

Lichtflimmern: Ursache und Vermessung

Lichtflimmern beschreibt die Helligkeitsschwankungen eines elektrisch betriebenen Leuchtmittels. Bewusst oder unbewusst wahrgenommen wirkt es sich negativ auf den Menschen aus. Peter Erwin, Diplom-Ingenieur für Elektrotechnik, erklärt, was Lichtflimmern ist, wie es entsteht und wie man es misst.

Mit einem Glühfaden betrieben an Gleichspannung wollte Edison dem zeitlich gleichförmigen Licht der Sonne möglichst nahe kommen. Seit den Anfängen der Wechselspannung – zunächst in Verbindung mit Leuchtstoffröhren und heute mit LED-Leuchtmitteln sowie anderen Lichtquellen – besteht unser Licht allerdings aus einem Gleich- und einem Wechselanteil, was die Grundform einer »Lichtmodulation« beschreibt.

Der Wechselanteil variiert in Amplitude, Grundfrequenz und Kurvenform. Wird die Lichtmodulation in Ruhe oder in Bewegung wahrgenommen, spricht man von »Lichtflimmern«. Der Effekt wird auch als »optical flicker« bezeichnet. Lichtflimmern unterscheidet sich aber vom aus der Elektrotechnik bekannten »flicker« dadurch, dass seine Ursache nicht in einer gestörten Netzversorgung liegt, sondern durch Aufbau und Konstruktion des Leuchtmittels bedingt ist.

Zwar können Lichtmodulationen zweckdienlich sein, zum Beispiel bei Bildschirmen, in Diskotheken oder bei der Lichtwerbung. Sie beanspruchen jedoch auch permanent das Gehirn. Denkbar schlecht ist die Leuchtmittelkonstruktion dann, wenn das Licht als »Stroboskoplicht« emittiert wird. Es also im periodischen Wechsel Zeiten mit und ohne Licht gibt.

Die Ursache

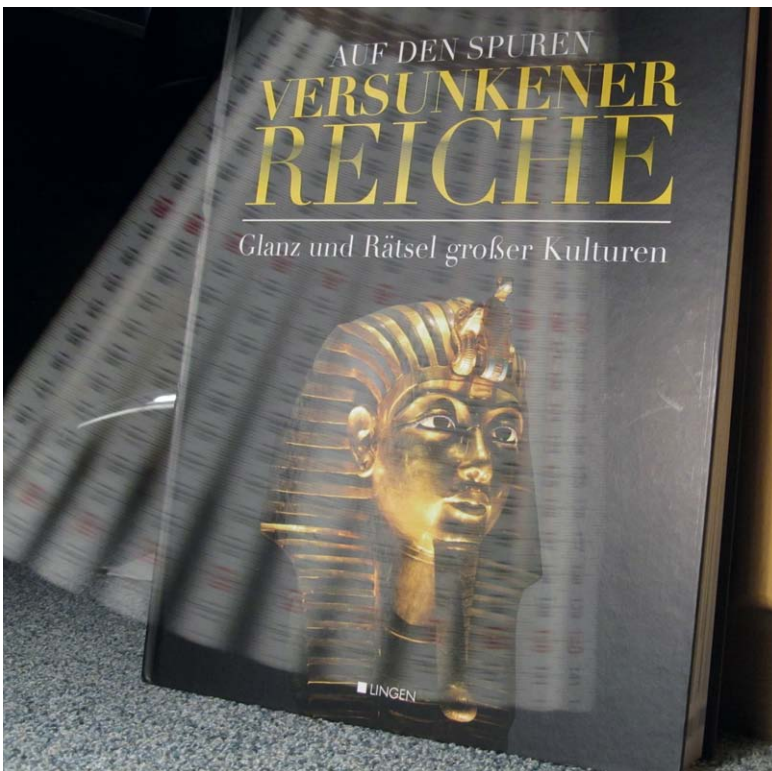
Für das Ausmaß der Lichtmodulation, das »Lichtflimmern«, ist allein die Ansteuerung des lichtemittierenden Elements (Glühfaden, LED, etc.) verantwortlich. Der Faden einer Glühbirne besitzt zum Beispiel eine immanente thermische Trägheit, die im Moment des Nulldurchgangs der Netzwechselspannung dafür sorgt, dass er weiter glüht. Je stärker der Faden ist, desto weniger Modulation ist vorhanden. Halogenleuchtmittel an Netzspannung haben daher die höchste Modulation; 12-V-Leuchtmittel die niedrigste. Eine LED hingegen emittiert das Licht zeitlich präzise nach dem Strom, der sie durchfließt. Für modulationsfreies Licht ist demnach eine Konstantstromquelle erforderlich.

Die Umsetzung der Netz-Wechselspannung in Konstantstrom bedeutet aber einen Kosten- und Platzaufwand. Denn es sind Energiespeicher in Form von Kondensatoren nötig, um den Netz-Nulldurchgang zu überwinden. Neue LED-Leuchtmittel mit sogenannter »treiberloser AC-Technik« oder »AC-Direktbetrieb an 230 V« sparen sich die Kondensatoren, um die Produktlebensdauer zu steigern, flimmern aber stroboskopartig. Ein Umstand, der sich negativ auf den Menschen auswirken kann.

Die Wirkung auf den Menschen

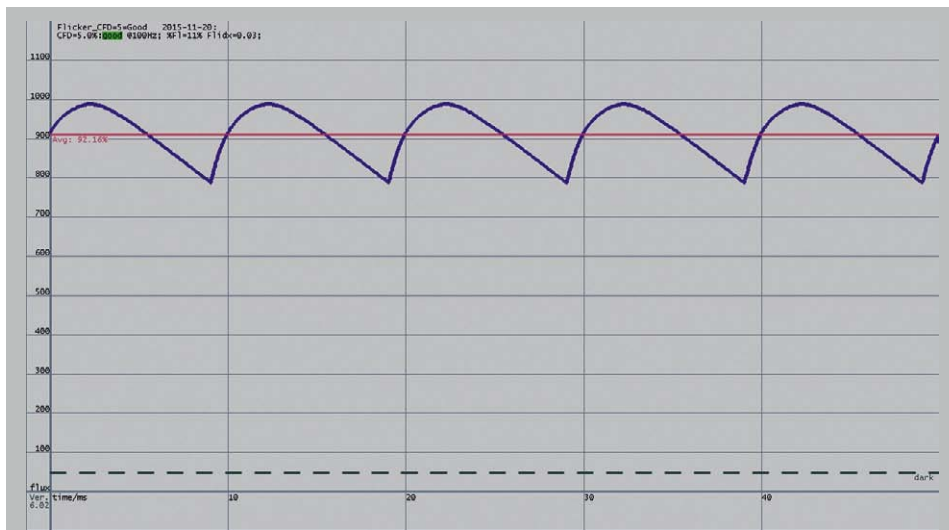
Dass der Wechselanteil im Licht sich auf das menschliche Nervensystem auswirkt, zeigt folgendes Beispiel: Bei der – ersten und einzigen – Ausstrahlung der 38. Folge der japanischen Anime-Serie Pokémon am 16. Dezember 1997 wurden rund 700 Kinder mit Epilepsie-Symptomen ins Krankenhaus eingeliefert. Grund war eine vier Sekunden lange Szene, die einen Donnerblitz zweier Raketen auf großer Fläche und damit ein Flimmern (etwa 12 Hz) zwischen Rot und Blau zeigt.

Das macht in extremer Weise deutlich, wie sich Lichtflimmern auf das Nervensystem auswirken kann. Hier gilt aber natürlich, wie so oft: Auf die »Dosis« kommt



Bilder: Peter Erwin/www.derlichtpeter.de

Bild 1: Beim Stroboskopflimmern zeigt sich der Gegenstand nur als Fächer mit Dunkelphasen dazwischen. Auf seinem Weg wird er zeitweise nicht von Licht angestrahlt, d. h. es flimmert. Je stärker der Hell-Dunkel-Kontrast ist, desto stärker ist das Flimmern.



Beispiel zu »gut«: CFD = 5 %. Die Glühbirne fällt in den Bereich.

es an. Sie resultiert aus Einwirkdauer, Maß (in Form der Amplitude) und Frequenz. Je höher die Frequenz und/oder je niedriger die Amplitude, desto weniger Wirkung hat das Lichtflimmern.

Schwieriger zu klären ist die Frage, ab wann sich Lichtflimmern auf den Menschen auswirkt. Studien zur Lichtflimmersensibilität¹ ermitteln für die bewusste Wahrnehmung eine obere Grenzfrequenz von 75 Hz: die sogenannte Flimmerfusionsfrequenz. Es gibt jedoch Menschen, die sich bereits bei Stroboskopflimmern von 100 Hz (bedingt durch die Netzwechselspannung von 50 Hz) unwohl fühlen. Auch ERG-Analysen und Akkommodationstests zeigen, dass Lichtmodulationen bis 250 Hz unbewusst vom Gehirn verarbeitet werden.²

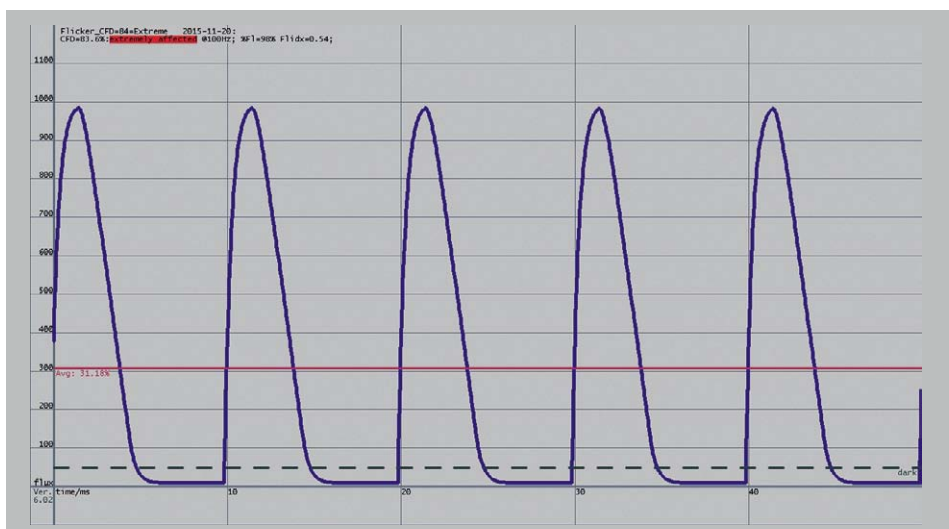
Das Problem bei den Studien: Sie wurden so durchgeführt, dass sich Lichtquelle und Probanden sowohl mit dem Körper als auch mit den Augen in Ruhe befanden. Das ist praxisfern. Denn man ist immer in Bewegung (zumindest die Augen). So tritt bei Stroboskoplicht entweder der Stroboskopeffekt – bei dem sich zyklierende oder rotierende Teile anders(herum) bewegen als wahrgenommen – oder der Perlschnureffekt auf, bei dem sich die Lichtquelle oder das beleuchtete Objekt in Punktreihen (Perlen) oder als Fächer darstellt (Bild 1).

Beide Effekte beanspruchen das Nervensystem, was zu Kopfschmerzen oder Stresssymptomen führen kann.

Welche Grenzwerte gelten?

Stroboskoplicht ist eine unzumutbare Extremform der Lichtmodulation, die gemäß der Normen DIN EN 12464-1 und DIN EN 12464-2 (Beleuchtung von Arbeitsstätten) zu vermeiden ist. In den EU-Richtlinien für Leuchtmittel-Anwendung hat die Norm bedauerlicherweise bislang keine Anwendung gefunden. Über die DIN EN 12464 1/2 hinaus gibt es derzeit keine Regulierungen.

Zwischen modulationsfreiem Licht und der Extremform, dem Stroboskoplicht, liegen jedoch unendlich viele Variationen in Form und Grundfrequenz. Ein Maß für die Lichtmodulation (Messverfahren und Größeneinheit) ist demnach ein unumgängliches Kriterium, um die Qualität eines Leuchtmittels/einer Beleuchtung zu bewerten. Zwar gab in den letzten 15 Jahren weltweit Bestrebungen, ein solches Maß festzulegen. Alle Messmethoden, die älter als zwei Jahre sind und sich anschicken zu einer Norm zu werden, haben jedoch Schwachpunkte, sodass sie nicht zur Vermessung aller elektrisch betriebenen Lichtquellen eingesetzt werden können.



Beispiel zu »unzumutbar«: CFD = 84 %. Minimalwertige Vorschalt-elektronik.

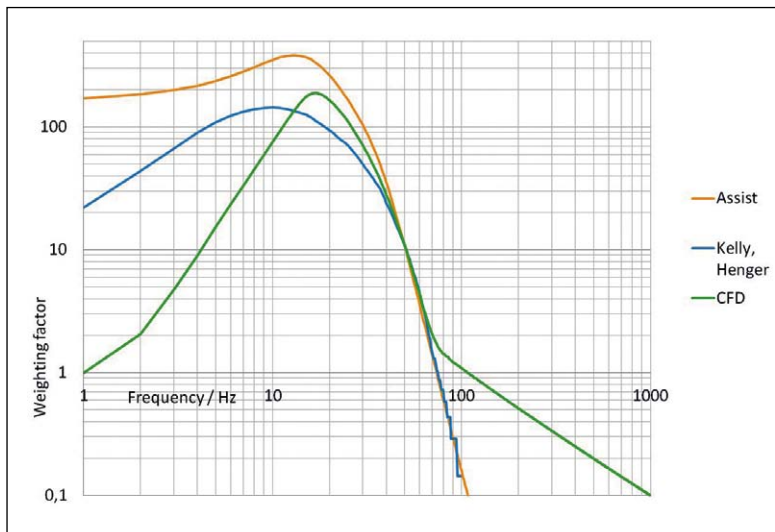


Bild 2: Gewichtungskurven der Messverfahren im Vergleich. Die CFD-Kurve geht über die Flimmerverschmelzungsfrequenz hinaus.

Anforderungen an das ideale Maß

Es ist eine Herausforderung, ein Maß für die Lichtmodulation zu finden, das einerseits die Effekte auf den Menschen berücksichtigt und andererseits leicht handhabbar ist. Da die Nutzungsdauer einer Beleuchtung nicht beschränkt ist, darf die Einwirkdauer auf Grenzwerte keinen Einfluss haben. Das heißt, die Amplitude plus die Grundfrequenz und Frequenzanteile müssen jeweils in Abhängigkeit der Wirkung auf den Menschen berücksichtigt werden. Ein Messverfahren zur allgemeinen Quantifizierung modulierten Lichts sollte folgende auf den Menschen wirkende Eigenschaften einbeziehen:

- Wechselamplitude relativ zum Gleichanteil des Lichts (Modulation)
- Modulationsgrundfrequenz
- Kurvenform (alle Frequenzanteile)
- Kontrast (dunkelster zu hellstem Wert)
- Frequenzabhängige menschliche Wahrnehmungsschwelle (bewusst/unbewusst)
- Perschnur- und Stroboskopeffekt
- Betriebsfälle (z. B. gedimmt)

Ein Messverfahren ist erst dann marktauglich (im Sinne der Kennzeichnung von Produkten in Datenblättern und Verpackung), wenn das Quantifizierungsergebnis unter

Praxistipp

Eine simple Methode für jedermann, um stark lichtflimmernde Produkte zu entlarven, ist der Fächer- oder Stabtest, der an jedem Ort zu jeder Zeit ohne Hilfsmittel durchgeführt werden kann: Ein weißer Stab (zur Not auch der Finger) wird unter dem zu untersuchenden Licht hin- und her bewegt. Zeigt sich der Stab als Fächer (Bild 1), dann ist starkes Lichtflimmern vorhanden. Stellt er sich als gleichförmiger Schweif dar, dann ist eine ggf. vorhandene Lichtmodulation nicht nennenswert.

Berücksichtigung der oben genannten Eigenschaften eine Messgröße ist, die eine Kategorisierung in Qualitätsstufen und die Festlegung von Grenzwerten für verschiedene Einsatzbereiche in Normen ermöglicht.

Messverfahren im Überblick

Für alle existierenden Messverfahren wird das optische Lichtsignal in ein elektrisches Spannungssignal umgeformt, wofür die Hardware folgende Komponenten aufweist:

- Verwendung einer V-Lambda-Fotodiode zur Unterdrückung des nicht sichtbaren infraroten Lichtanteils, z. B. den der Glühlampe.
- Variabler Transimpedanzverstärker zur optimalen Nutzung des vertikalen Messbereichs.
- Antialiasing-Tiefpass zur Einhaltung des Abtasttheorems, abhängig von der Abtastfrequenz.
- Analog-Digital-Umsetzer mit einer Abtastfrequenz zwischen 2 kHz und 500 kHz zur ausreichenden Darstellung und Verrechnung.
- Je nach Berechnungsverfahren eine Erfassung von mindestens fünf Perioden bis zu einer Sekunde Dauer.

Das derart aufbereitete und digitalisierte Messsignal wird im Anschluss einer Berechnung unterzogen, die entweder dem Ansatz »zeitbasiert« oder »frequenzbasiert« folgt.

Zeitbasierte Verfahren

Verfahren auf Zeitbasis sind einfach implementierbar, aber als generische Messgröße ungeeignet, weil sich der berechnete Wert hauptsächlich aus Amplitudenverhältnissen ergibt. Von Nachteil ist außerdem, dass sie Grundfrequenz und Kurvenform nicht berücksichtigen und auch die Forderung nach einer frequenzabhängigen Gewichtung nicht erfüllen.

Zu den zeitbasierten Berechnungsverfahren zählt das Messverfahren »RP-16-10« der Illumination Engineering Society North America (IES). Statt eines einzelnen Messwerts liefert es zwei Werte (%Flicker und Flicker index), die nur gemeinsam zu einer Bewertung führen – wie, ist jedoch nicht spezifiziert.

Das Institute of Electrical and Electronics Engineers benutzt nach der IEEE 1789 (RP1) ebenfalls den Modulationsgrad und beurteilt ihn mit »ok« oder »risky« nach einem Grenzwert, der sich auf die Grundfrequenz bezieht. Dadurch werden Modulationen niedriger Frequenzen strenger bewertet als die hoher Frequenzen. Nicht-sinusförmige Signale werden jedoch nicht unterschieden: Die Amplitude eines noch für gut befundenes Quasi-Sinussignals weist hier keinen Unterschied zu einem schmalen Rechtecksignal gleicher Amplitude auf. Letzteres wird jedoch stärker wahrgenommen. Zudem sind die Grenzwerte sehr scharf gesetzt. Auch eine Standard-Glühlampe wäre hier als »risky« eingestuft.

Frequenzbasierte Verfahren

Für diese Verfahren wird das Messsignal in seine Frequenzanteile zerlegt. Periodische Signale lassen sich damit als ein diskretes Spektrum einzelner Frequenz-

anteile beschreiben. Die Grundfrequenz, weitere Frequenzkomponenten und damit die Kurvenform gehen bei nicht sinusförmigem Verlauf in die Berechnung ein. Entscheidend im Unterschied zu den zeitbasierten Berechnungsverfahren sind die Einbeziehung von Frequenzen und die frequenzabhängige Gewichtung basierend auf der Sensibilität für den Menschen. Alle im Folgenden aufgezählten Verfahren weisen aber Nachteile auf:

- Für die JEITA-Methode wird auf alle Frequenzanteile eine frequenzabhängige Gewichtungskennlinie angewendet, die jedoch Frequenzen ≥ 65 Hz mit 0 bewertet. Die doppelte Netzfrequenz und der Perlschnureffekt bleiben unberücksichtigt.
- Die Gruppe ASSIST des Lighting Research Center gewichtet die Frequenzen des Signals nach einer Kennlinie, die sich an die Studien mit der Flimmerfusionsfrequenz von 70 Hz anlehnt. Die doppelte Netzfrequenz und der Perlschnureffekt bleiben auch hier unberücksichtigt.
- Gemäß California Energy Commission (angewendet als »UL Verified Low Optical Flicker«) werden die Signalanteile mit digitalem Filter oberhalb 200 Hz abgeschnitten und das Licht als flimmerfrei betrachtet, wenn die Modulation des restlichen Signals unter 30 Prozent liegt. Deutlich wahrnehmbares Flimmern (z.B. 10-Prozent-Modulation bei 30 Hz) und der Perlschnureffekt (oberhalb 200 Hz) bleiben unberücksichtigt.

Das CFD-Verfahren

Auf dem »LED Professional Symposium LpS 2016« in Bregenz ist in diesem Jahr ein weiteres Verfahren vorgestellt worden: der Kompaktflimmergrad CFD (Compact Flicker Degree). Das CFD-Verfahren gewichtet die Frequenzanteile im unteren Bereich (bis 70 Hz) den genannten Wahrnehmungsstudien entsprechend. Im Bereich darüber wird eine Gewichtung vorgenommen, die auch ein 2-kHz-Stroboskopflimmern nicht als flimmerfrei wertet (Bild 2).

Der CFD erfüllt nicht nur alle oben genannten Anforderungen an ein Maß für die Lichtmodulation, er liefert sein Messergebnis auch als einfachen Prozentwert. Er berechnet sich aus der Quadratsumme aller frequenzabhängig gewichteten Frequenzanteile bezogen auf den Gleichanteil des Lichtsignals. Die frequenzabhängige Gewichtung ist proportional zur frequenzabhängigen Wahrnehmungsempfindlichkeit des Menschen. Der CFD-Prozentwert lässt nach einem Ampelsystem in eine Qualitätsstufe kategorisieren (Tabelle 1) und eignet sich als technische Angabe in einem Datenblatt.

Kennzeichnungspflicht als Ziel

Es ist an der Zeit, dass lichtemittierende Produkte eine Kennzeichnungspflicht erhalten, die das Maß der Lichtmodulation in Bezug auf die Wahrnehmbarkeit für den Menschen angibt. Wie bei Nahrungsmitteln ist diese Kennzeichnung der Transparenz geschuldet, sodass jeder weiß, was er kauft. Zudem ist es erforderlich, dass normativ Grenzwerte für Lichtmodulationen für bestimmte Anwendungsbereiche festgelegt

	0 < CFD < 1 %	Flimmerfrei: Für den Allgemeingebrauch und zum Filmen sehr geeignet.
	1 % < CFD < 10 %	Flimmerarm: Für den Allgemeingebrauch und Bürolicht geeignet, die Glühlampe fällt in diesen Bereich.
	10 % < CFD < 25 %	Akzeptabel: Für den Allgemeingebrauch (auch öffentliche Stätten) noch geeignet.
	25 % < CFD < 50 %	Moderat: Für den Allgemeingebrauch weniger, zum längeren Arbeiten kaum geeignet. Für Straßenbeleuchtung und Tiefgaragen brauchbar.
	50 % < CFD < 75 %	Stark betroffen: Bei Netzfrequenz Beginn von Stroboskopeffekten; bei längerer Exposition Beeinträchtigung des Wohlfühls. Zum Arbeiten nicht geeignet.
	CFD > 75 %	Extrem betroffen: Stroboskopeffekte, bei längerer Exposition Beeinträchtigung körperlichen Befindens, für die richtige Wahrnehmung von Bewegungsabläufen ungeeignet. Gefährlich für Arbeitsplätze mit rotierenden oder zyklierenden Teilen.

Tabelle 1: Der CFD liefert sein Messergebnis als einfachen Prozentwert, der sich in ein Ampelsystem einordnen lässt.

werden, damit einerseits der Mensch keinen Gefahren ausgesetzt wird, andererseits die Produkte der Zielanwendung entsprechend kostengünstig hergestellt werden können. Das wird jedoch wie gezeigt weder mit zeit- noch mit frequenzbasierten Berechnungsverfahren erreicht.

Um die Anforderungen zur umfassenden Messung der Lichtmodulation elektrisch betriebener Lichtquellen in Bezug auf Gesundheits- und Wohlfühlaspekte für den Menschen und gleichzeitig eine einfache Handhabung zu erfüllen, sind zeitbasierte Berechnungsverfahren nicht geeignet. Die seit wenigen Jahren existierenden frequenzbasierten Verfahren sind ebenfalls unbrauchbar, weil sie die Frequenzen oberhalb der Flimmerfusionsfrequenz und damit Modulationen mit der doppelten Netzfrequenz (das Hauptproblem bei derzeitigen LED-Leuchtmitteln) außer Acht lassen. Einzig der CFD erfüllt die Anforderungen, um auch für Normen eine sinnvolle Basis zu bieten. Auch alle Problemstellungen, die die Internationale Beleuchtungskommission CIE in ihrem letzten Bericht über »Time-Modulated Lighting Systems« aufzeigt, löst das Verfahren.³

Quellen

- ¹ Kelly, D.H. (1961): Visual responses to time-dependent stimuli: I. Amplitude sensitivity measurements. Journal of the Optical Society of America 51: 422-429. /M.Sc. Farhang Ghasemi Afshar (2009): Electronic Drive for Low Wattage Metal Halide Lamps Focused on Acoustic Resonance in HID Lamps.
- ² Wolfgang Jaschinski (1996): Accommodation, convergence, pupil diameter and eye blinks at a CRT display flickering near fusion limit.
- ³ CIE TN 006:2016: Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models, online: http://files.cie.co.at/883_CIE_TN_006-2016.pdf.



Autor

DIPL.-ING. (DH) PETER ERWIN
ENTWICKLER DES CFD-VERFAHRENS
UND DOZENT AN DER DH KARLSRUHE,
WWW.DERLICHPETER.DE