

Schierz, Christoph:

**Schnelle zeitliche Lichtmodulationen:
Zum technischen Stand der Flimmerbewertung**

DOI: [10.22032/dbt.51573](https://doi.org/10.22032/dbt.51573)

URN: [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2022200128](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2022200128)

Original veröffentlicht in: LICHT 2021 : 21.-24.03., online : Tagungsband zum 24. Europäischen Lichtkongress. - Berlin : Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LITG), 2021, S. 100-109.

Conference: Europäischer Lichtkongress ; 24 (Online) : 2021.03.21-24

URL: <https://www.licht2021.de/>

Original published: 2021

Schnelle zeitliche Lichtmodulationen: Zum technischen Stand der Flimmerbewertung

Christoph Schierz, christoph.schierz@tu-ilmenau.de

TU Ilmenau, FG Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau, Deutschland

1 Zusammenfassung

Flimmern kann unter Umständen zu Kopfschmerzen und Augenbeschwerden führen. Dies war lange Zeit ein Problem von Leuchtstofflampen, welche aber heute mit elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) ohne sichtbares Flimmern betrieben werden können. Auch wenn LEDs mit Pulsweitenmodulation oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz betrieben werden, sind Störungen und Beschwerden infolge von Stroboskopeffekten möglich: Bewegte Objekte scheinen sich ruckartig fortzubewegen. Technische Anforderungen um dies zu verhindern, werden zurzeit erarbeitet und sind für Teilbereiche bereits in EU-Richtlinien eingeflossen. In diesem Übersichtsvortrag wird der aktuelle Stand der Beschreibung, technischen Bedeutung, Wirkung auf den Menschen und der Bewertung von Flimmern und Stroboskopeffekten präsentiert.

2 Einleitung

Ursache für den Eindruck von Flimmern (engl. *flicker*) und von Stroboskopeffekten sind sich schnell folgende periodische Änderungen des Lichtstroms einer Beleuchtung (engl. *temporal light modulation*, TLM). Es gibt verschiedene Kennzahlen, welche diese Änderungen charakterisieren. Die wichtigsten sind die Frequenz als Kehrwert der Periodendauer, die Modulationstiefe und bei gepulstem Licht der Tastgrad (engl. *duty cycle*), siehe Abb. 1. Da diese Größen nicht von der Geometrie abhängen, gelten sie auch für periodische Änderungen von Beleuchtungsstärken oder Leuchtdichten.

3 Technische Bedeutung zeitlicher Lichtmodulationen

Seit der Einführung von Gasentladungslampen sind Störungen durch Flimmern festgestellt worden. Der Lichtstrom bei dieser Lampenart folgte der oszillierenden elektrischen Versorgungsspannung. Hingegen glüht bei Glühlampen der erhitzte Draht nach, so dass ein Flimmern kaum wahrgenommen werden kann. Mit elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) werden störende Flimmererscheinungen und Stroboskopeffekte von Leuchtstofflampen vollständig vermieden. Elektronische Vorschaltgeräte für Halogen-Metaldampflampen arbeiten im Rechteckbetrieb mit Frequenzen zwischen 130 Hz und 170 Hz. Flimmern ist damit nicht mehr wahrnehmbar, jedoch sind Stroboskopeffekte möglich. Für LEDs gibt es verschiedene Möglichkeiten des Dimmens: Sie werden entweder durch Stromabsenkung (engl. *constant current reduction*, CCR) gedimmt oder durch Pulsweitenmodulation (PWM), siehe Abb. 2.

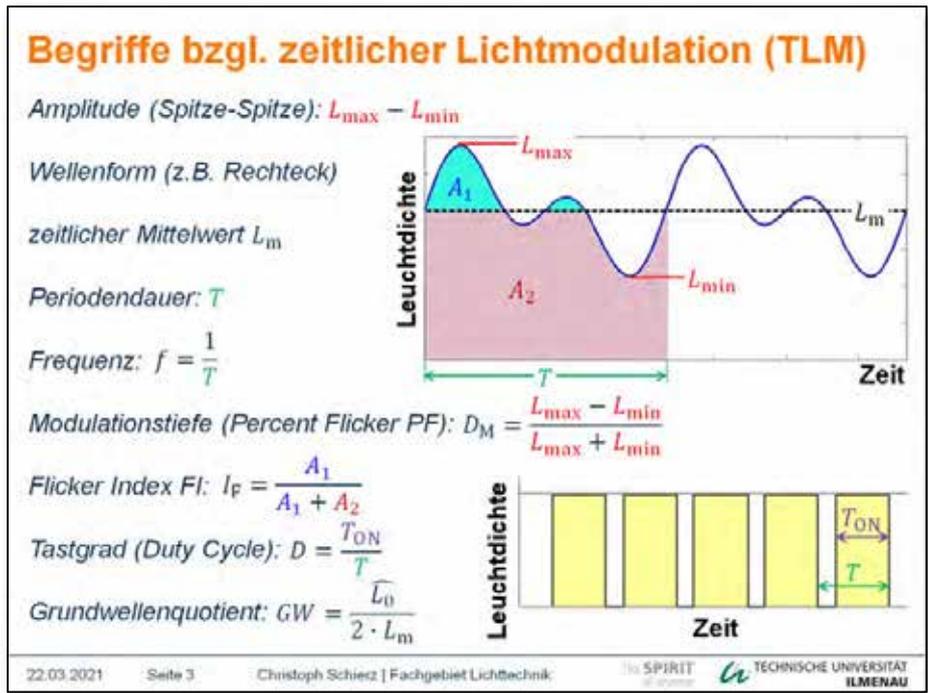


Abb. 1: Größen zur Beschreibung der zeitlichen Lichtmodulation (engl. *temporal light modulation*, TLM). Für eine Bewertung der Wirkung von Flimmern auf den Menschen sind sie nur bedingt geeignet, da sie nur Teilaspekte der Lichtmodulation erfassen und die Eigenschaften des Menschen nicht berücksichtigen.

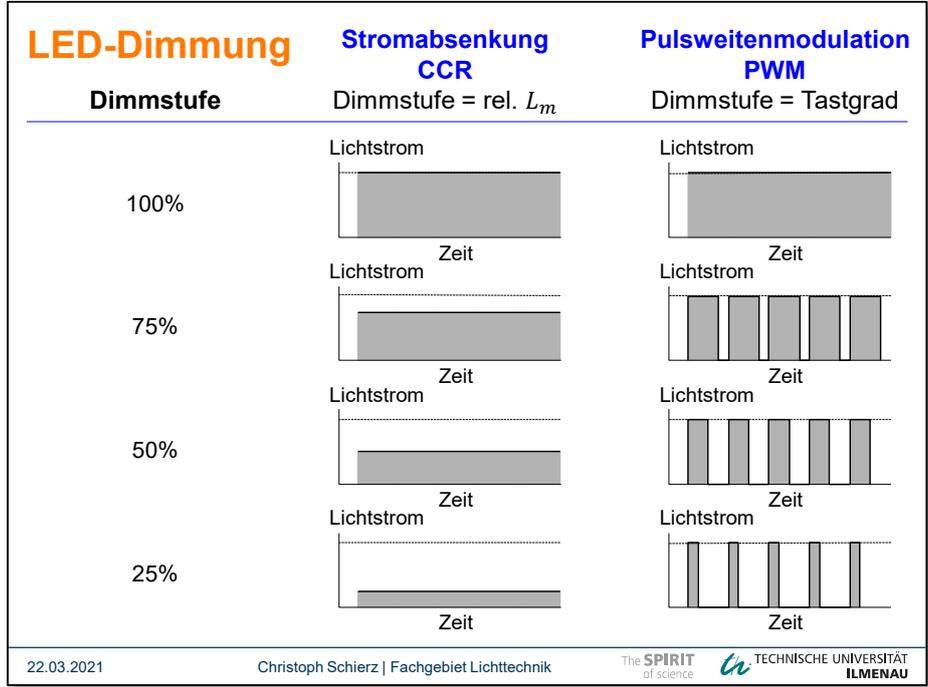


Abb. 2: Zwei verschiedene Methoden der Lichtdimmung bei LED-Beleuchtung. Links: Stromabsenkung (CCR); Rechts: Pulsweitenmodulation (PWM) mit unterschiedlichem Tastgrad, der hier mit der Dimmstufe übereinstimmt.

Stromabsenkung vermeidet Flimmern und Stroboskopeffekte. Nachteilig bei geringen Dimmstufen sind Veränderungen der Lichtfarbe und, bedingt durch die Exemplarstreuung, dass einzelne LEDs bereits ausschalten, während andere noch Licht erzeugen. Diese Nachteile fehlen bei der PWM, bei der das Licht in schneller Folge maximal ein und ausgeschaltet wird, wobei das Zeitverhältnis der zwei Zustände den Dimmungsgrad bestimmt. Nachteile können mechanische und akustische Schwingungen sein. PWM kann aus Gründen der Leistungsanpassung auch bei vermeintlich ungedimmten Systemen vorkommen. Es gibt auch Betriebsgeräte, die beim Dimmen die Vorteile beider Verfahren kombinieren. Sie dimmen z. B. hinunter bis 30% mit Stromabsenkung und fahren dann für geringere Dimmstufen mit PWM fort.

4 Wirkungen zeitlicher Lichtmodulationen auf den Menschen

Die folgende, unvollständige Liste zeigt beispielhaft mehr oder weniger gut erforschte Wirkungen von TLM auf den Menschen. Für die Prävention werden bislang die beiden sogenannten *temporal light artefacts* (TLA) Flimmerwahrnehmung und Stroboskopeffekt herangezogen; Abb.3, /3/.

- visuelle Wahrnehmung von Flimmern
- unterbrochene Augenbewegungen
- Stroboskopeffekt
- Geisterbilder
- rotierende Maschinen
- asthenopische Beschwerden
- neuronale Aktivitätsänderungen
- Kopfschmerzen / Migräne
- Ermüdung
- photosensitive Epilepsie
- kognitive Leistung
- Unbehaglichkeit

Begriffe bzgl. zeitlicher Lichtartefakte (TLA)
nach CIE TN 006:2016

- **Flimmern** (engl. *flicker*):
Von einem **statischen Beobachter** in einer **statischen Umgebung** wahrgenommene visuelle Unstetigkeit, die durch einen Lichtreiz verursacht wird, dessen Leuchtdichte oder Spektralverteilung zeitlich schwankt.
- **Stroboskopeffekt** (engl. *stroboscopic effect*):
Von einem **statischen Beobachter** in einer **nicht statischen Umgebung** wahrgenommene Änderung von Bewegung, die durch einen Lichtreiz verursacht wird, dessen Leuchtdichte oder Spektralverteilung zeitlich schwankt.
- **Geisterbilder** (engl. *phantom array effect / ghosting*):
Von einem **nicht statischen Beobachter** in einer **statischen Umgebung** wahrgenommene Änderung der Form oder räumlichen Position von Objekten, die durch einen Lichtreiz verursacht werden, dessen Leuchtdichte oder Spektralverteilung zeitlich schwankt.

22.03.2021 Christoph Schierz | Fachgebiet Lichttechnik The SPIRIT of science  TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU

Abb. 3: Definitionen der Begriffe Flimmern, Stroboskopeffekt und Geisterbilder (engl. *ghosting*). Stroboskopeffekte und Geisterbilder sind in der Praxis manchmal schwierig zu unterscheiden. Geisterbilder sind bis jetzt wenig untersucht worden.

4.1 Visuelle Wahrnehmung von Flimmern

Die *Flimmerverschmelzungsfrequenz* (FVF) ist die Frequenz einer schnellen periodischen Lichtänderung, bei der ein Flimmern in eine gleichbleibende visuelle Empfindung übergeht. Unterhalb der Verschmelzungsfrequenz kann das Flimmern zu Störungen der Aufmerksamkeit, des Wohlbefindens und zu Sehbeschwerden, sogenannten asthenopischen Beschwerden führen /14/. Diese traten früher besonders bei CRT-Monitoren und Entladungslampen geringer Lichtwechselfrequenz auf. Licht mit Frequenzen unter 70 Hz kann bei photosensitiven Personen epileptische Anfälle auslösen /6/.

In Abb. 4 werden die Schwellen für Flimmerwahrnehmung, abhängig von der Frequenz für zwei Größen (in Sehwinkel) des flimmernden Feldes dargestellt /4//10/. Bei einer Innenraumbeleuchtung ist davon auszugehen, dass das Licht im gesamten Gesichtsfeld flimmert und daher das große Feld gilt. Die FVF steigt mit zunehmender Adaptationsleuchtdichte; Abb. 5, /11/. In hellen Innenräumen, bei maximaler Modulation werden Frequenzen bis 90 Hz erkannt.

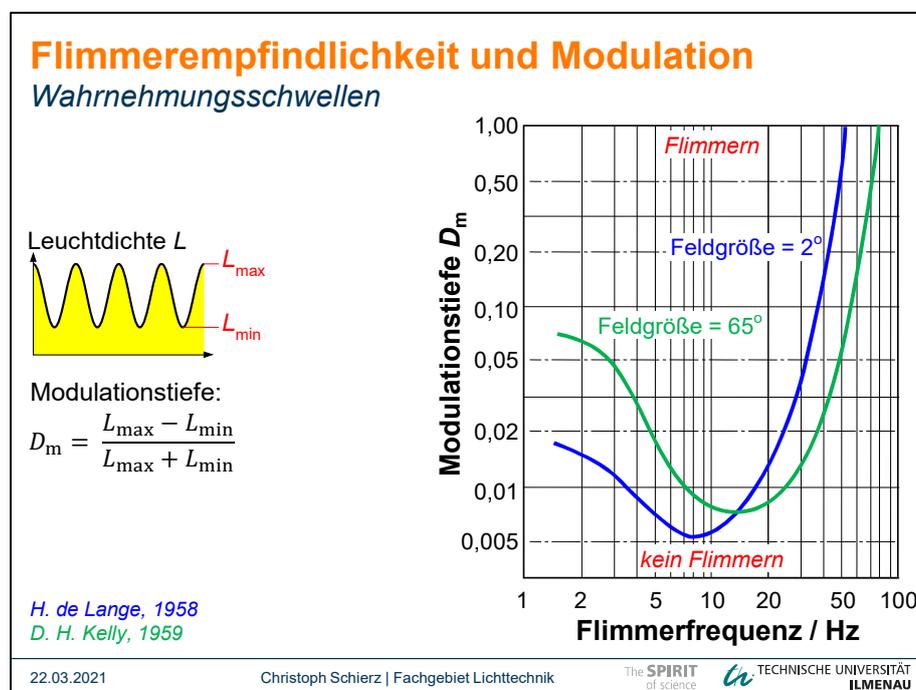


Abb. 4: Wahrnehmungsschwellen bei sinusförmigen Lichtänderungen in Abhängigkeit der Frequenz, für zwei Feldgrößen. Beim 65° -Feld ist die größte Empfindlichkeit bei etwa 15 Hz: Da genügt bereits eine Modulationstiefe von $<1\%$; bei 80 Hz wird Flimmern erst bei der maximalen Modulation $D_m = 1$ sichtbar. Signale sehr geringer als auch sehr hoher Frequenzen werden abgeschwächt (Bandpassverhalten).

Die FVF steigt auch mit dem Peripheriewinkel im Gesichtsfeld; Abb. 6, /7/. Sich dort bewegende Objekte erregen die Aufmerksamkeit, während man sich auf foveale Objekte konzentriert. Das löst in der Folge eine Augendrehung hin zum Gegenstand aus. Flimmern einer Beleuchtungsanlage oder eines Bildschirms ist daher am deutlichsten erkennbar, wenn diese nicht direkt, sondern etwa 30° daneben angesehen werden.

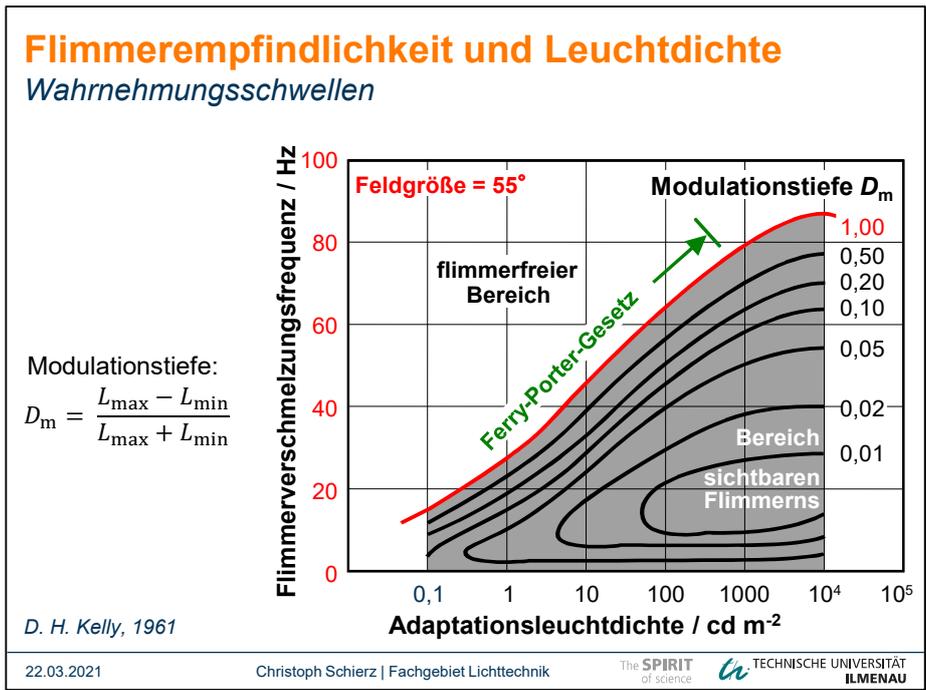


Abb. 5: Die Flimmerverschmelzungsfrequenz in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte und der Modulationstiefe für ein großes flimmerndes Feld (55° Sehwinkel), wie er bei einer flimmernden Innenraumbeleuchtung vorkommt.

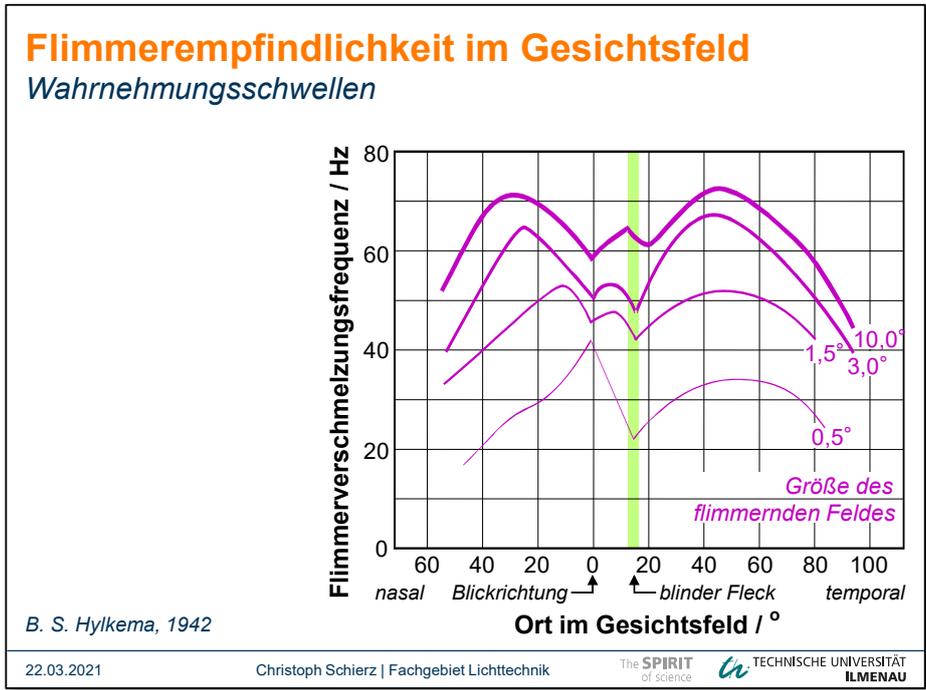


Abb. 6: Flimmerverschmelzungsfrequenz in Abhängigkeit vom Ort im Gesichtsfeld und von der Größe des flimmernden Feldes. Flimmern ist in der Peripherie des Gesichtsfeldes deutlicher sichtbar als in der Fovea.

4.2 Stroboskopeffekte

Von Flimmern zu unterscheiden ist der *Stroboskopeffekt*. Er wird bei rechteckförmig gepulstem Licht besonders deutlich, etwa bei PWM-Dimmung von LEDs; Abb. 7, /2/. Bewegt sich ein beleuchtetes Sehobjekt relativ zur Blickrichtung, entsteht sein Bild auf der Netzhaut nacheinander an verschiedenen Stellen und wird durch die zwischenzeitliche Lichtunterbrechung wahrgenommen, als ob es springen würde.

Stroboskopeffekte können stören oder bei rotierenden Maschinen zu einer Gefahr werden. Die Grenzen für die Wahrnehmung des Stroboskopeffekts hängen wie bei der Flimmerverschmelzungsfrequenz von der Modulationstiefe des Lichtes ab, liegen aber je nach Umständen bei 4- bis 10-mal höheren Pulsationsfrequenzen.

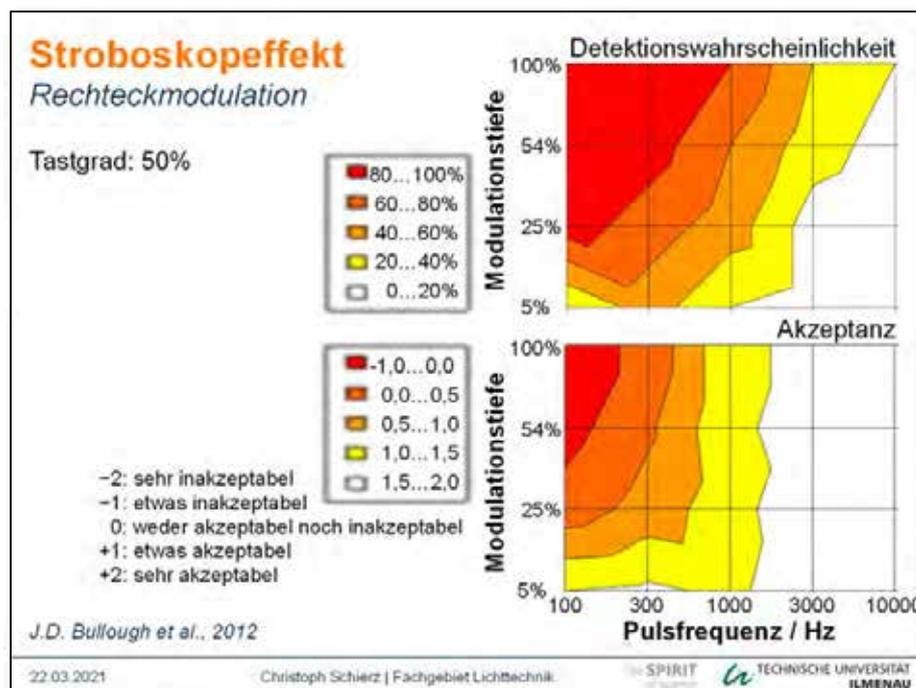


Abb. 7: Detektionshäufigkeit (oben) und Akzeptanz (unten) für Stroboskopeffekte in Abhängigkeit von Frequenz und Modulationstiefe (Bürotätigkeit unter einer LED-Arbeitsplatzleuchte mit PWM). Der Tastgrad betrug 50%. Der Effekt ist noch bei Pulsfrequenzen von über 1000 Hz wahrnehmbar, ist aber akzeptabel.

5 Bewertung von zeitlichen Lichtmodulationen

5.1 Bewertung des Flimmerns

Zur Bewertung von Flimmern dient ein vom sogenannten „Flickermeter“ aus der Elektrotechnik abgeleitetes Verfahren, das die Frequenzabhängigkeit der Flimmerverschmelzungsfrequenz berücksichtigt; Abb. 8, /8/. Die mit dem Verfahren ermittelte Kenngröße heißt P_{st}^{LM} (engl. *short term light flicker method*). Ein Wert von $P_{st}^{LM} = 1$ bedeutet, dass ein durchschnittlicher Beobachter das Flimmern mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % erkennt.

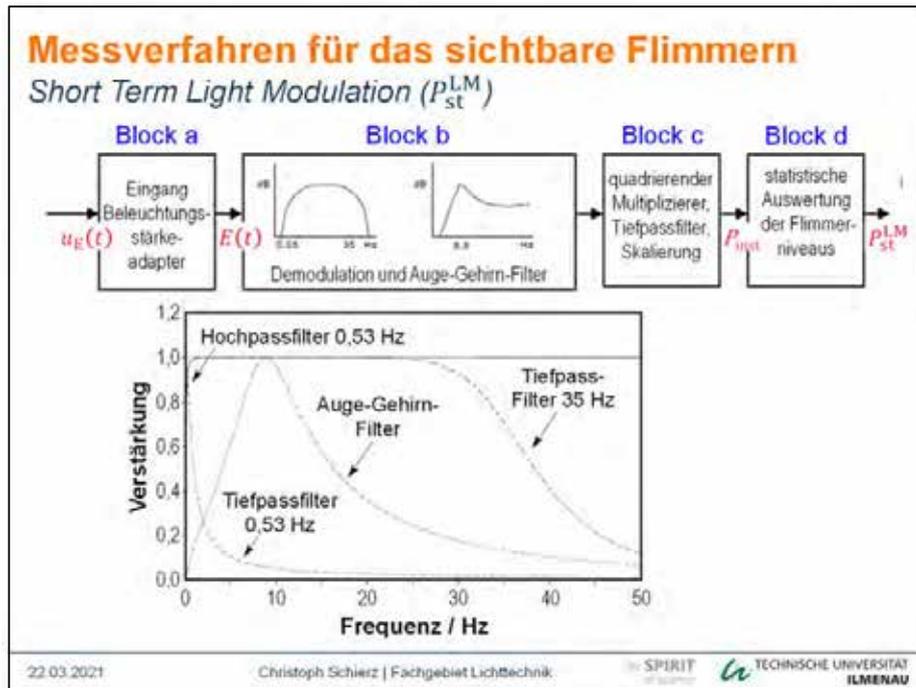


Abb. 8: Vom „Flickermeter“ abgeleitetes Verfahren zur Bestimmung des P_{st}^{LM} für eine Beobachtungsdauer von 10 min. Die Blöcke berücksichtigen (a) eine Normierung des Eingangssignals, (b) die Bandpassfilterung der Wahrnehmung (s. Abb.4), (c) die Nichtlinearität des Auges und (d) die Zeitintegration.

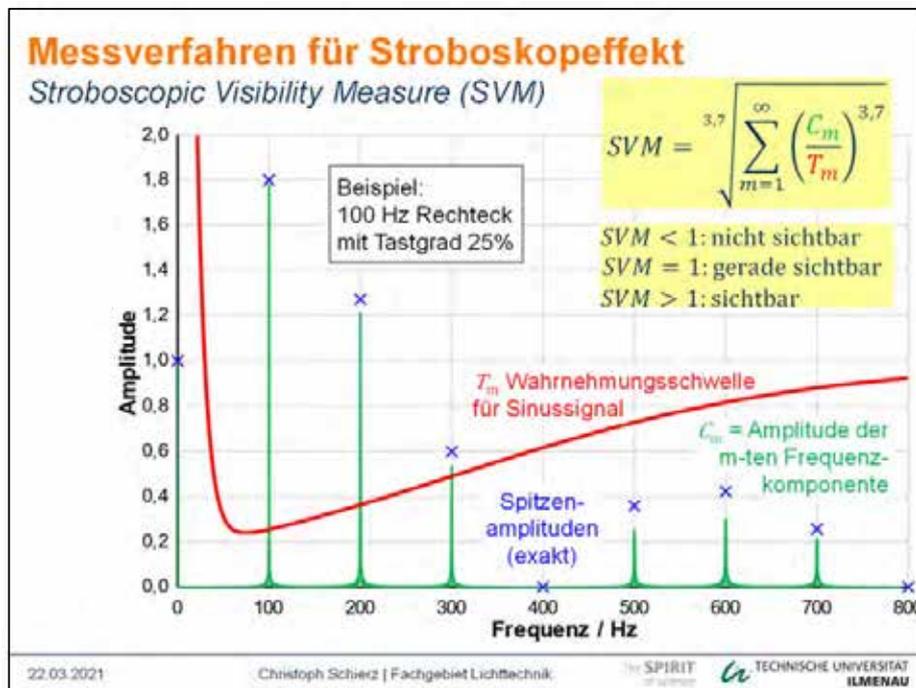


Abb. 9: Grün: Frequenzspektrum einer 100-Hz-PWM mit 25% Tastgrad. Die Hauptfrequenz 100 Hz ist am stärksten im Signal vorhanden, die Amplituden der Oberwellen (Nebenfrequenzen 200 Hz, 300 Hz etc.) sind geringer. Blau: Mathematisch exakt berechnete Spitzenamplituden. Rot: Wahrnehmungsschwelle für Stroboskopeffekte.

5.2 Bewertung des Stroboskopeffekts

Zur Bewertung von Stroboskopeffekten hat sich das SVM-Bewertungsverfahren (engl. *stroboscopic visibility measure*, SVM) durchgesetzt. Zur Ermittlung der Wahrnehmungsgrenzen beurteilten Testpersonen (ca. 20- bis 40-jährig) bewegte Sehobjekte maximalen Kontrasts unter verschiedenen zeitlich modulierten Beleuchtungen /13/. Die Geschwindigkeit der Sehobjekte im Experiment entsprach etwa einer maximal schnellen Handbewegung, wie sie am Arbeitsplatz vorkommen kann. Schnellere Bewegungen, z. B. von Maschinenteilen, berücksichtigt dieses Verfahren somit nicht.

Abb. 9 zeigt in Rot die Wahrnehmungsschwelle für einen durchschnittlichen Beobachter, für die $SVM = 1$ gilt, in Grün das Beispiel einer Frequenzanalyse eines Signals, sowie die Formel zur SVM-Berechnung. Die Amplitude jeder enthaltenen Frequenz wird durch den Schwellenwert dividiert und dann über alle Frequenzen aufsummiert. Zudem wird mit dem Exponenten 3,7 eine Nichtlinearität berücksichtigt, die sich (ohne physiologische Begründung) empirisch aus den Daten ergeben hat.

6 Präventionsansätze

Die Ökodesignrichtlinie der EU /5/, welche ab 1. September 2021 gilt, fordert für LED- und OLED-Netzspannungslichtquellen unter Volllastbetrieb $P_{st}^{LM} \leq 1$ und $SVM \leq 0,9$ (ab 1. September 2024: $SVM \leq 0,4$). Ausnahmen für den SVM-Wert gibt es für Lichtquellen, die für Anwendungen im Freien, Industrieanwendungen oder sonstige Anwendungen bestimmt sind, in denen die Beleuchtungsnormen einen allgemeinen Farbwiedergabeindex $R_a < 80$ ermöglichen.

Für Lichtquellen nicht unter Volllastbetrieb (z. B. gedimmt), oder für Lichtquellen, deren Betrieb nur mit separaten Betriebsgeräten erfolgt, sowie für die Bewertung am Arbeitsplatz liegen noch keine Bewertungsverfahren oder Grenzwerte vor. So muss am Arbeitsplatz beispielsweise auch berücksichtigt werden, dass mehrere, nicht synchron flimmernde Lichtquellen eine geringere Modulationstiefe bewirken könnten und dadurch weniger kritisch sind.

Die zur Vermeidung von sichtbarem Flimmern einzuhaltende Grenze $P_{st}^{LM} \leq 1$ ist relativ unbestritten und wird von den meisten Lichtquellen eingehalten, da diese mit Frequenzen ≥ 100 Hz betrieben werden. Der Festlegung der Grenze für den SVM bei 0,4 gingen heftige Diskussionen voran, die sich aus dem Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit bei der Lichtquellenherstellung und dem Schutzgedanken vor Stroboskopeffekten ergeben.

Dass der SVM unterhalb der Wahrnehmungsschwelle von 1,0 liegt, kann damit begründet werden, dass 0,4 nicht nur den durchschnittlichen Beobachter, sondern auch Risikogruppen schützen soll. Jüngere Personen können Flimmern besser wahrnehmen /1/. Der Einfluss des Alters bei der Wahrnehmung von Stroboskopeffekten ist bislang kaum untersucht worden.

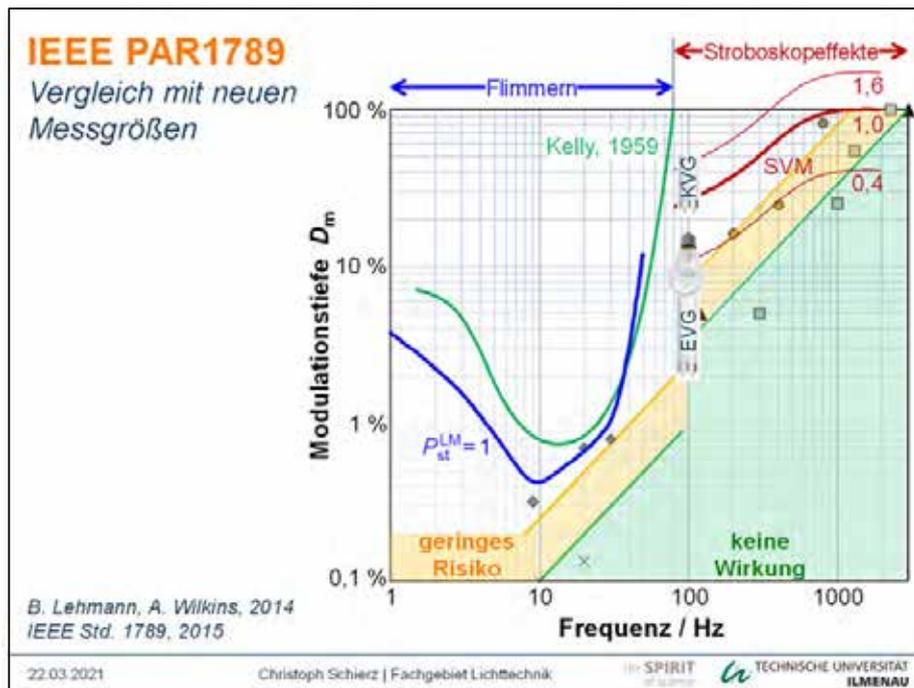


Abb. 10: Flächen: Risikobewertung nach IEEE. Blau $P_{st}^{LM} = 1$ und rot SVM = 1 für sinusförmige Lichtmodulation. Grüne Kurve: Schwellenkurve für 65°-Felder (s. Abb. 4). Ungefährere Bereiche für Leuchtstofflampen mit KVG und EVG, sowie für Glühlampen.

Abb. 10 fasst die Grenzwerte für Flimmerwahrnehmung und Stroboskopeffekte zusammen, unterlegt mit einem Vorschlag der IEEE /9//12/. Letzterem liegt eine Risikobewertung zu Grunde, die Stärke der Auswirkung und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens berücksichtigend. Er kann aber nur sinusförmige Modulationen bewerten.

7 Schlussfolgerungen

- Es sind verschiedene visuelle und gesundheitliche Auswirkungen von TLM bekannt, die sich in Stärke und Auftretenswahrscheinlichkeit unterscheiden.
- Für Flimmern wurden die Wahrnehmungsgrenzen als Flimmerverschmelzungsfrequenz bestimmt. Diese hängen u. a. von der Größe des flimmernden Feldes, der Modulationstiefe, der Adaptationsleuchtdichte und der Position im Gesichtsfeld ab.
- Für Stroboskopeffekte wurden Wahrnehmungsgrenzen mit bewegten Sehobjekten maximalen Kontrasts ermittelt. Deren Geschwindigkeit entspricht einer maximal schnellen Handbewegung.
- Es gibt Messverfahren für beliebige periodische Signalformen: P_{st}^{LM} für die Begrenzung von Flimmern, SVM für diejenige von Stroboskopeffekten.
- Noch offene wissenschaftliche und technische Fragen sind:
 - Wahrnehmungsschwellen sind kein Garant für Akzeptanz.
 - Gibt es besonders empfindliche Personen? Verteilung in der Bevölkerung?
 - In den Experimenten wurden oft nur Sehobjekte in kleinen Bereichen beleuchtet.
 - Was sind die Signalformen im Alltag, bei Kombination verschiedener Lichtquellen?
 - Stroboskop-Bewertungsverfahren für schneller bewegte Objekte?
 - Bewertungsverfahren zur Vermeidung von Geisterbildern (*phantom array effect*).

8 Literaturverzeichnis

- /1/ Bobon, D.; Lecoq, A.; Mormont, I. (1982): Possible sensitivity to aging of an overlooked CFF variable: The repetition of measurements. *Pharmacopsychiatry* 15 (S 1), 57–60.
<https://doi.org/10.1055/s-2007-1019552>.
- /2/ Bullough, John D.; Hickcox, K. S.; Klein, T. et al. (2012): Detection and acceptability of stroboscopic effects from flicker. *Light. Res. Technol.* 44 (4) 477-483.
<https://doi.org/10.1177/1477153511414838>.
- /3/ CIE Technical Note TN 006 (2016): Visual aspects of time-modulated lighting systems.
- /4/ De Lange Dzn, H. (1958): Research into the dynamic nature of the human fovea → Cortex systems with intermittent and modulated light. I. Attenuation characteristics with white and colored light. *J. Opt. Soc. Am.* 48 (11) 777-784.
<https://doi.org/10.1364/JOSA.48.000777>.
- /5/ EU (2019): Verordnung (EU) 2019/2020 der Kommission vom 1. Oktober 2019 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Lichtquellen und separate Betriebsgeräte.
<http://data.europa.eu/eli/reg/2019/2020>
EU (2021): Verordnung (EU) 2021/341 (Änderung der EU V 2019/2020)
<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/341>
- /6/ Harding, G. F. A.; Jeavons, P. (1994): Photosensitive Epilepsy. Mac Keith Press.
- /7/ Hylkema, B. S. (1942): Examination of the visual field by determining the fusion frequency. *Acta Ophthalmologica* 20 (2) 181-193.
<https://doi.org/10.1111/j.1755-3768.1942.tb07974.x>.
- /8/ IEC/TR 61547-1 (2015): Equipment for general lighting purposes. EMC immunity requirements. Part 1: An objective voltage fluctuation immunity test method.
- /9/ IEEE Std 1789 (2015): IEEE Recommended practices for modulating current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7118618>.
- /10/ Kelly, D. H. (1959): Effects of sharp edges in a flickering field. *J. Opt. Soc. Am.* 49 (7) 730f.
<https://doi.org/10.1364/JOSA.49.000730>.
- /11/ Kelly, D. H. (1961): Visual responses to time-dependent stimuli. I Amplitude sensitivity measurements. *J. Opt. Soc. Am.* 51 (4) 422-429.
<https://doi.org/10.1364/JOSA.51.000422>.
- /12/ Lehman, B.; Wilkins, A. J. (2014): Designing to mitigate effects of flicker in LED lighting: Reducing risks to health and safety. *IEEE Power Electron. Mag.* 1 (3) 18-26.
<https://doi.org/10.1109/MPEL.2014.2330442>.
- /13/ Perz, M.; Vogels, I. M.; et al. (2015): Modeling the visibility of the stroboscopic effect occurring in temporally modulated light systems. *Light. Res. Technol.* 47 (3) 281-300.
<https://doi.org/10.1177/1477153514534945>.
- /14/ Wilkins, A. J.; Nimmo-Smith, I.; Slater, A. I.; Bedocs, L. (1989): Fluorescent lighting, headaches and eyestrain. *Light. Res. Technol.* 21 (1), S. 11–18.
<https://doi.org/10.1177/096032718902100102>.

Hinweis: Bei der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft LiTG ist für 2021 eine Schrift „Störungen und gesundheitliche Beeinträchtigung durch das Flimmerverhalten künstlicher Lichtquellen“ in Vorbereitung.