

“Theorie und praktische Messergebnisse modulierten Lichts”

Dipl.-Ing. (DH) Peter Erwin, Leitung und Entwicklung, Der Lichtpeter, Wöschbacher Str. 26,
75045 Walzbachtal, Germany

Kurzfassung

Mit einem Glühfaden als künstliches elektrisches Licht betrieben an Gleichspannung dachte Edison seinerzeit dem zeitlich gleichförmigen Sonnenlicht möglichst nahe zu kommen. Seit der Existenz der Wechselspannung, später in Verbindung mit Leuchtstoffröhren und heute mit LED Leuchtmitteln und anderen Lichtquellen z. B. Bildschirmen besteht das auf uns Einfluss nehmende Licht aus einer Mischung eines Gleichanteils und einem Wechselanteil. Dieser variiert beliebig in seiner Amplitude, Grundfrequenz und Kurvenform. Allein die Ansteuerung des lichtemittierenden Elements ist dafür verantwortlich. Es ist sicher, dass der Wechselanteil eine negative Wirkung auf das Nervensystem des Menschen und andere Wesen hat. Ein derzeit populärer massiv auftretender Fall von Lichtmodulation ist das “Lichtflimmern“ elektrisch betriebener Leuchtmittel.

Bis jetzt gab es keine zufrieden stellende Messverfahren, um die Lichtmodulation im Hinblick auf die Verträglichkeit für den Menschen bemessen, woraus sich dann die Qualität eines lichtemittierenden Objekts ableiten ließe. Die verschiedenen existierenden Verfahren zur speziellen Anwendung auf Leuchtmittel haben Nachteile, die sie marktuntauglich machen. Mit dem Kompaktflimmergrad CFD (Compact Flicker Degree) hat Der Lichtpeter das erste Lichtmodulations-Messverfahren entwickelt, das alle Anforderungen erfüllt, um normative Grenzwerte zum Schutz des Menschen festzulegen.

1. Einleitung

Es gilt als ideal Lichtquellen so auszulegen, dass keine Modulation vorhanden ist. Neben der sich für die Umsetzung erhebenden Kostenfrage gibt es aber auch zweckdienliche Eigenschaften, die diesem Idealansatz widersprechen. Beispiele dazu sind Bildschirme (TV, Computer) oder optische Datenübertragung über die LED-Raumbeleuchtung als Alternative zu WLAN.

In jedem Fall ist die elektrische Ansteuerung für Modulationsgrad und -frequenz(en) verantwortlich. Für Leuchtmittel ist der Einfluss der Netzwechselfrequenz und dessen Modifikation durch Dimmer und Pulsweitenmodulation oder optischer Datenübertragung maßgebend.

Es ist wichtig Grenzwerte festzulegen, um den Menschen vor negativen Einflüssen zu schützen. Hierzu ist ein geeignetes Messverfahren erforderlich, welches universell auf alle Lichtquellen anwendbar ist, um eine quantitative Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

Ein universelles Messverfahren für moduliertes Licht bezieht folgende Eigenschaften ein:

- Wechselamplitude relativ zum Gleichanteil des Lichts (Modulation)
- Modulationsgrundfrequenz
- Kurvenform (alle Frequenzanteile)
- Kontrast (dunkelster zu hellstem Wert)
- Frequenzabhängige menschliche Wahrnehmungsschwelle (bewusst / unbewusst)
- Perlschnureffekt

Das Messverfahren ist dann markttauglich, wenn das Quantifizierungsergebnis eine einfache Messgröße ist, die eine Kategorisierung in Qualitätsstufen und die Festlegung von Grenzwerten in Normen ermöglicht.

Diese Abhandlung stellt den CFD als geeignetes Messverfahren vor und zeigt anhand verschiedener Arten von modulierten Lichtquellen, wie universell der CFD im Vergleich zu anderen Methoden ist:

- Glühlampe an Netzspannung
- Computermonitor
- Analog-Fernseh Bildschirm noninterlaced / interlaced (am Beispiel eines Weißbildes)
- Leuchtstoffröhre mit KVG an Netzspannung
- Leuchtstoffröhre mit EVG an Netzspannung
- LED-Leuchtmittel mit moderater Vorschaltung an Netzspannung
- LED-Leuchtmittel mit ungenügender Vorschaltung an Netzspannung
- LED-Leuchtmittel mit ungenügender Vorschaltung gedimmt mit Phasenanschnitt
- LED-Leuchtmittel quasi ohne Vorschaltung am PWM-Dimmer bei 655 Hz

In der Praxis hat Der Lichtpeter über 600 Lichtquellen vermessen und das CFD-Ergebnis außergewöhnlicher Lichtemissionen visuell auf Plausibilität geprüft. Darin bestätigt sich die Brauchbarkeit weswegen Der Lichtpeter ein Komplett-Messsystem entwickelt hat. Zum Nutzen aller hat Der Lichtpeter eine Dienstleistung eingerichtet, um Leuchtmittel und andere Lichtquellen hinsichtlich der Lichtmodulation vermessen zu lassen.

2. Messung

Grundsätzlich ist für alle Messverfahren das optische Lichtsignal möglichst verlustfrei in ein elektrisches Spannungssignal umzuformen. Dafür ist die Hardware vorzugsweise so auszulegen:

- Verwendung einer V-Lambda-Fotodiode zur Unterdrückung des nicht sichtbaren infraroten Lichtanteils z. B. den der Glühlampe.
- Transimpedanzverstärker mit variabler Transimpedanz zur optimalen Nutzung des vertikalen Messbereichs.
- Antialiasing-Tiefpass-Filter 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 entsprechend erfasste und digitalisierte Messsignal wird einer Berechnung unterzogen, der die beiden Ansätze 'zeitbasiert' und 'frequenzbasiert' zu Grunde gelegt werden können.

2.1. Berechnungsverfahren im Zeitbereich

Zeitbasierte Berechnungsverfahren sind für eine universelle Messgröße grundsätzlich nicht geeignet, weil sich der berechnete Wert hauptsächlich aus Amplitudenverhältnissen ergibt. Die Forderung nach einer frequenzabhängigen Gewichtung kann damit nicht erfüllt werden.

Dazu zählen:

- die Kontrastmethoden (Min-Max; RMS) der Firmen Admesy B.V.[1] und CHROMA ATE INC[2].
- das etwas verbreitete Messverfahren nach IES: RP-16-10[3]. Dieses liefert zudem statt einem Wert die beiden Werte %Flicker (Modulationsgrad) und Flicker Index, die nur gemeinsam zu einer qualitativen Bewertung führen, dessen Weise jedoch nicht definiert ist.

2.2. Berechnungsverfahren im Frequenzbereich, CFD

Für die Berechnung wird das Messsignal z. B. per Fourier-Transformation in seine Frequenzanteile zerlegt. Periodische Signale lassen sich damit als ein diskretes Spektrum einzelner Frequenzanteile beschreiben. Die Modulationsgrundfrequenz, weitere Frequenzkomponenten und damit die Kurvenform gehen bei nicht sinusförmigem Verlauf in die Berechnung ein.

Entscheidend im Unterschied dieser Verfahren sind die Einbeziehung von Frequenzen und die **frequenzabhängige Gewichtung**. Bei allen folgenden Verfahren ist die oberste einbezogene Frequenz zu niedrig gewählt, um das Hauptproblem des Lichtflimmerns mit der doppelten Netzfrequenz und den Perlschnureffekt zu berücksichtigen:

- Für die JEITA-Methode wenden die Firmen Admesy B.V.[1] und CHROMA ATE INC[2] auf die Frequenzanteile eine frequenzabhängige Gewichtungskennlinie an, die alle Frequenzen ≥ 65 Hz mit 0 gewichtet.
- Die Gruppe ASSIST des Lighting Research Center[4] gewichtet die Frequenzen des Signals (mit nur 2 kHz abgetastet) nach einer Kennlinie, die sich an die Flimmerfusionsfrequenz von 70 Hz anlehnt.
- Auch die Gewichtung in der Dissertation von M.Sc. Farhang Ghasemi Afshar (2009) [5], die die Studien von Kelly (1961) und Henger (1986) wiedergibt, lehnt sich an die Flimmerfusionsfrequenz bei etwa 70 Hz an.

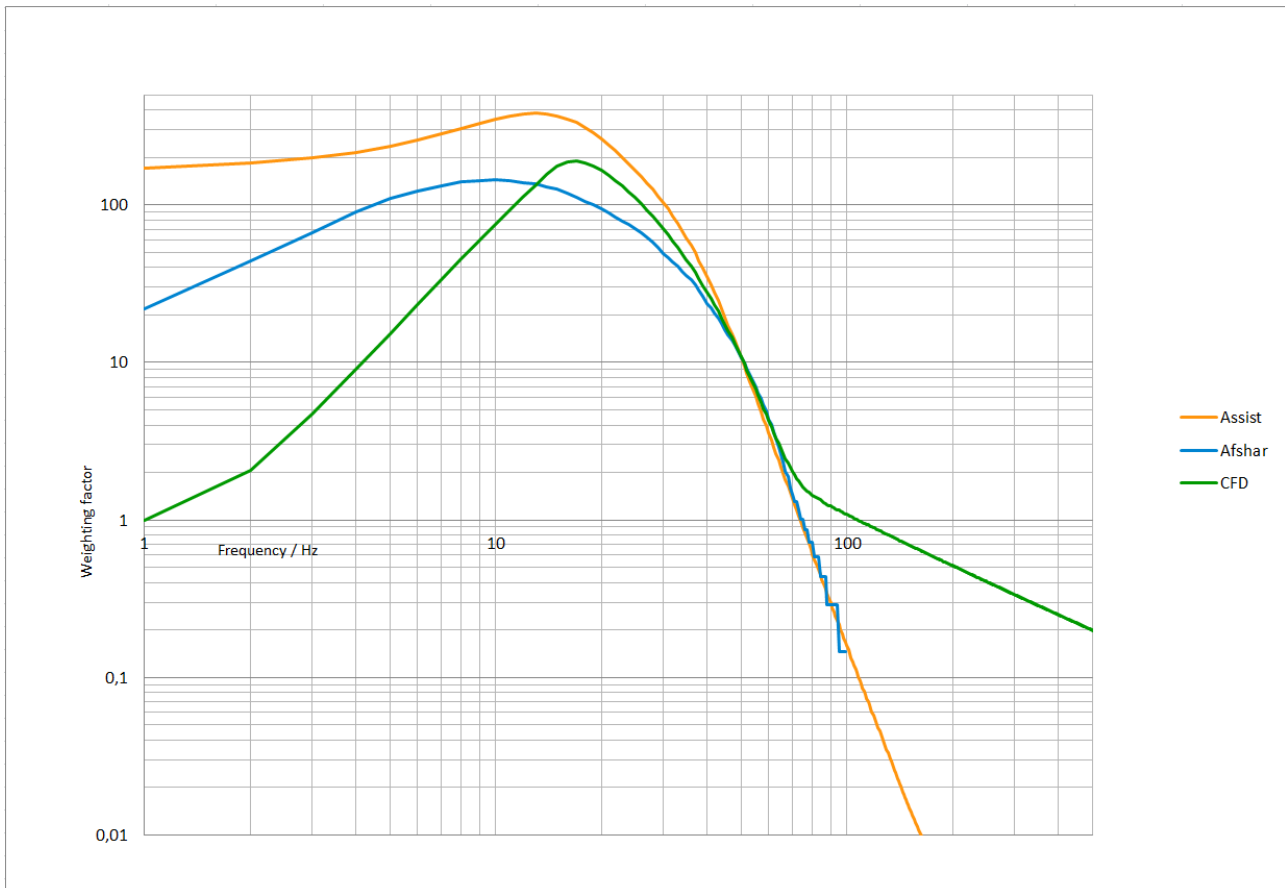


Bild 1: Kennlinien frequenzabhängiger Gewichtungen

Die Basis frequenzabhängiger Gewichtungen sind Studien, bei denen sich die Probanden in absoluter Ruhe (keine Körper- und keine Augenbewegungen) befinden. Dies mag zwar als Anhaltspunkt dienen, ist aber für die Realität so nicht brauchbar, denn z. B. Stroboskopeffekte bei doppelter Netzfrequenz sind schon bei geringsten Bewegungen erkennbar und verursachen Unbehagen, teilweise sogar Gleichgewichtsstörungen. Auch ist bekannt, dass Frequenzen bis 300 Hz von der Retina an das Gehirn weiter gereicht und erst dort verarbeitet werden, was zu einer Belastung führen kann, die mit Müdigkeit und Kopfschmerzen einher geht[6].

Bei Frequenzen ab ca. 90 Hz spielt der Perlschnureffekt eine Rolle[7], der einzig in der CFD-Kennlinie berücksichtigt wird. Der Übergang vom in Ruhe wahrnehmbaren nichtlinearen Frequenzbereich zu dem unter Bewegung wahrnehmbaren linearen Bereich ist fließend gestaltet. Der Bereich unter 10 Hz wird beim CFD niedriger gewichtet, um die Überbewertung restlicher FFT-Leck-Effekte bei praktischen Messungen in diesem Frequenzbereich (auch nach Anwendung eines FFT-Fensters) zu vermeiden.

Der CFD bildet als Endwert eine einfache Prozentangabe, indem der quadratische Mittelwert aller einzelnen auf den Gleichanteil normierten und frequenzabhängig gewichteten Frequenzanteile gebildet wird. Der Wertebereich kann sich von 0% bis über 1000% erstrecken, was an der Kurvenform und der dadurch bedingten Frequenzanteile liegt. Nadelimpulse haben im Gegensatz zu einer Sinuskurve sehr viele Frequenzanteile mit sehr hoher Amplitude bei 100%, was sich entsprechend aufsummiert.

Damit wird auch dem Anspruch der Berücksichtigung der Kurvenform und des Kontrasts Rechnung getragen.

2.3. Beurteilung der Lichtqualität

Der CFD ist eine allgemeine Messgröße für moduliertes Licht, dessen einfacher Prozentwert eine Kategorisierung nach einem Ampelsystem erlaubt:

	0 < CFD < 1% Flimmerfrei Farbe: Tiefgrün	Praktisch modulationsfrei, quasi reiner Gleichanteil.
	1% < CFD < 10% Flimmerarm Farbe: Tiefgrün	Modulation so gut wie nicht wahrnehmbar.
	10% < CFD < 25% Akzeptabel Farbe: Gelbgrün	Modulation möglicherweise wahrnehmbar aber akzeptabel.
	25% < CFD < 50% Moderat Farbe: Gelb	Modulation möglicherweise wahrnehmbar und bei längerer Exposition eventuelle Beeinträchtigung des Wohlfühls, höhere Belastung der Augen am Arbeitsplatz.
	50% < CFD < 75% Stark betroffen Farbe: Orange	Bei Netzfrequenz Beginn von Stroboskopeffekten, wahrscheinlich von mehr als 50% der Bevölkerung wahrnehmbar und bei längerer Exposition Beeinträchtigung des Wohlfühls, für das Arbeiten kaum noch geeignet.
	CFD > 75% Extrem betroffen. Farbe: Rot	Stroboskopeffekte, wahrscheinlich von mehr als 75% der Bevölkerung wahrnehmbar, bei längerer Exposition Beeinträchtigung körperlichen Befindens (Kopfschmerzen, Unwohlsein), Gefahr von epileptischen Reaktionen, für die richtige Wahrnehmung von Bewegungsabläufen ungeeignet. Gefährlich für Arbeitsplätze mit rotierenden oder zyklierenden Teilen.

Tabelle 1: CFD-Kategorisierung nach einem Ampelsystem

Nach DIN EN 12464-1/-2 ist an Arbeitsplätzen netzfrequenzabhängiges Stroboskoplicht (CFD \geq 50%) zu vermeiden. Lichtquellen, die dieser Norm nicht genügen, müssten eigentlich heute schon eine Einschränkung der Verwendbarkeit anzeigen: "Zum Arbeiten nicht geeignet".

Ein Spezialfall der Lichtmodulation ist das Lichtflimmern bei Leuchtmitteln, welches mit der doppelten Netzfrequenz moduliert ist. Dies wird zurzeit besonders diskutiert, weil viele der im Markt befindlichen Leuchtmittel (besonders viele der neuen LED-Filament-Leuchtmittel aus China) massive Stroboskopeffekte aufweisen: Der Modulationsgrad ist 100%, der CFD > 75%. Für diesen Spezialfall hat sich das Verfahren nach IES: RP-16-10[3] mit der %Flicker-Angabe etwas verbreitet, welches aber nur dann eine Aussage über die Lichtqualität in Bezug auf die Modulation erlaubt, wenn das Licht praktisch nur mit einer einzigen Frequenz moduliert ist, also kaum Oberwellenanteile aufweist, denn für ein Frequenzgemisch gibt es keine Berechnungsvorschrift. In der Praxis ist die Hauptmodulationsfrequenz die doppelte Netzfrequenz.

Nach IEEE 1789 gibt es frequenzabhängige Grenzwerte für die Einteilung einer Lichtquelle in „wenig riskant“ oder „ohne Einfluss“. Liegen Frequenzgemische vor (das ist der Regelfall), fehlt jedoch die Berechnungsgrundlage. Es macht nach IEEE 1789 keinen Unterschied, ob die Modulation einer Lichtquelle mit Nadelimpulsen, einer Sinusform oder einer PWM mit einem Tastverhältnis von \geq 95% erfolgt. Es leuchtet ein, dass es aber in der Praxis sehr wohl einen Unterschied macht.

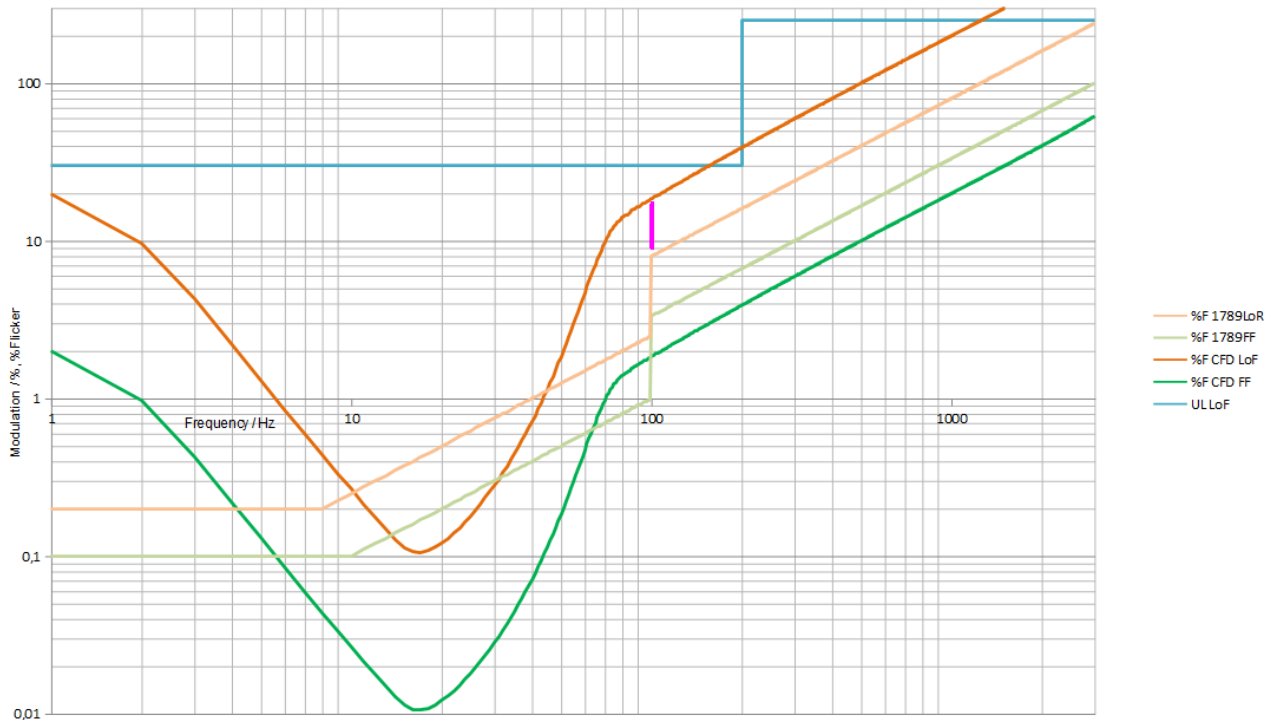


Bild 2: Kennlinien frequenzabhängiger Schwellwerte

Bild 2 stellt folgende Bewertungsgrenzen von %Flicker über der Frequenz dar:

- Schwach gefärbt: Schwellwerte nach IEEE 1789, oben: Schwelle von "Risikoreich" zu "Geringes Risiko", unten: Schwelle von "Geringes Risiko" zu "Kein Einfluss"
- Stark gefärbt: CFD-Schwellwerte aus Tabelle 1 übertragen auf %Flicker, oben: Schwelle von "akzeptabel" zu "flimmerarm", unten Schwelle von "flimmerarm" zu "flimmerfrei"
- Blau: Schwellwert nach Underwriters Laboratories (UL): Schwellwert zu "Geringes Flimmern"
- Magenta markiert: Lichtmodulationsbereich für Glühlampenlicht bei 50 Hz Netzfrequenz.

In der Grafik ist erkennbar, dass die CFD-Grenzwerte für den Bereich „Flimmerarm“ etwas toleranter sind, als die nach IEEE 1789, jedoch deutlich schärfer als nach UL. Das Licht einer Glühlampe gilt nach IEEE 1789 schon als risikoreich, obwohl 100 Jahre Erfahrung zeigen, dass kein Risiko besteht. Das Prädikat „Flimmerfrei“ ist mit dem CFD als Maßstab anspruchsvoller als nach IEEE 1789.

Einer Erklärung nach Plausibilität bedarf es bei IEEE 1789, wie es zu einem Qualitätssprung von 99 Hz nach 100 Hz um den Faktor 3,3 kommt. Die Physiologie ist kaum der Grund dafür, der Übergang müsste fließend sein.

Bei der Bewertung nach UL ist der Grenzwert für „flimmerarm“ bei einer Modulation von 30% bei 20 Hz äußerst zweifelhaft, was auch IEEE 1789 gegenüber bei einem Grenzwert von 0,5% mit dem Faktor 60 einen großen Widerspruch darstellt.

2.4. Beispiele mit Messergebnissen

Die folgenden Bilder zeigen Ausschnitte von Lichtemissionskurven mit Lichtmodulationen verschiedener Lichtquellen jeweils aufgezeichnet mit dem System von Der Lichtpeter bei einer Abtastfrequenz von 500 kHz und einer Messdauer von 1,0 Sekunden.

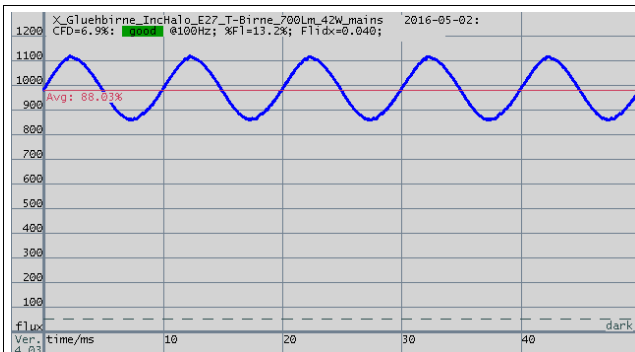


Bild 3: Glühlampe an 50 Hz Netzspannung

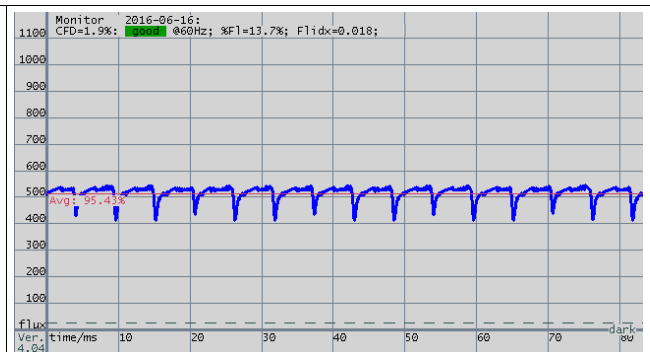


Bild 4: Computermonitor

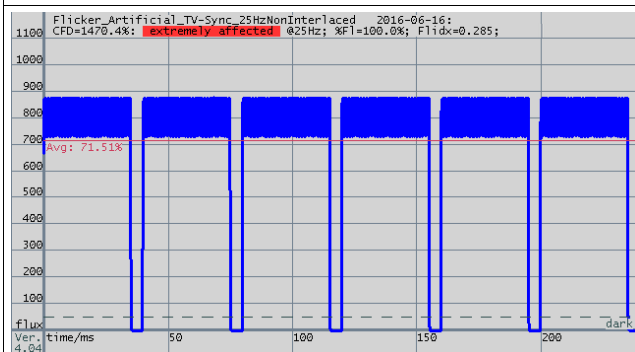


Bild 5: Fernsehbildschirm noninterlaced

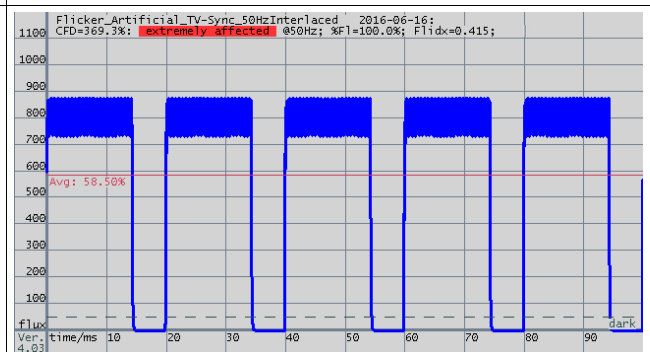


Bild 6: Fernsehbildschirm interlaced

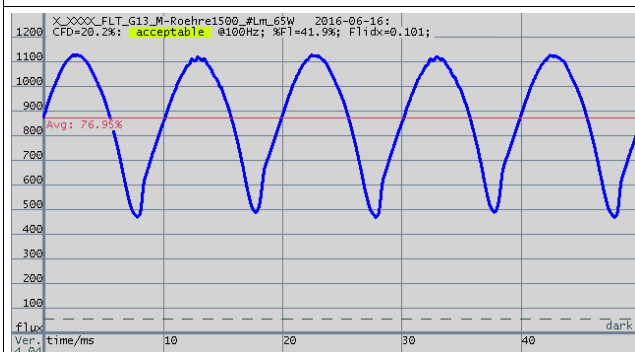


Bild 7: Leuchtstoffröhre mit KVG

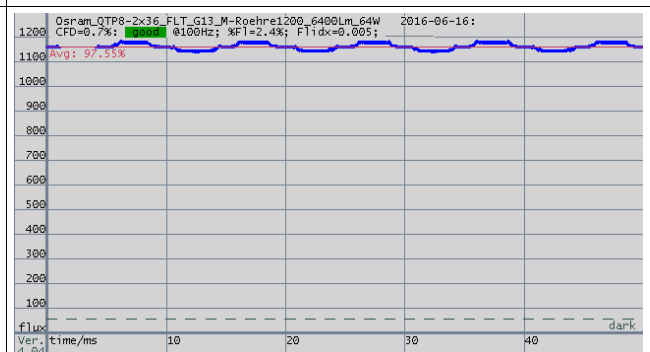


Bild 8: Leuchtstoffröhre mit EVG

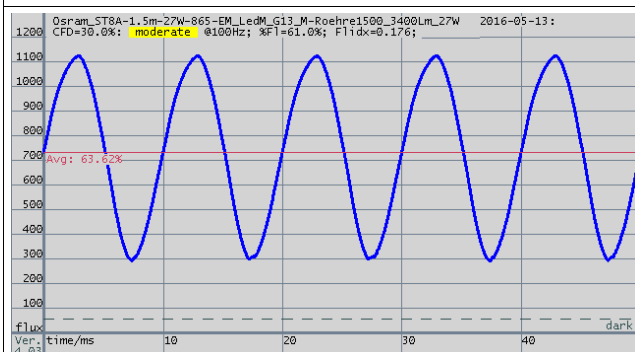


Bild 9: LED-Leuchtmittel mit moderater Vorschaltung

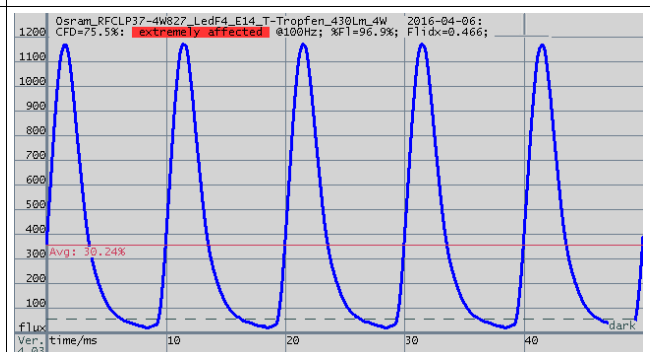


Bild 10: LED-Leuchtmittel mit ungenügender Vorschaltung

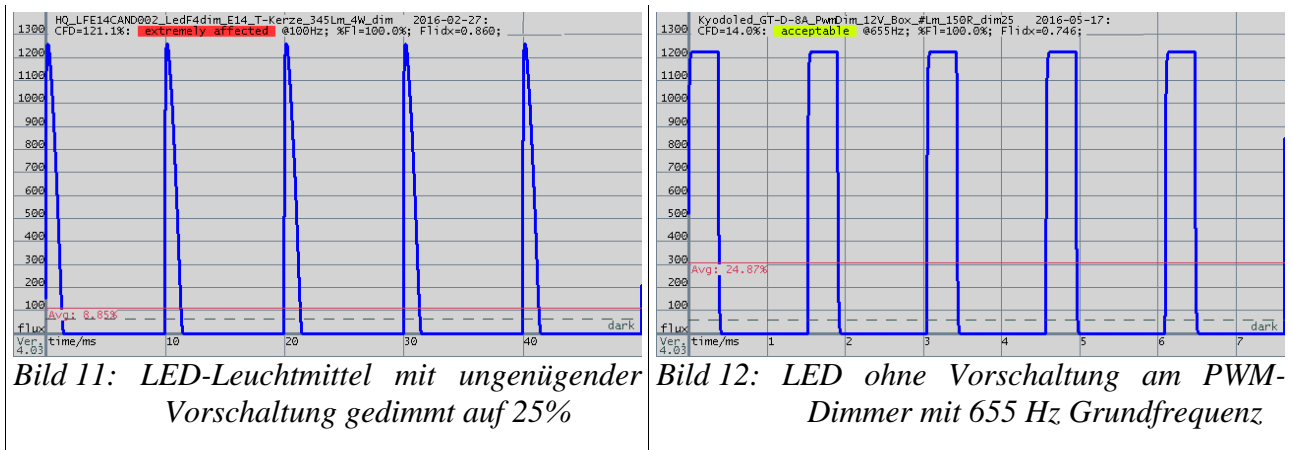


Tabelle 2: Bilder von Lichtemissionskurven

3. Schlussfolgerung

Um Licht hinsichtlich aller auf den Menschen und andere Wesen wirksamen Modulationen zu bemessen und zu beurteilen, sind alle Frequenzanteile bis zu 20 kHz in Betracht zu ziehen. Folglich ist die Berechnung nur auf der Frequenzebene möglich, wobei jede Einzelfrequenz gemäß dem Einfluss auf den Menschen gewichtet werden muss. Der Kompaktflimmergrad (**Compact Flicker Degree**) **CFD** erfüllt diese Anforderung und ist anwendbar auf jede Lichtquelle. Der CFD gibt mit einer einzelnen Prozentangabe ein leicht zu handhabendes Maß an die Hand des Anwenders und lässt damit eine quantitative Beurteilung einer Lichtquelle in Bezug auf die Lichtmodulation zu. Mit der Kategorisierung einem Ampelsystem entsprechend kann die optimale Einteilung in Qualitätsstufen vorgenommen werden.

Mit dem CFD als echter Messwert, sollten normativ Grenzwerte vorgegeben werden, und die Angabe des CFD in den technischen Daten obligatorisch sein.

Der Lichtpeter bietet einen Service Leuchtmittel und andere Lichtquellen in Bezug auf ihre Lichtmodulation vermessen zu lassen. Neben dem CFD werden auch die Ergebnisse aller anderen existierenden Messverfahren angegeben, auch um einen Vergleich zu ermöglichen.

Hersteller und Händler profitieren mit diesem Service und werden sich im Markt besser platzieren mit professionell als flimmerarm oder flimmerfrei zertifizierten Produkten. Auch um Produkte zu verbessern ist es wichtig die Lichtmodulation nicht aus den Augen zu lassen und entsprechende Messungen durchzuführen.

4. Literaturnachweise

- [1] **Autor:** Admesy B.V., Branskamp 5, 6014 CB Ittervoort, The Netherlands
Titel: Flicker measurement, display & lighting measurement, Jul 2015
Quelle: <http://www.admesy.nl/wp-content/uploads/TechNoteFlicker.pdf>
Seitenanzahl: 14 **Letzter Abruf:** 2016-05-20
- [2] **Autor:** Chroma Ate Inc. Morsestraat 32,NL-6716 AH Ede,The Netherlands
Titel: 7122 Flicker Application Presentation, Nov 2008
Quelle: <http://www.go-gddq.com/down/2014-04/14041612411934.pdf>
Seitenanzahl: 15 **Letzter Abruf:** 2016-05-20
- [3] **Autor:** Mark S. Rea
Titel: IESNA Lighting Handbook : Reference and Application 9th edition, Year 2000
Quelle: Buch ISBN 978-0-87995-150-4
Seitenanzahl: 1004
- [4] **Autor:** Lighting Research Center; Rensselaer Polytechnic Institute
Titel: ASSIST: Recommended metric for assessing the direct perception of light source flicker, Volume 11, Issue 3; Jan 2014
Quelle: <http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-FlickerMetric.pdf>
Seitenanzahl: 18 **Letzter Abruf:** 2016-05-20
- [5] **Autor:** M.Sc. Farhang Ghasemi Afshar
Titel: Electronic Drive for Low Wattage Metal Halide Lamps Focused on Acoustic Resonance in HID Lamps, Year 2009, Table 2.1 on page 39 (27)
Quelle: https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/2424/2/Dokument_47.pdf
Seitenanzahl: 198 **Letzter Abruf:** 2016-05-20
- [6] **Autor:** Wolfgang Jaschinski
Titel: Accommodation, convergence, pupil diameter and eye blinks at a CRT display flickering near fusion limit, Feb. 1996
Quelle: https://www.researchgate.net/publication/14354503_Accommodation_...
Seitenanzahl: 135 **Letzter Abruf:** 2016-05-20
- [7] **Autor:** Naomi J. Miller, Brad Lehman
Titel: FLICKER: Understanding the New IEEE Recommended Practice, May 2015
Quelle: http://energy.gov/sites/prod/files/2015/05/f22/miller+lehman_flicker_lightfair2015.pdf
Seitenanzahl: 26 **Letzter Abruf:** 2016-05-20
-