

Prof. Dr.-Ing. Peter Marx, Berlin

Über die Lichtwelligkeit (Flimmern, Flickern) von LED-Leuchten

Neben dem Verlauf des ausgesendeten Spektrums ist die Farbwiedergabe (CRI), die Farbtemperatur (CCT), die Lichtausbeute in Lumen/Watt und die Strahlungsausbeute (abgegebene LED-Strahlungsleistung / elektrische Leistung der LED) das entspricht dem Wirkungsgrad, auch die Lichtwelligkeit von LED-Leuchten – insbesondere beim Dimmen - für den Anwender relevant. Das Maß der Dinge ist hier das Tageslicht. Dieses ist 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 z.B. unterschiedliche Qualitätsstufen von flimmerfrei bis extrem flimmernd auf, wie eine Stroboskop-Lampe.

Die Vorschalt-Elektronik (LED-Treiber / -Converter) ist massiv verantwortlich dafür, wie gut die Lampen hinsichtlich des Flimmergrads sind. Billig-Produkte zeigen häufig ein signifikantes Flimmern.

Leider machen die LED-Konverter-Hersteller i.d.R. in den Datenblättern keine Angaben über die zeitlichen Änderungen des LED-Lichts, obwohl dieser zeitliche Verlauf in Abhängigkeit vom Dimmgrad sehr einfach mit einem Luxmeter mit Analogausgang und einem Speicheroszilloskop (DSO) gemessen werden kann. Offensichtlich wird der Lichtwelligkeit (Flimmern) keine signifikante Bedeutung zugemessen, obwohl diese für die Praxis bedeutend ist, wie im Folgenden erläutert wird.

Energieversorgung für LEDs

Konstant - Stromquellen

Diese LED-Konverter (LED-Treiber) wandeln die Netzspannung in einen konstanten LED-Strom um.

Die LEDs werden in Reihe geschaltet. Bei höheren Leistungen erhöht sich die erforderliche Spannung schnell auf $U > 100 \text{ V}$.

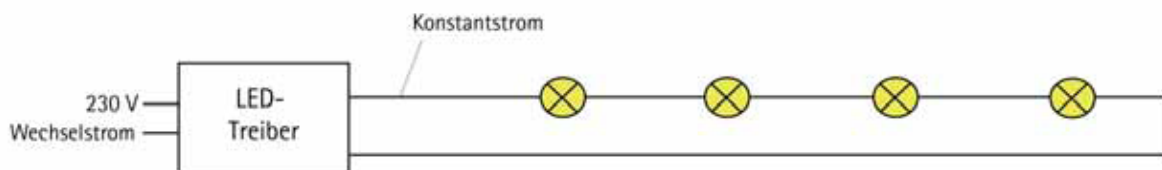


Bild 1. LEDs mit Konstantstrom-Treiber

Konstant - Spannungsquellen

Die Netzspannung wird in eine konstante Gleichspannung umgewandelt.

Die LEDs müssen z.B. mit einem ohmschen Widerstand zur Strombegrenzung in Reihe geschaltet werden. Spannungsquellen haben den Vorteil, dass man verschiedene LEDs sehr einfach parallel anschließen kann.

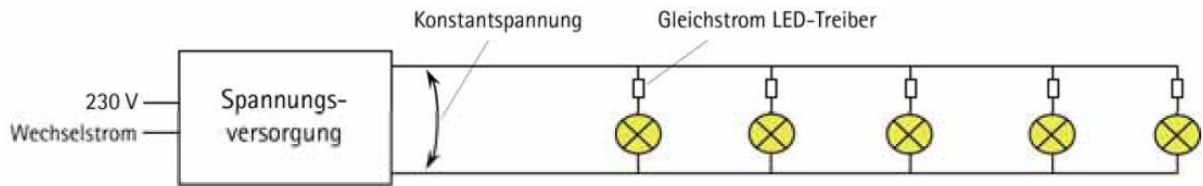


Bild 2. LEDs mit Konstantspannungs-Treiber

ACRICHE-Wechselstrom-LEDs

Diese werden von Seoul-Semiconductor geliefert und können direkt am 230 V-Netz ohne LED-Konverter betrieben werden.

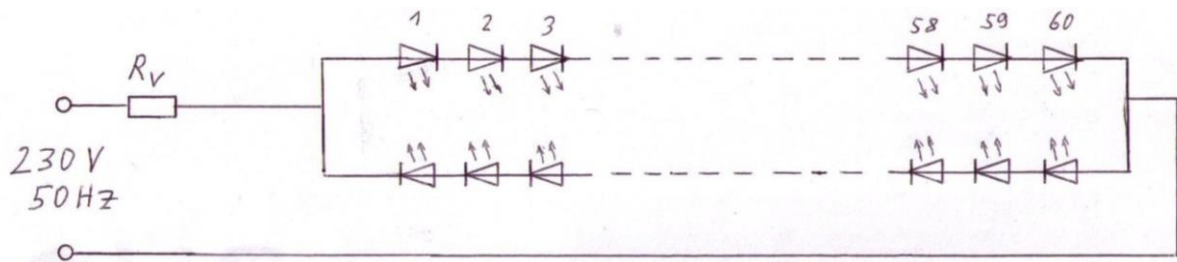


Bild 3. Leds mit Betrieb an der Netzspannung

Es gibt zwei LED-Dimm-Technologien: Das PWM- und das Analog-Dimmverfahren

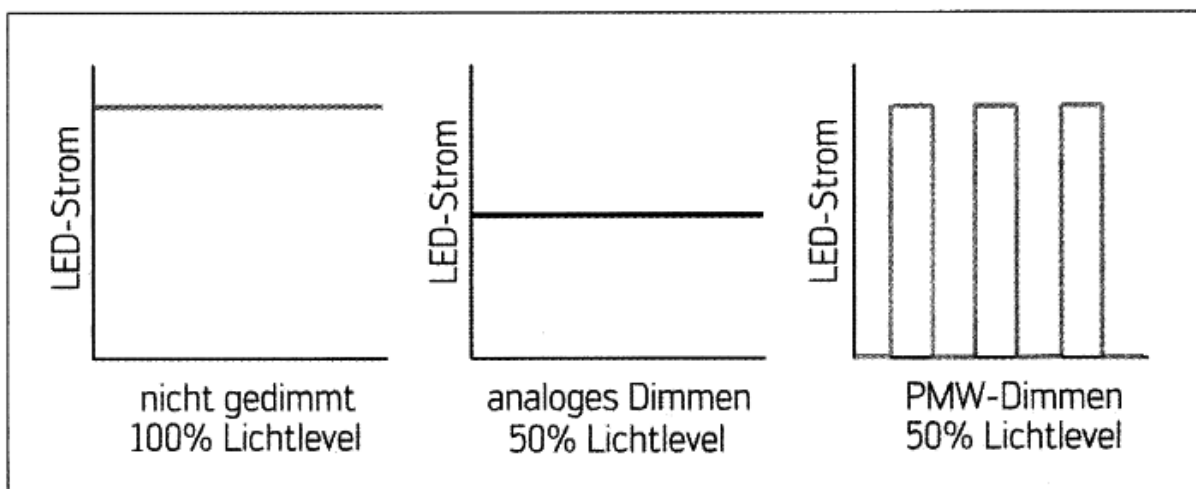


Bild 4. Analoges und PWM-Dimmen

Definition der Licht-Welligkeit W nach CIE

Die gebräuchlichste Maßzahl ist das Verhältnis W der Differenz der maximalen und minimalen Lichtstromamplitude zur maximalen Amplitude. Es gibt DC -Licht und (DC+AC) -Licht.

$$W = [(\phi_{\max} - \phi_{\min}) / \phi_{\max}] \times 100 \%$$

Mit 50 Hz Wechselstrom betriebene Glühlampen sowie Hoch- und Niederdruckentladungslampen mit konventionellen Vorschaltgeräten weisen eine Lichtwelligkeit mit einer Grundfrequenz von 100 Hz auf. (DC + AC)-Licht. Die Stärke der zeitlichen Variation des Lichtstroms ist von den entsprechenden Lampentypen abhängig.

Für Glühlampen ist $W = 0,2$ bis $0,3$, für Leuchtstofflampen $W = 0,3$ bis $0,8$, für Hochdrucklampen $W = 0,6$ bis $0,9$ und für LEDs $W = 1 \leq W_{\text{LED}} < \infty$. Bei 60 Hz, z.B. USA entsprechend 120 Hz. Der Modulationsgrad reicht von etwa 25% bis 100%.

Bei der Dimmung von LEDs mit der üblichen Pulsweitenmodulation (PWM), gilt

$$W_{\text{LED}} = \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{\phi_{\text{mittel}}} \quad \text{mit } 1 \leq W_{\text{LED}} < \infty$$

Nachteil: Hierbei entsteht eine erhebliche Lichtwelligkeit.

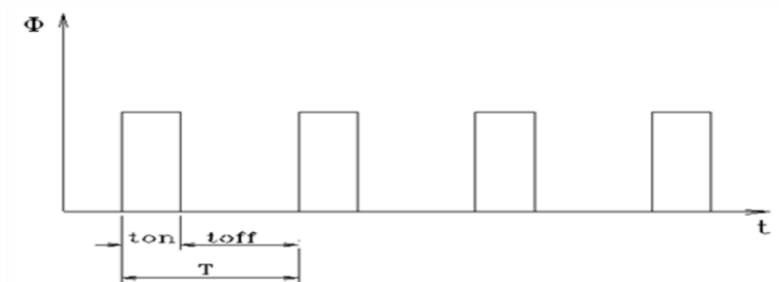


Bild 5. PWM-Verfahren: Signaldiagramm des zeitlichen Verlaufs des Lichtstroms

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.

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 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 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 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 Gleichstrom bzw. Entladungslampen mit EVGs betrieben werden, ist die Lichtwelligkeit nicht wahrnehmbar.

Vorteil des PWM-Verfahrens: Der Farbort bleibt erhalten, es genügt ein Schalttransistor am PWM-Ausgang des Mikrocontrollers.

Nachteil des PWM-Verfahrens: Geringere Lichtausbeute, hohe Lichtwelligkeit, Belastung der LEDs mit maximaler Stromamplitude.

Das Analog-Dimm-Verfahren von LEDs vermeidet die i. A. störende Lichtwelligkeit, dieses Prinzip wird in der Lichtbranche eher selten verwendet.

Beim Analogdimmen werden die LEDs statt mit Pulsweitenmodulation (PWM) mit einem kontinuierlich regelbaren Konstant-Gleichstrom gedimmt, d.h. es entsteht keine Lichtwelligkeit!

Vorteile des Analog-Dimm-Verfahrens:

1. Kein Flimmern, kein Stroboskopeffekt, keine Interferenzen mit anderen Lichtquellen wie z.B. Video-Bildschirmen, Vermeidung evtl. Probleme bei TV- Aufnahmen und Fotos mit Digitalkameras usw.
2. Verminderte Augenermüdung durch angenehmes Gleichlicht (DC-Licht), das natürliche Tageslicht ist auch ein langsam veränderliches Gleichlicht
3. Geringere Strombelastung der LED-Sperrschicht, dadurch geringere Sperrschichttemperatur, höhere Lichtausbeute, höhere Lebensdauer
4. Günstige EMV, da keine steilen Strom- und Spannungspulse auftreten, PWM-Pulse erzeugen dagegen ein breitbandiges Störspektrum!
5. Keine Gefahr evtl. wahrnehmbarer akustischer Geräusche durch kapazitive bzw. induktive Konverter-Bauelemente

Nachteil des Analog-Dimm-Verfahrens:

Die ähnlichste Farbtemperatur und damit der Farbort ändern sich geringfügig mit dem LED-Vorwärtsstrom.

Arbeitsweise einer analogen LED-Stromregelung:

Bei durchgeschaltetem MOSFET (Bild links) fließt Strom durch die LED-Kette, ein Teil lädt den Kondensator C auf. Nach dem Abschalten (Bild rechts) treiben Spule L und Kondensator C den Strom $I_{LED} = I_{Load}$ durch die LED-Kette. Sinkt dieser unter den Schwellwert, schaltet das IC den MOSFET wieder ein.

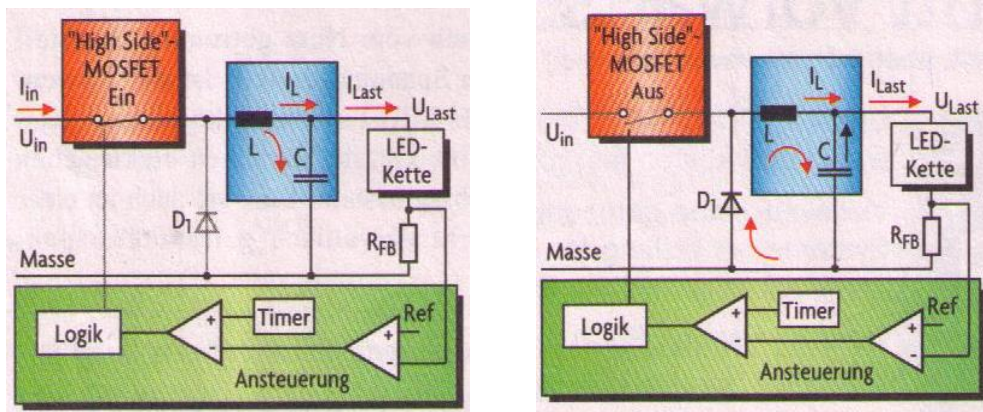


Bild 6. Arbeitsweise einer analogen LED-Stromregelung:

Der Dimmgrad wird durch die variable Referenzspannung eingestellt.

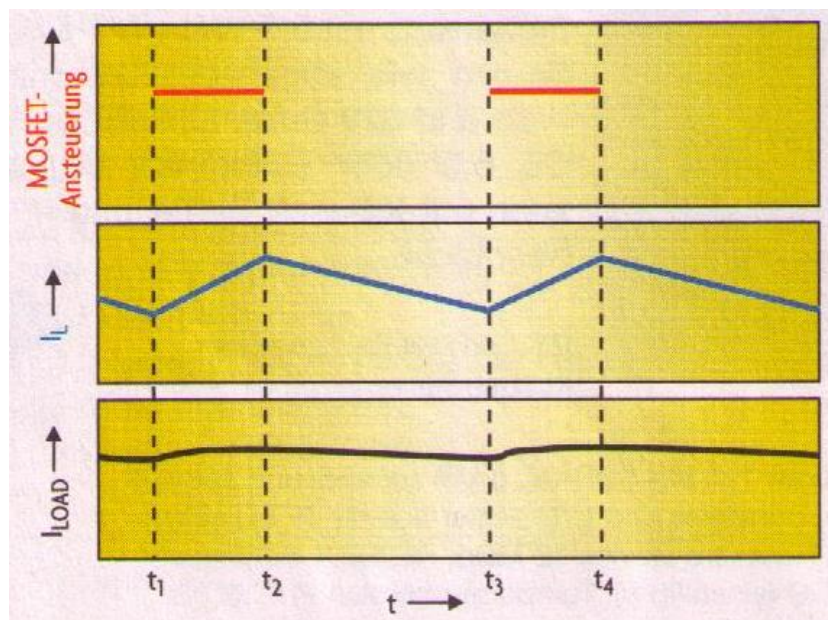


Bild 7. Signaldiagramm zur analogen LED-Stromregelung

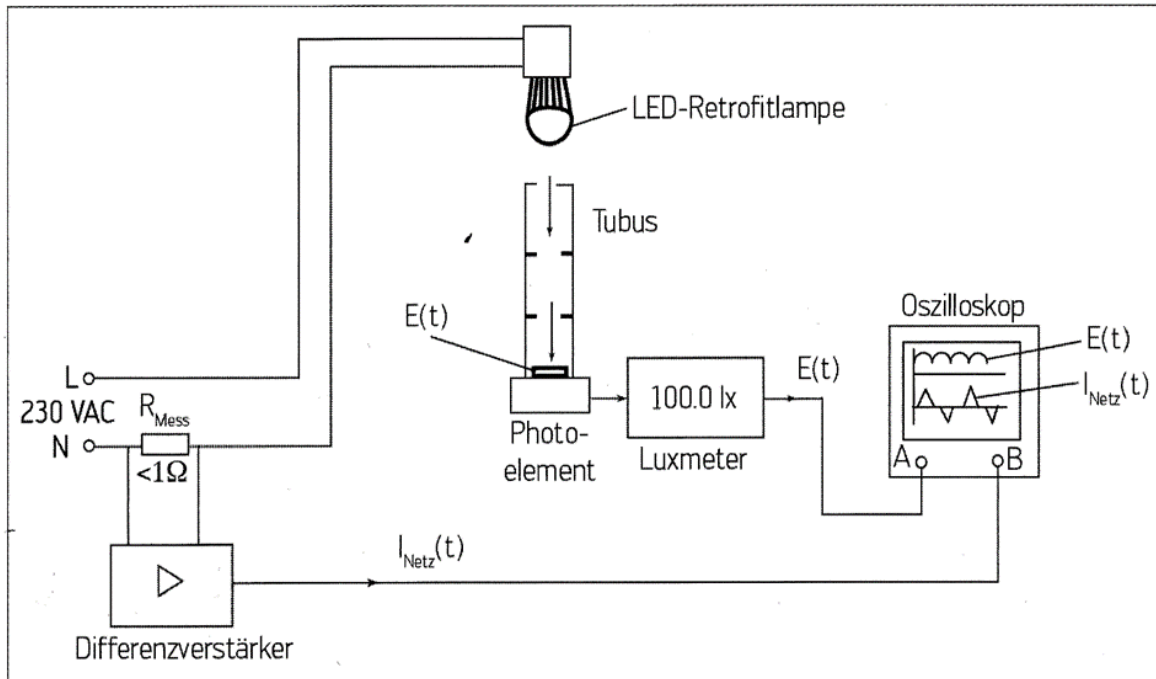


Bild 8. Schema zur Messung der Lichtwelligkeit

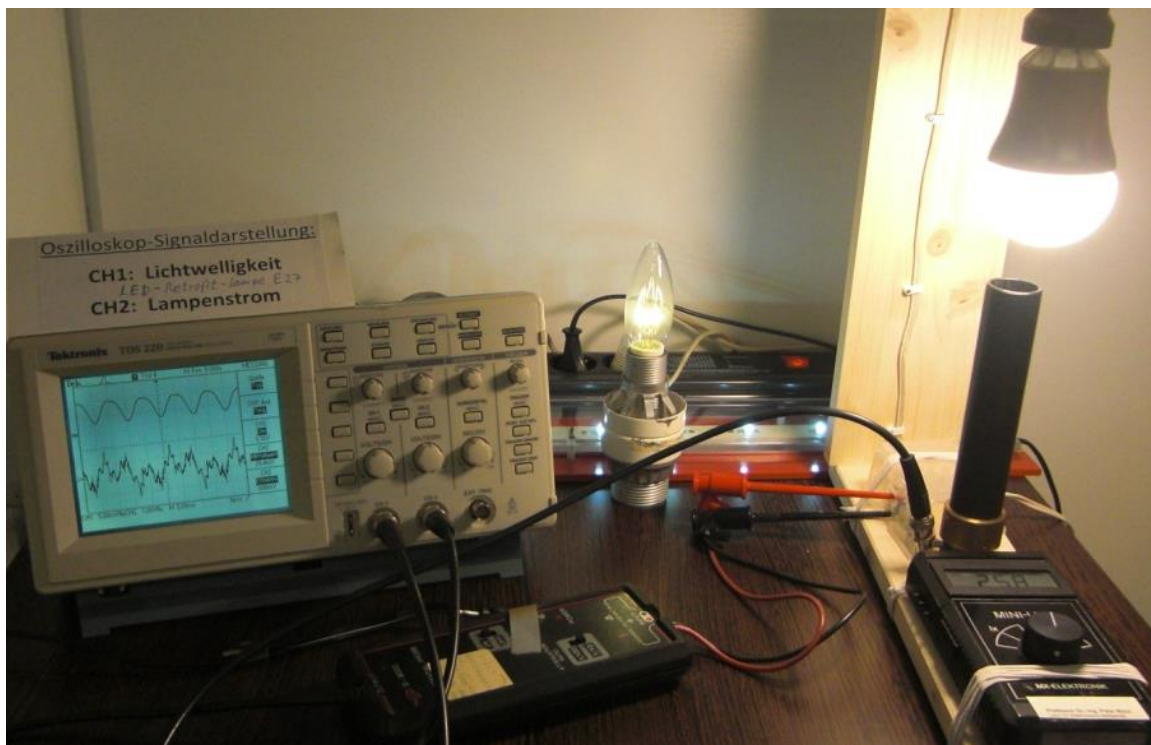


Bild 9. Messaufbau zur Bestimmung der Lichtwelligkeit mit einem Luxmeter und einem digitalen Speicheroszilloskop (DSO). Auf dem Bildschirm sieht man oben die Lichtwelligkeit des Lichtstroms und darunter den gravierend nichtsinusförmigen Netzstrom der Retrofitlampe.

Darstellung der Lichtwelligkeit im Zeit- und Frequenzbereich

Neben der Darstellung der Lichtwelligkeit im Zeitbereich ist auch die Darstellung im Frequenzbereich interessant. Moderne DSOs gestatten eine Fast-Fourier-Transformation (FFT). Hiermit können dann sehr einfach der Gleichanteil und die verschiedenen Harmonischen des Lichtstroms ermittelt werden.

komplexe Fourierreihe

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \underline{c}_n \cdot e^{jn\omega_0 t}$$

**komplexe
Fourierkoeffizienten**

$$\underline{c}_n = \frac{1}{T} \cdot \int_{(T)} u(t) \cdot e^{-jn\omega_0 t} dt = \frac{1}{2} \cdot (a_n - jb_n)$$

Korrespondenz Zeitsignal/Spektrum

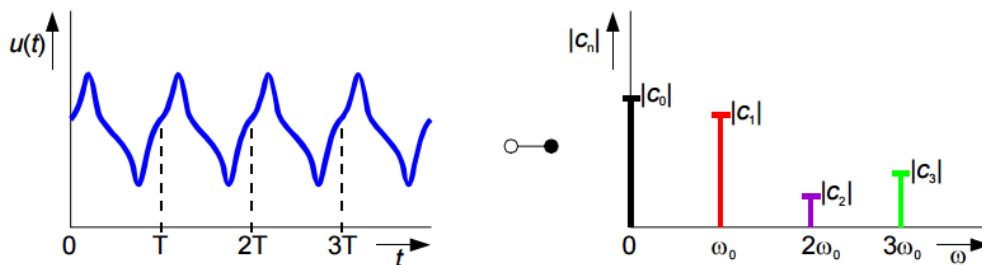


Bild 10. Darstellung der Lichtwelligkeit im Zeit- und Frequenzbereich

Im Idealfall sollten keine Harmonischen des Lichtstroms auftreten, d.h. nur ein reines DC-Licht C_0 von der Lichtquelle ausgesendet werden wie beim Tageslicht!

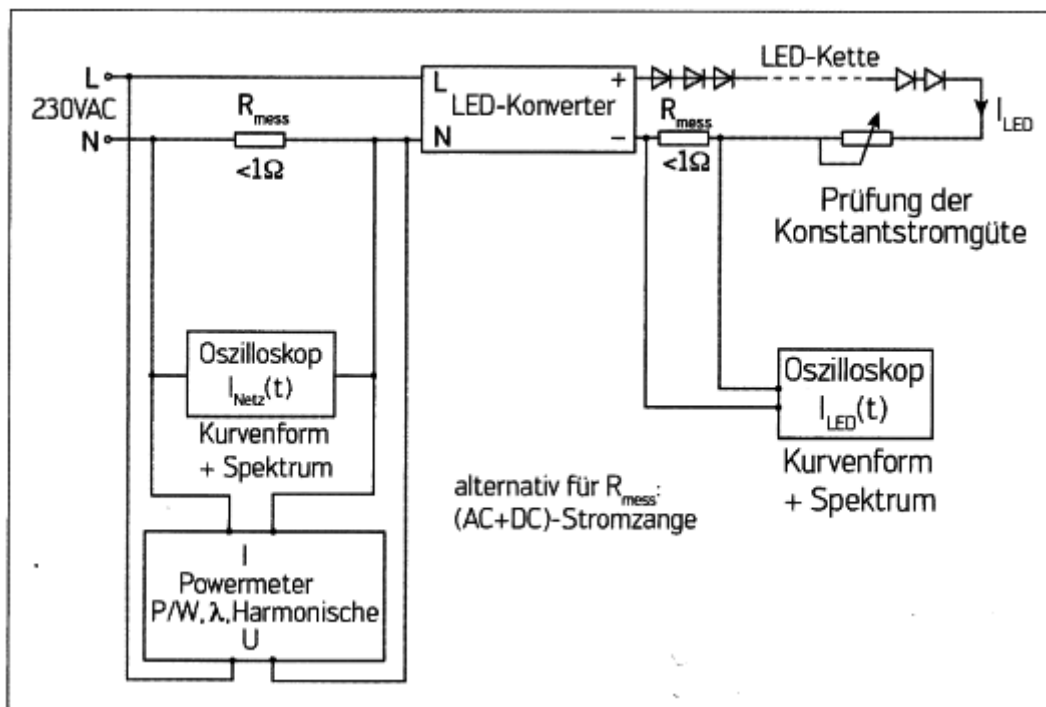


Bild 11. Schaltungsaufbau zur Untersuchung von LED-Konvertern

Aktuelle Forschungsthemen:

Flimmerfusion: Bis zu welcher PWM-Frequenz gibt es Personen, die ein Flimmern der Lichtquellen bei sehr heller Ganzfeldbeleuchtung homogener Oberflächen wahrnehmen können?

Es sollen hierzu sinnesphysiologische Experimente an möglichst vielen Probanden durchgeführt werden um zu ermitteln, wie die kritische Flimmerfusionsfrequenz (CFF) für sehr helle Ganzfeldbeleuchtung statistisch verteilt ist.

Unangenehme Wahrnehmungen bei Sakkaden: Lässt sich die Vermutung bestätigen, dass auch PWM-Frequenzen jenseits der Flimmerfusion bei Blicksakkaden über strukturierte Oberflächen zu unangenehmen Wahrnehmungen führen?

Selbst wenn die PWM-Frequenz deutlich über der CFF auch besonders empfindlicher Personen liegt, können während Blicksakkaden dennoch deutlich sichtbare Strukturen auftreten.

Es ist also die Frage zu klären, was das Sehsystem unter diesen Bedingungen während der Sakkaden an Struktur wahrnimmt.

In einem ersten Schritt soll geklärt werden, ob es zu einem bewussten Empfinden von Unwohlsein oder zu einem Gefühl der Unangenehmheit kommt, wenn anhaltend

Einfluss auf die Leistungsfähigkeit: Wird die Leistungsfähigkeit von z.B. Passagieren in mit PWM-betriebenen LED-Leuchten beleuchteten Flugzeugkabinen beeinträchtigt?

Für viele Fluggäste ist die Flugzeugkabine als Arbeitsplatz zu werten; daher soll durch spezielle Versuchsbedingungen geprüft werden, ob PWM-betriebene LED-Beleuchtung zu besonderen, die Leistungsfähigkeit beeinträchtigenden Belastungen führt.

Silvia Bensel hat in ihrer Studienarbeit am Institut für Lichttechnik der TU Berlin den Rückgang der Lichtausbeute beim Dimmen verschiedener Lampentypen untersucht.

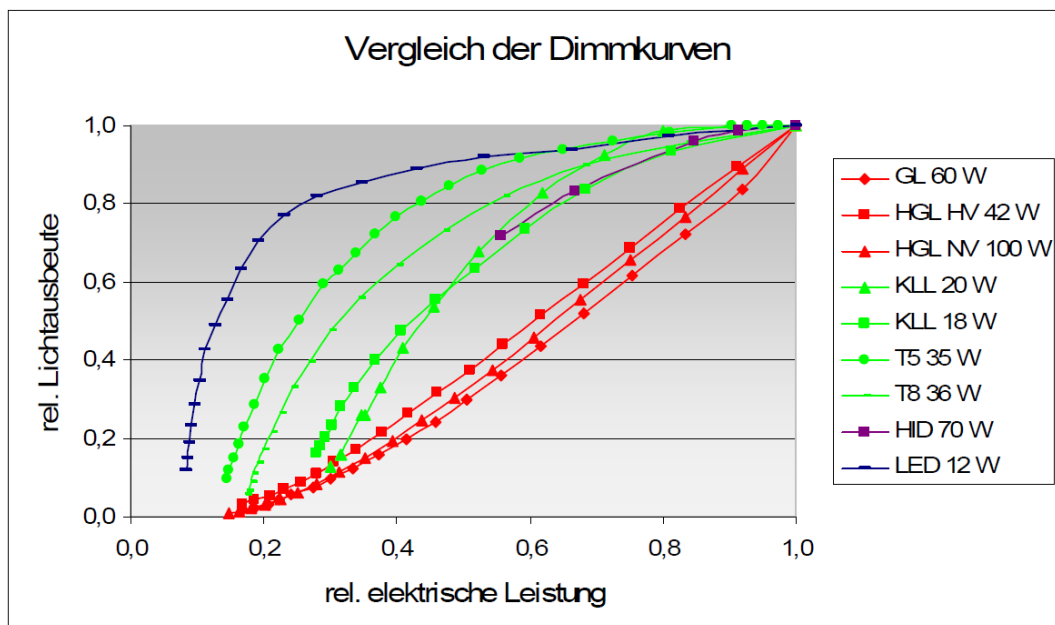


Bild 12. Lichtausbeute in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung beim Dimmen

Beim Dimmen ist der Rückgang der System-Lichtausbeute bei LEDs am geringsten (blaue Kurve)

Bei Entladungslampen (grüne Kurven) ist der Rückgang größer und bei Glühlampen (rote Kurven) ist er am stärksten.

LED-Leuchtenhersteller sollten in Katalogen und im Internet die folgenden relevanten technischen Daten von LED-Leuchten angeben:

Photometrische Daten: Lichtstrom, LVK,
Leuchtenlichtausbeute,
Lichtwelligkeit im Zeit- und Frequenzbereich
Blendungsbegrenzung, TI-Wert < 15%

Spektrometrische Daten: CCT, CRI, x,y, Spektrum

Thermische Daten: LED- Junction-Temperatur T_J
(Richtwert: $T_J < 85^\circ\text{C}$)
zulässige Umgebungstemperatur T_{amb}

Elektrische Daten:

Leistungsfaktor, Kurvenform des Netzstroms, Netzspannungsbereich,
Konverter-Verlustleistung, elektrischer Wirkungsgrad (> 90%),
Konstant-Stromausgang, Konstant-Spannungsausgang, Tastverhältnis (PWM)

ESD-Festigkeit, z.B. bis 8 kV (ESD = Electro-Static-Discharge).

Netz-Transienten-Festigkeit bei Konvertern und LED-Modulen (≥ 4 kV),

EMV (elektromagnetische Verträglichkeit, Störspektrum).

THD = Total Harmonic Distortion ist eine gebräuchliche Angabe, um die Größe der Anteile, die durch nichtlineare Verzerrungen eines elektrischen Signals entstehen, zu quantifizieren.

Der THD definiert sich über die Messung der Summe der harmonischen Anteile eines Signals im Verhältnis zur Grundschwingung

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}$$

LED-Parameter, wie Lichtausbeute, Lebensdauer und Farbkoordinaten (Lichtfarbe) werden negativ beeinflusst bei steigender Chiptemperatur. Die notwendige Entwärmung der LED-Chips geschieht durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung.

Prof. Dr.-Ing Peter Marx
info@mx-electronic.com
www.mx-electronic.com