



Flimmern beim Dimmen von LEDs:

Unterschätzte Lichtwelligkeit

Elektronik basics Das Flimmern und Flackern von LEDs ist für den Anwender störend und könnte durch das Analog-Dimm-Verfahren vermieden werden. In der Lichtbranche wird dieses Prinzip aber eher selten verwendet. Offenbar wird der Lichtwelligkeit kein großes Gewicht beigemessen – allerdings zu unrecht.

Von Prof. Dr.-Ing. Peter Marx

Wenn es um LED-Beleuchtung geht, dann gibt es zahlreiche Parameter, die für den Anwender relevant sind. Dazu zählen der Verlauf des ausgesendeten Spektrums, die Farbwiedergabe (CRI), die Farbtemperatur (CCT), die Lichtausbeute in Lumen/Watt und die Strahlungsausbeute (Verhältnis der insgesamt abgegebenen LED-Strahlungsleistung zur elektrischen Leistung der LED). Auch die Lichtwelligkeit von LED-Leuchten ist für Anwender eine wichtige Kenngröße, insbesondere dann, wenn die LED gedimmt werden soll. Das Maß der

Dinge ist hier das Tageslicht. Dabei handelt es sich um ein Gleichlicht (DC-Licht) mit langsam veränderlichem Helligkeitsniveau und variabler Lichtfarbe (Spektrum).

Die Lichtwelligkeit dient zur Beschreibung der zeitlichen periodischen Schwankung des Lichtstroms von Lichtquellen. Es werden teilweise stark flimmernde LED-Leuchtmittel im Markt angeboten. Die LED-Retrofitlampen und die relativ neuen LED-Filament-Lampen als Glühlampennachbildung weisen beispielsweise unterschiedliche Qualitätsstufen auf, die von flimmerfrei bis

extrem flimmernd reichen können – ähnlich einer Stroboskop-Lampe.

Wie gut eine LED hinsichtlich des Flimmergrads abschneidet, hängt vor allem von der Vorschalt-Elektronik (LED-Treiber bzw. LED-Konverter) ab. Besonders günstige Produkte zeigen nicht selten ein signifikantes Flimmern.

Leider machen die Hersteller von LED-Treibern in der Regel in den Datenblättern keine Angaben über die zeitlichen Änderungen des LED-Lichts, obwohl dieser zeitliche Verlauf in Abhängigkeit vom Dimmgrad relativ einfach mit einem Luxmeter mit Analogausgang und einem digitalen Speicheroszilloskop (DSO) gemessen werden kann. Eine signifikante Bedeutung wird der Lichtwelligkeit noch nicht zugemessen, obwohl diese für die Praxis durchaus bedeutend ist, wie im Folgenden erläutert wird.

Definition der Lichtwelligkeit

Die gebräuchlichste Maßzahl zur Beschreibung der Lichtwelligkeit ist das Verhältnis W der Differenz der maximalen (Φ_{\max}) und minimalen (Φ_{\min}) Lichtstromamplitude zur maximalen Amplitude. Es gibt gleichförmiges Licht ohne Intensitätswechsel, auch DC-Licht genannt, und eine Mischung aus gleichförmigem Licht mit in der

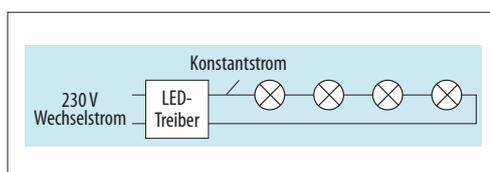


Bild 1. LEDs im Konstantstrom-Betrieb werden in Reihe geschaltet.

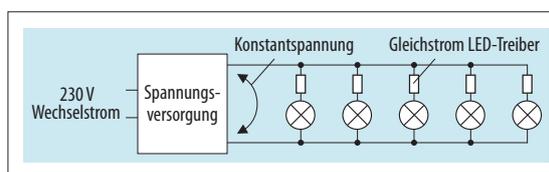


Bild 2. Mehrere Elemente aus LED und ohmschem Widerstand sind parallel geschaltet.

Intensität wechselndem Licht, (DC+AC)-Licht.

$$W = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) / \Phi_{\max} \quad (1)$$

Mit 50 Hz Wechselstrom betriebene Glühlampen sowie Hoch- und Niederdruckentladungslampen mit konventionellen Vorschaltgeräten weisen eine Lichtwelligkeit mit einer Grundfrequenz von 100 Hz auf. Bei 60 Hz, beispielsweise in den USA, ist die Grundfrequenz entsprechend 120 Hz. Die Stärke der zeitlichen Variation des Lichtstroms ist von den entsprechenden Lampentypen abhängig. Für Glühlampen gilt in der Regel $W = 20$ bis 30% , für Leuchtstofflampen $W = 30$ bis 80% und für Hochdrucklampen $W = 60$ bis 90% . Der Modulationsgrad reicht also etwa von 25% bis 100% . Bei den LEDs ist die Situation etwas anders, da sie meist mit dem Pulsweitenmodulations-Verfahren angesteuert werden, bei dem der LED-Strom in schneller Folge zwischen null und Maximalwert moduliert wird. Da der Lichtstrom einer LED dem angelegten LED-Strom fast verzögerungsfrei folgt, springt auch der Lichtstrom zwischen Maximalwert und null – und entsprechend der Definition der Lichtwelligkeit ergäbe sich immer $W = 1$. Eine aussagekräftigere Quantifizierung der Lichtwelligkeit lässt sich mit einer abgewandelten Definition vornehmen (Formel 2), bei der nicht mehr der Maximalwert des Lichtstroms, sondern dessen zeitliches Mittel im Nenner auftaucht. Entsprechend ergeben sich für LEDs auch andere Werte. Es gilt hier $1 \leq W_{LED} < \infty$.

Grundlegendes zu Energieversorgung und Dimmen von LEDs

Grundsätzlich lassen sich LEDs über eine Konstantstrom- oder eine Konstantspannungsquelle ansteuern. Bei einer Versorgung mit Konstantstrom wandelt der LED-Treiber (LED-Konverter) die Netzspannung in einen konstanten LED-Strom um. Die LEDs werden in Reihe geschaltet (Bild 1). Bei höheren Licht-Leistungen erhöht sich die erforderliche Spannung schnell auf $U > 100$ V.

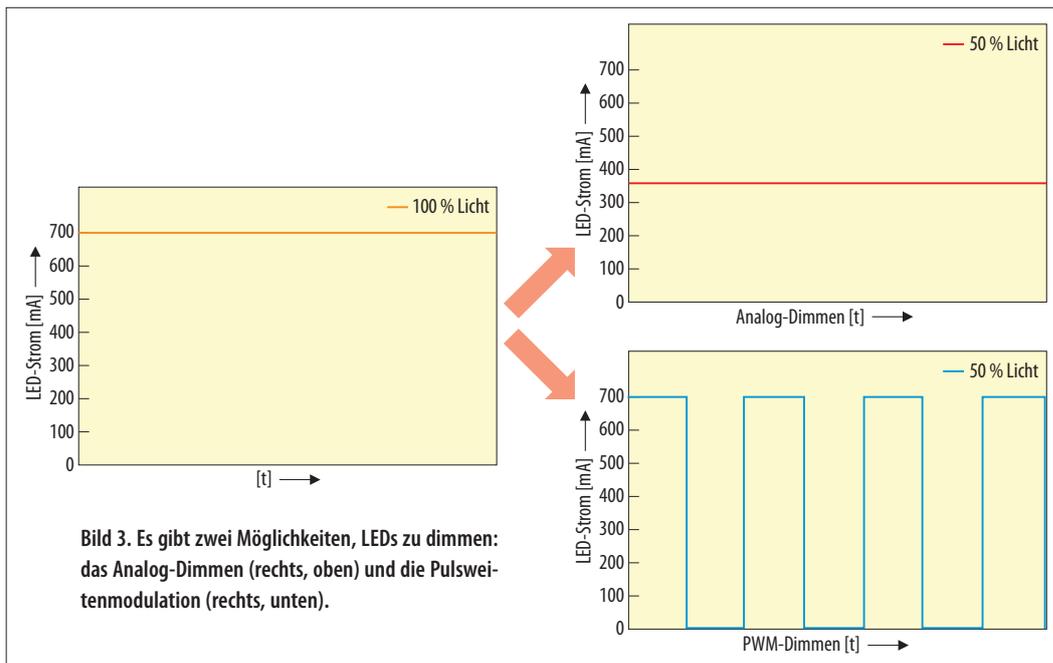


Bild 3. Es gibt zwei Möglichkeiten, LEDs zu dimmen: das Analog-Dimmen (rechts, oben) und die Pulsweitenmodulation (rechts, unten).

Bei der Variante der Konstantspannungsversorgung wandelt der LED-Treiber die Netzspannung in eine konstante Gleichspannung. Hier müssen die LEDs beispielsweise mit einem ohmschen Widerstand zur Strombegrenzung in Reihe geschaltet werden (Bild 2). Spannungsquellen haben den Vorteil, dass man verschiedene LEDs sehr einfach parallel anschließen kann.

Alternativ dazu lassen sich manche LEDs auch direkt am 230-V-Netz betreiben – gänzlich ohne zusätzlichen LED-Treiber. Diese Wechselstrom-LEDs werden beispielsweise von Seoul Semiconductor geliefert (Acrich-Familie).

Für das Dimmen einer LED gibt es im Wesentlichen zwei Verfahren: Die Pulsweitenmodulation (PWM) und das Analog-Dimmverfahren. In Bild 3 sind die unterschiedlichen Herangehensweisen der beiden Ansätze gezeigt: Für eine Minderung des LED-Stroms (700 mA) um 50 % wird beim Analog-Dimmverfahren ein Konstantstrom von 350 mA an die LED angelegt. Beim PWM-Verfahren wird der LED-Strom als Rechtecksignal mit 700 mA Maximalwert angelegt, dessen Tastgrad (Verhältnis von Impulsdauer zur Periodendauer) 50 % beträgt. In Bild 4 ist die Auswirkung des

modulierten LED-Stroms auf die zeitliche Verteilung des Lichtstroms gezeigt.

Bei der Dimmung von LEDs mit der üblichen Pulsweitenmodulation gilt

$$W_{LED} = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{\Phi_{\text{mittel}}} \quad \text{mit } 1 \leq W_{LED} < \infty \quad (2)$$

Φ_{mittel} ergibt sich aus $\Phi_{\max} \cdot t_{\text{an}} / T_{\text{Periode}}$. Bei der Beurteilung der zeitlichen Gleichmäßigkeit des Lichtstroms als Gütekriterium der Beleuchtung sind schnelle und langsame Veränderungen des Lichtstroms differenziert zu betrachten.

Unter schnellen Veränderungen ist dabei die zeitliche Welligkeit des abgegebenen Lichtes aufgrund pulsierender Schwankungen der Einspeisung, wie etwa bei Wechselstrombetrieb bzw. bei PWM-modulierten LEDs (Pulsbetrieb), zu verstehen.

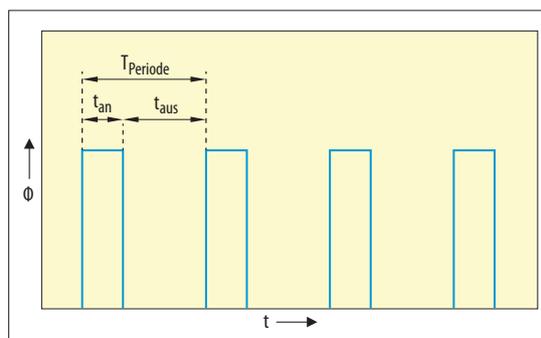


Bild 4. Die Modulation des LED-Stroms überträgt sich – anders als bei einer Glühlampe – direkt auf den Lichtstrom der LED. Die Zeit t_{an} ist die Impulsdauer, die Summe aus t_{an} und t_{aus} ergibt die Periodendauer.

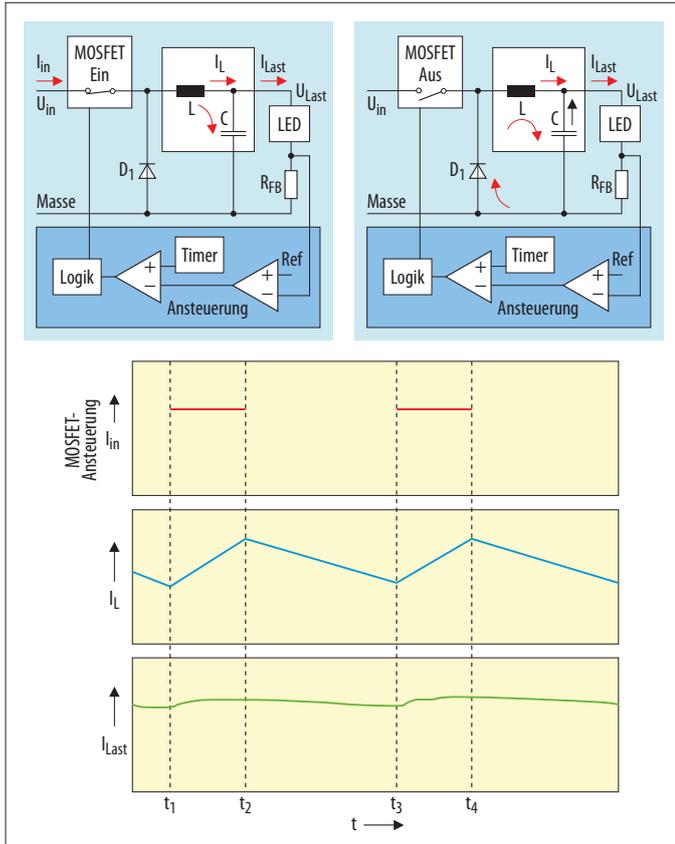


Bild 5. Prinzip des Analog-Dimmens (oben) und zeitlicher Verlauf der Spannung im Schwingkreis I_L und der Spannung an der LED I_{Last} (unten).

Wesentlich entscheidend, ob diese Welligkeit als störend empfunden wird, ist die Flimmerverschmelzungsfrequenz des Auges, die auch von individuellen Gegebenheiten abhängt. Liegt die Frequenz der Lichtwelligkeit oberhalb dieser Verschmelzungsfrequenz, so ist sie für uns nicht mehr wahrnehmbar. Man spricht hier von Pulsation (z.B. Hochfrequenzbetrieb von Leuchtstofflampen). Unterhalb der Verschmelzungsfrequenzgrenze ist die Welligkeit jedoch als störendes Flimmern bemerkbar. Das

im Allgemeinen eine anregende Wirkung auf unsere emotionale Stimmung. Erst langsam gewinnt auch die Variabilität der Beleuchtung durch künstliches Licht im Innenraum mehr und mehr als Gütemerkmal an Bedeutung. Monotone und auf Dauer ermüdende konstante Beleuchtung hat keinen förderlichen Einfluss auf Konzentration und Leistungsfähigkeit. Wenn Glühlampen mit EVGs betrieben werden, ist die Lichtwelligkeit nicht wahrnehmbar.

Auge ist hierfür besonders im peripheren Gesichtsfeld empfindlich. Bei schnell bewegten Objekten (z.B. Drehbank) kann es außerdem zu stroboskopischen Effekten und damit verbundenen Bewegungstäuschungen kommen. Solche Probleme entfallen naturgemäß bei der Beleuchtung mit DC-Licht (z.B. Tageslicht). Die Sonne ist ein konstant strahlender Temperaturstrahler.

Relativ langsame Veränderungen der Beleuchtung können dagegen die menschliche Psyche durchaus positiv beeinflussen. Die natürliche Dynamik des Tageslichtes bei wechselnder Bewölkung und sich änderndem Sonnenstand hat dabei

Ein Vorteil des PWM-Verfahrens ist, dass der Farbort des LED-Lichts beim Dimmen erhalten bleibt und das Verfahren einfach umgesetzt werden kann. Es genügt ein Schalttransistor am PWM-Ausgang des Mikrocontrollers. Nachteilig sind die hohe Lichtwelligkeit und die Belastung der LEDs mit einer maximalen Stromamplitude. Außerdem steigt der Lichtstrom mit dem LED-Strom ab höheren Strömen nicht mehr linear. Ein weiteres Ansteigen des LED-Stroms führt dann zu einer geringeren Zunahme des Lichtstroms, sodass die Lichtausbeute abnimmt.

Analoge LED-Stromregelung

Das Analog-Dimm-Verfahren von LEDs vermeidet die im Allgemeinen störende Lichtwelligkeit; dieses Prinzip wird in der Lichtbranche allerdings eher selten verwendet.

Beim Analogdimmen werden die LEDs statt mit Pulsweitenmodulation mit einem kontinuierlich regelbaren Gleichstrom gedimmt. Der Aufbau einer Schaltung zum Analog-Dimmen ist in Bild 5 gezeigt. Bei durchgeschaltetem MOSFET (Bild 5, oben links) fließt ein Teil des Stroms durch die LED und ein Teil lädt den Kondensator C auf. Nach dem Abschalten (Bild 5, oben rechts) treiben Spule L und Kondensator C den Strom $I_{LED} = I_{Last}$ durch die LED. Sinkt dieser unter einen bestimmten Schwellwert, schaltet der IC den MOSFET wieder ein. Der Dimmgrad wird durch die variable Referenzspannung eingestellt.

Die Vorteile bei diesem Verfahren sind:

- Kein Flimmern, kein Stroboskopeffekt und keine Interferenzen mit anderen Lichtquellen wie beispielsweise Vi-

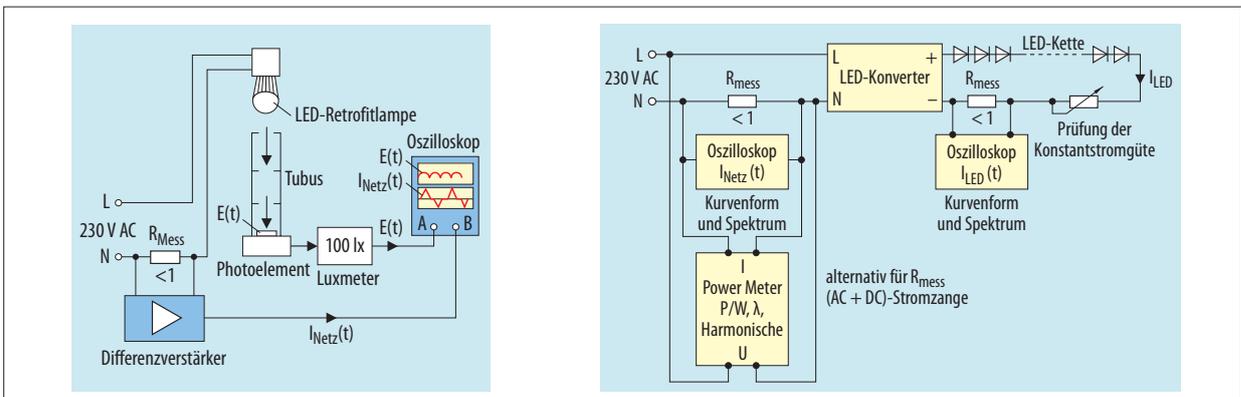


Bild 6. Mit dem (links) dargestellten Messaufbau wird die Lichtwelligkeit einer LED und der zeitliche Verlauf der am Treiber anliegenden Netzspannung erfasst. Im rechten Teil ist ein Messaufbau zur Untersuchung von LED-Treibern gezeigt – verglichen wird die Netzspannung mit dem Strom am Treiberausgang.

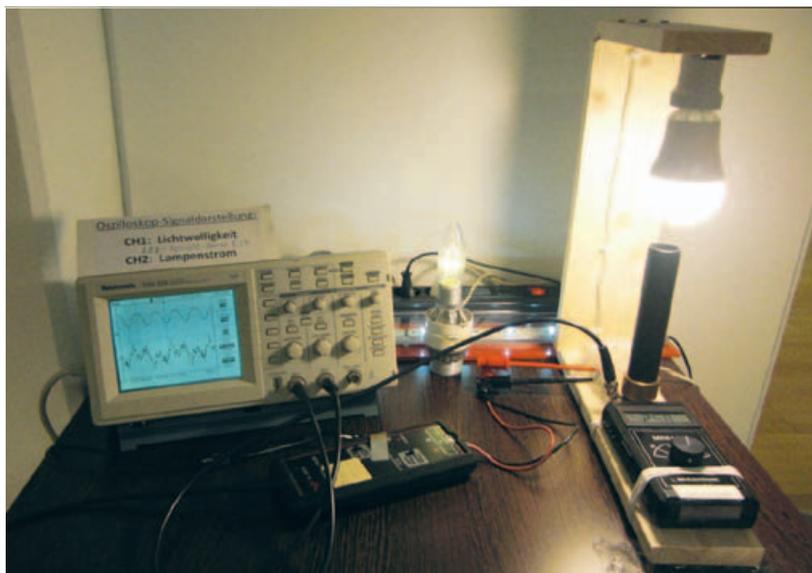


Bild 7. Foto des Messaufbaus aus Bild 6. Auf dem Monitor des Speicheroszilloskops zeigt Kanal 1 (CH1) die Lichtwelligkeit der hängenden Retrofit-LED und Kanal 2 (CH2) den zeitlichen Verlauf der Netzspannung.

(alle Bilder: Peter Marx)

deo-Bildschirmen. Bei TV-Aufnahmen oder Fotografien mit einer Digitalkamera kann es zu keinen Problemen mit der Beleuchtung kommen (Flimmern oder eine teilweise bzw. vollständig dunkle Fotografie).

- Verminderung der Augenermüdung durch Gleichlicht, da es dem Tageslicht – ein langsam veränderliches Gleichlicht – ähnlich ist.
- Geringere Strombelastung der LED-Sperrschicht, was eine geringere Sperrschichttemperatur und damit eine höhere Lichtausbeute und eine höhere Lebensdauer mit sich bringt.
- Günstige EMV, da keine steilen Strom- und Spannungspulse auftreten; PWM-Pulse erzeugen dagegen ein breitbandiges Störspektrum.
- Keine Gefahr evtl. wahrnehmbarer akustischer Geräusche durch kapazitive bzw. induktive Konverter-Baulemente.

Nachteilig am Analog-Dimmen ist die Verschiebung des Farbortes, die jedoch relativ gering ausfällt.

Unkomplizierter Aufbau zur Messung der Lichtwelligkeit

Die Lichtwelligkeit einer LED lässt sich relativ einfach mit einem Luxmeter mit Analogausgang und einem digitalen Speicheroszilloskop messen. Das Schema des Messaufbaus ist in Bild 6 gezeigt. Auf dem Monitor des Oszilloskops in Bild 7 ist nicht nur der zeitliche Verlauf der Lichtwelligkeit des Lichtstroms

zu sehen (CH1, Monitor oben), sondern auch der zeitliche Verlauf des Netzstroms der Retrofitlampe (CH2, Monitor unten). Der Verlauf ist eindeutig nicht sinusförmig.

Für die Analyse des Lichtstroms bietet sich die Darstellung im Frequenzbereich an. Heutige digitale Speicheroszilloskope gestatten eine Fast-Fourier-Transformation (FFT), mit der dann sehr einfach der Gleichanteil und die verschiedenen Harmonischen des Lichtstroms ermittelt werden können. In komplexer Schreibweise gilt für die Fourierreihe $u(t)$ mit komplexen Koeffizienten c_n :

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \cdot e^{jn\omega_0 t} \quad (3)$$

und

$$c_n = \frac{1}{T} \cdot \int_{(T)} u(t) \cdot e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (4)$$

Im Idealfall sollten bei der Darstellung des Lichtstroms im Frequenzraum keine Harmonischen des Lichtstroms auftreten, also nur ein reines DC-Licht (C_0) von der Lichtquelle ausgesendet werden. Damit wäre das Maß der Dinge adäquat nachgebildet – Tageslicht!

LED-Flackern ist Thema aktueller Forschung

Das Thema LED-Flackern ist zwar schon länger bekannt, aber immer noch Ge-

genstand aktueller Forschungsprojekte. Beispielsweise soll anhand von sinnesphysiologischen Experimente an möglichst vielen Probanden ermittelt werden, wie die kritische Flimmerfusionsfrequenz (CFF) statistisch verteilt ist. Von Interesse sind hier besonders helle Grenzfeldbeleuchtungen.

Ein weiteres Projekt befasst sich mit dem Einfluss der Beleuchtung auf die denkerische Leistungsfähigkeit des Menschen. Gerade im Flugverkehr ist es für Entscheidungsträger wichtig, die genauen Zusammenhänge zu kennen, da für viele Fluggäste die Flugzeugkabine als Arbeitsplatz angesehen wird. In entsprechenden Versuchsbedingungen soll geprüft werden, ob PWM-betriebene LED-Beleuchtung zu besonderen, die Leistungsfähigkeit beeinträchtigenden Belastungen führt. *mha*

Weiterführende Literatur

- [1] Lighting Research Center: Alliance for Solid-State Illumination: Recommended metric for assessing the direct perception of light source flicker, Volume 11, Issue 3, Januar 2015.
- [2] Lighting Research Center: Alliance for Solid-State Illumination: Application Considerations Related to Stroboscopic Effects from Light Source Flicker, Volume 11, Issue 2, Oktober 2014.
- [3] Cree: Flicker happens. But does it have to? 2014, Whitepaper, www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/White-Papers/Flicker.pdf.
- [4] Mühlstedt, J., Roßner, P., Bullinger, A.: Die dunkle Seite des Lichts – Diskomfort durch Flicker bei (LED-)Lichtern im Straßenverkehr in Bezug zu peripheren Flimmerverschmelzungsfrequenzen. Konferenzband zur 10. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme, Universitätsverlag der TU Berlin, 2013, S. 408–414.



Prof. Dr.-Ing. Peter Marx

studierte Elektrotechnik und Lichttechnik an der TU Berlin und arbeitete nach seinem Studium als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für

Lichttechnik der TU Berlin. Seit 1977 war er Hochschullehrer für das Lehrgebiet Elektronische Messtechnik im Fachbereich Elektrotechnik und Feinwerktechnik der TFH Berlin. Heute sind seine Arbeitsgebiete die elektronische Messtechnik und die Lichttechnik, wo er als Sachverständiger tätig ist.

info@mx-electronic.com