 2    | 54 lm/W                          | 63 lm/W                         | 51 lm/W                           |
| CFL 40 W Constant 1    | 68 lm/W                          | 45 lm/W                         | 19 lm/W                           |
| CFL 40 W Constant 2    | 75 lm/W                          | 70 lm/W                         | 38 lm/W                           |

## Fazit

Die Ergebnisse stellen beispielhaft das Lichtstromverhalten moderner Außenleuchten unter realen Betriebsbedingungen dar und sollen dazu dienen, Entscheidungsträgern die Auswahl geeigneter Lampen und Leuchten zu erleichtern.

Im Rahmen der Untersuchung sind weitere Messungen an diversen LED-Leuchten geplant.

## Literatur

- [1] Osram GmbH, 2008. EU Regulation on Tertiary Lighting Products.
- [2] R. Heinz, 2004. Grundlagen der Lichterzeugung, S. 49.
- [3] Statistisches Landesamt Berlin, Berliner Umweltstatistik: durchschnittliche Lufttemperatur von 1961 bis 1990, <http://www.statistik-berlin.de>, Zugriff am 17.02.2011.