

Lichtflimmern: Stand der Wissenschaft

Wenn bei Digitalkameras im Bild einzelne Streifen erscheinen, ein Barcode-Scanner den Artikel nicht erfassen kann, der TAN Generator keinen Pincode erzeugt oder die Sauerstoffsättigung von einem Pulsoximeter falsch angezeigt wird, ist dies ein Hinweis auf eine flimmernde Lichtquelle im Umfeld. Der Artikel beschreibt den aktuellen Stand von Ursachen, biologischen Wirkungen, Messverfahren und Bewertungen.

Was ist Lichtflimmern

Lichtflimmern bedeutet eine periodische Veränderung der Helligkeit oder des Lichtspektrums. Die möglichen Auswirkungen auf den Menschen werden neuerdings als **TLA**, das heißt **Temporäre Licht Artefakte** (oder engl. temporal light artefacts) bezeichnet. Hierbei unterscheidet man in solche Effekte, die direkt wahrnehmbar sind, wie z.B. das Flimmern einer älteren Leuchtstofflampe, aber auch solche Effekte, die zu einem Scheinbild führen, wenn z. B. ein sich real drehendes Rad stillzustehen scheint oder sich langsam rückwärts dreht.

Flimmerverschmelzungsfrequenz und Wahrnehmungen

Wesentlich für eine Unterscheidung, um welchen Effekt es sich handelt, ist die sogenannte Flimmerverschmelzungsfrequenz. Sie liegt in einen Bereich zwischen 60 Hz und 100 Hz, ist individuell unterschiedlich und hängt davon ab, wie photosensitiv ein Mensch ist. In der Regel wird sie mit 80 Hz angenommen. Lichtschwankungen eines Leuchtmittels unter 80 Hz sind unmittelbar direkt wahrnehmbar. Diese Wahrnehmung wird als Flimmern (engl flicker) bezeichnet.

Bei Frequenzen oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz, also über 80Hz, können unter bestimmten Bedingungen sogenannte Stroboskop- oder Perlschnureffekte auftreten. Während beim Flimmern das ruhende Auge auf eine ruhende Lichtquelle schaut, ist beim Stroboskopeffekt ein Objekt in Bewegung (z.B. ein Wagenrad oder ein Drehmaschinenfutter) während die Blickrichtung des Betrachters in Ruhe ist. Bewegt sich der Betrachter zu einem Objekt wie z. B. beim Vorbeifahren an einem LED Rücklicht, reiht sich die Lichtquelle im Auge wie an einer Perlschnur auf. Daher wird dies auch Perlschnureffekt genannt.

Abhängigkeiten der Flimmerwahrnehmung

Ob überhaupt und wie stark ein Flimmern unmittelbar wahrgenommen werden kann, hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z.B.

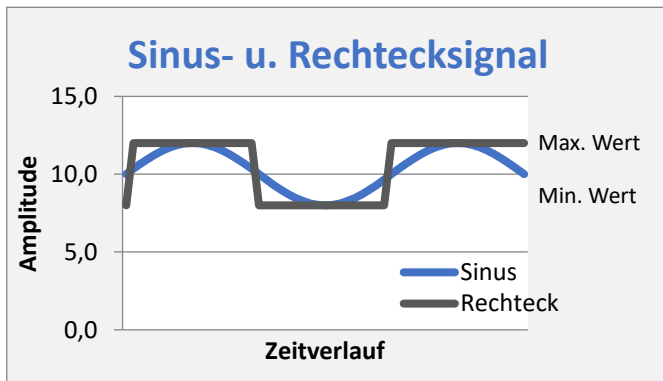
- Flimmerfrequenz
Sie ist die Frequenz der periodischen Lichtschwankungen einer Quelle. Die höchste Empfindlichkeit liegt bei einer beleuchteten Wand in einem Bereich zwischen 6 – 30 Hz mit einem Maximum bei rund 16 Hz. Oberhalb von 80 Hz wird in der Regel kein

Flimmern mehr wahrgenommen.

Stroboskopeffekte werden üblicherweise bis 2000 Hz nachgewiesen. Zum Vergleich: Glüh- oder Halogenlampen haben eine Frequenz von 100 Hz (doppelte Netzfrequenz). Bei Energiesparlampen liegt die Flimmerfrequenz zwischen 60 kHz und 100 kHz während LEDs je nach Hersteller üblicherweise zwischen 40 kHz und 70 kHz schwanken.

- Modulationstiefe

Die Modulationstiefe kennzeichnet die Amplitudendifferenz (Intensitätsunterschied)

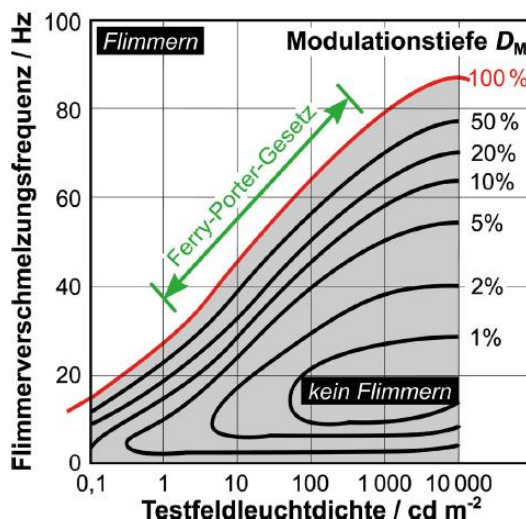


zwischen Maximal- und Minimalwert der messtechnisch ermittelten Helligkeit (Leuchtdichte). Sie liegt zwischen 0 (flimmerfrei) und 1 (maximales flimmern) Bei Messgeräten wird sie auch als flicker% Wert angegeben und korreliert mit der im SBM 2015 angegebenen Welligkeit (dort als Lichtflimmerprozentwert bezeichnet).

Je höher die Modulationstiefe ist, umso stärker treten die Wahrnehmungseffekte auf.

- Leuchtdichte

Gemäß einem von Ferry Porter gefundenen Gesetz ist die Flimmerverschmelzungsfrequenz abhängig von der



Leuchtdichte (Helligkeit) der betrachteten Quelle bzw. beleuchteten Fläche und verläuft quasi linear zum Logarithmus der Leuchtdichteveränderung. Je heller eine flimmernde Umgebung ist, des empfindlicher reagiert der menschliche Sehapparat auf das Flimmern. Dies zeigt die Zunahme der weißen Fläche in horizontaler Richtung. (Grafik: C. Schierz LITG 48)

- Sehfeld

Je punktueller eine Lichtquelle ist, des kleiner ist auch ihr Abbild auf der Netzhaut. Größere lichtgebende Flächen sprechen ein breiteres Sehfeld im Auge an. Ein Flimmern wird unter einem größeren Gesichtsfeld und bei etwa 30° zur Mitte der

Sehachse am stärksten wahrgenommen.

- Lichtfarbe

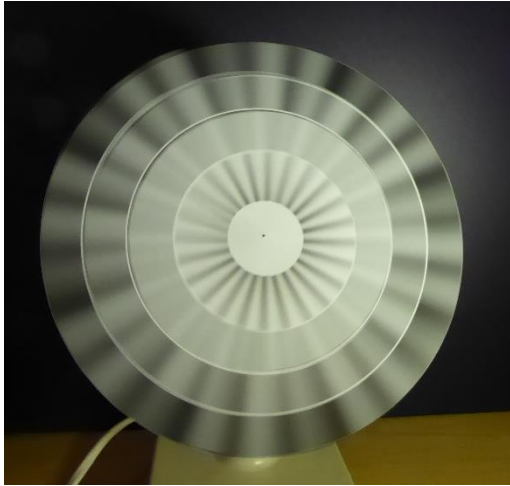
Auch die Lichtfarbe kann einen Einfluss auf die Flimmerempfindlichkeit besitzen. Eine Untersuchung mit farbigem Licht hat gezeigt, dass die Flimmerempfindlichkeit bei einer roten Lichtquelle ab 40 Hz geringer ist als bei weißen, gelben, grünen oder blauen Lichtquellen.

- Individuelle Faktoren

Hier spielt das Alter einer Person eine wesentliche Rolle. Am empfindlichsten reagieren 20-jährige Menschen, während ältere Menschen wegen der geringeren Lichtdurchlässigkeit ihrer Linse vom Flimmern weniger betroffen sind. Auch macht es einen Unterschied, ob mit einem oder mit beiden Augen die Flimmerwahrnehmung getestet wurde, da im letzteren Fall die Empfindlichkeit um ca 5 -8 % zunimmt. Medikamente wie z.B. Viagra oder Alkohol setzen die Flimmerempfindlichkeit herab, während andererseits Kaffee oder Amphetamine die Flimmerverschmelzungsfrequenz erhöhen. (

Abhängigkeiten der Stroboskopwahrnehmung

Aufgrund des zeitlichen Auflösungsvermögens des Auges ist eine direkte Wahrnehmung der Lichtschwankungen (flimmern) bis zu einer Frequenz von ca. 80Hz möglich. Die Effekte oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz werden als Stroboskopeffekte bezeichnet und treten besonders stark bei rechteckförmigen Lichtsignalen auf. Diese entstehen bei der sogenannten Pulsweitenmodulation (PWM). Hierbei handelt es sich um ein Dimmverfahren von LED's bei dem die Beleuchtung schlagartig periodisch mit voller Leistung eingeschaltet und wieder ausgeschaltet wird. Je kürzer die Zeit ist, in der das Leuchtmittel eingeschaltet ist, umso dunkler wird es. Ist das Licht z.B. die Hälfte einer Periode eingeschaltet und die restliche Zeit ausgeschaltet, entspricht dies einem Tastgrad von 50% bzw. einer mittleren Helligkeit. Folge dieser Pulsung ist das Vorhandensein von etlichen Oberwellen mit einem Mehrfachen der Grundfrequenz. Die PWM wird oftmals bei der Helligkeitssteuerung von Computermonitoren eingesetzt. Generell sind für die Wahrnehmung von Stroboskopeffekte folgende Faktoren bedeutsam:



Frequenz 100 Hz Flicker%:0,93 LED



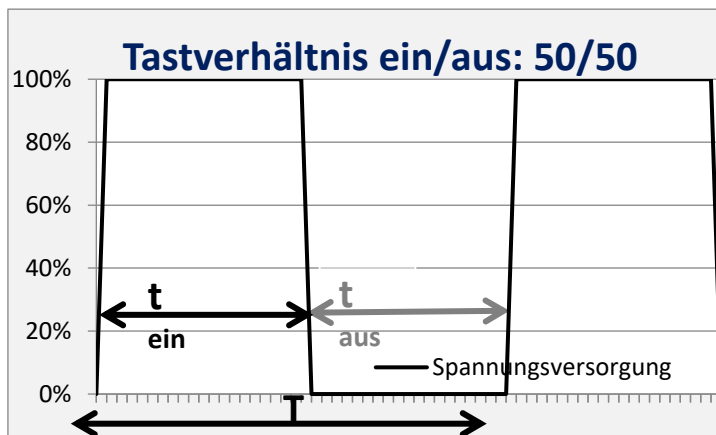
Frequenz 100 Hz Flicker%:0,13 Glühlampe

Grundfrequenz der Lichtwelligkeit

Stroboskopeffekte mit Pulsweitenmodulation können in Abhängigkeit von der Drehzahl bzw. Bewegungsgeschwindigkeit des Objekts Effekte bis zu 20 kHz in der Lichtmodulation wahrgenommen werden. Generell gilt, je höher die Grundfrequenz ist, mit der ein Leuchtmittel pulsiert, desto geringer sind Stroboskopeffekte wahrnehmbar. Es wird empfohlen die Grundfrequenz der Lichtmodulation auf über 400 Hz zu setzen.

Tastgrad bei PWM

Der Tastgrad bei der PWM, also das Verhältnis zwischen Ein- und Ausschaltdauer einer Licht-



quelle, ist ein wesentlicher Faktor für die Wahrnehmung von Stroboskopeffekten. Es hat sich gezeigt, dass bei einem Verhältnis von 30 bis 50% Einschaltdauer (Leuchtmittel an) zu Ausschaltzeit (Leuchtmittel aus) eine Wahrnehmung des Stroboskopeffektes am größten ist.

Zusätzliche Einflussfaktoren

Insgesamt sind Untersuchungen über die Einflussfaktoren auf Stroboskopeffekte nicht so zahlreich wie die auf das Flimmern. Allgemein gilt aber, dass auch Wellenformen, Hintergrundbeleuchtung und die Bewegungsgeschwindigkeit des sich bewegenden Objektes zusätzlich die Wahrnehmung der Stroboskopeffektes beeinflussen.

Gesundheitlich Auswirkungen der temporären Lichtartefakte

In wissenschaftlichen Untersuchungen an Arbeitsplätzen im vergangenen Jahrhundert ging es zunächst um den Einfluss des Flimmerns von CRT-Computermonitoren und Leuchtstoffröhren bei Beschwerden der Beschäftigten wie Kopfschmerzen oder Augenbeschwerden. Inzwischen existiert eine Reihe weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen, die neben stetigen Signalverläufen von Glühlampen auch unstetige Signalformen von LED's untersucht haben. Aus der Literatur sind folgende Beschwerden bekannt (Auszug):

- Asthenopische Beschwerden:
Augenrötung, Augenbrennen, vermehrter Tränenfluss, verschwommenes Sehen, erhöhte Blendempfindlichkeit und Kopfschmerzen
- Zunahme der Gehirnaktivitäten im Bereich der Alpha Wellen
- Auslösung von Migräne
- Auslösung von Epilepsie z.B.

Eine Vielzahl von Untersuchungen beschäftigt sich auch mit der Fragestellung, ab welchen Frequenzen, Modulationstiefen und Leuchtdichten ein Stroboskopeffekt wahrgenommen und akzeptabel ist.

Neue Messverfahren

Zur Messung der Effekte der temporären Lichtartefakte (TLA) gibt es neue Mess- und Bewertungsverfahren. Diese haben die bisherigen Verfahren wie Welligkeit, Modulationstiefe oder Flicker-Index abgelöst.

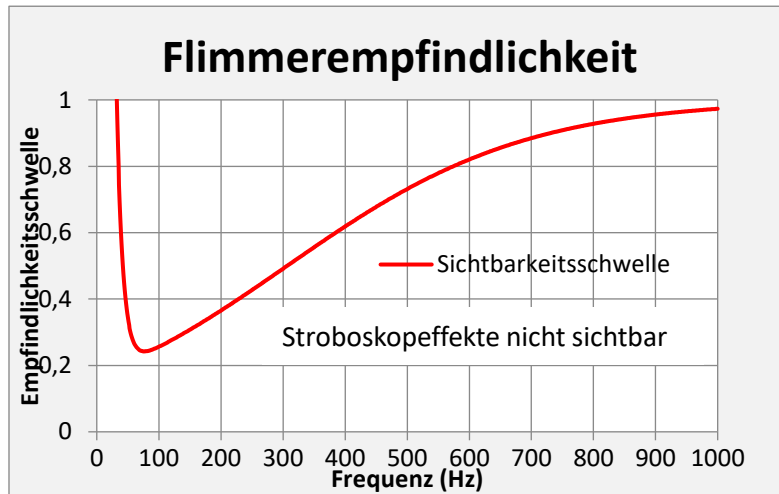
Messungen bis 80Hz

Für den Frequenzbereich der direkten Flimmerwahrnehmung also von 0,3 bis 80 Hz wird das P_{st}^{LM} Verfahren (short term Perceptibility light flicker methode) angewandt. Dieses Messverfahren filtert höhere Frequenzen weitgehend heraus und verknüpft den Messwert mit einem speziellen Auge-Gehirn-Modell.

Ein P_{st}^{LM} Wert von 1 bedeutet, dass eine 50%ige Wahrscheinlichkeit zur Wahrnehmung eines Flimmerns besteht. Bei Werten <1 ist Flimmern nicht sichtbar, während bei Werten > 1 ist ein Flimmern sichtbar.

Messungen über 80 Hz

Für die Wahrnehmung der Stroboskopeffekte wird das **SVM** (Stroboscopic Visibility Measure)



Messverfahren in einem Frequenzbereich von 80 Hz bis 2000 Hz angewandt. Im Gegensatz zum P_{st}^{LM} Verfahren wird hier eine FFT (Fast Fourier Transformation) Analyse durchgeführt, bei der Grund- und Oberwellen normiert werden und mit der Wahrnehmungsschwelle eines Sinussignals in Verhältnis gesetzt werden. Auch hier gilt, dass ein

Stroboskopeffekt bei einem Wert von $SVM < 1$ nicht sichtbar ist, bei einem Wert von $SVM = 1$ mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% gerade sichtbar ist und bei einem Wert von > 1 (gut) sichtbar ist.

Bewertungsansätze und Vorgaben

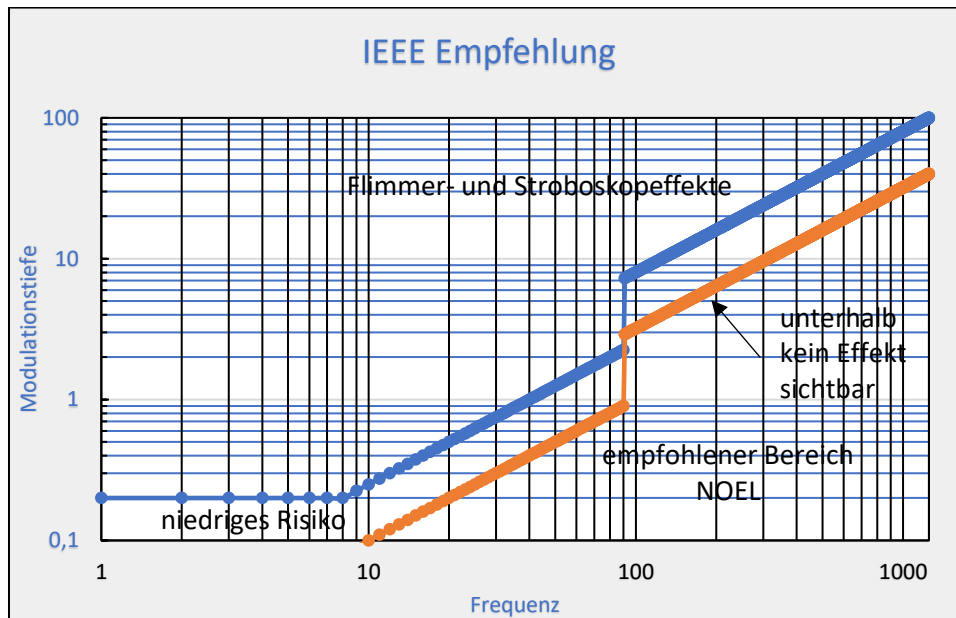
Seit Einführung der Halbleitertechnologie in der Lichttechnik mit ihren neuen Dimmverfahren hat das Thema Lichtflimmern deutlich an Bedeutung zugenommen. Während Glüh- und Halogenlampen aufgrund der Trägheit des Glühfadens Spannungsschwankungen verwischen und kontinuierliche Helligkeitsverläufe erzeugen, folgen LED's und OLED's der Spannungsversorgung unmittelbar und können un stetige Modulationen mit einer Vielzahl von Oberwellen erzeugen. Daher ist das Thema Lichtflimmern nicht wie vielfach angenommen unbedeutend geworden, sondern hat im Gegenteil zugenommen. Dies auch in Hinblick auf denkbare Auswirkungen von dirty Power oder Visible Light Communication (VLC).

Inzwischen finden auch Vorgaben zur Begrenzung des Flimmerns auch Einzug in die Gesetzgebung.

- Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAUA) fordert in ihren technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.4 Beleuchtung: Flimmern oder Pulsation dürfen nicht zu Unfallgefahren (z. B. durch stroboskopischen Effekt) oder Ermüdungen führen.
- Der US-Bundesstaat Kalifornien fordert für Beleuchtungen mit einer Flimmerfrequenz unter 200 Hz eine **Modulationtiefe < 0,3**.
- Ab 1.9.2021 gilt gemäß der Eu-Ökodesignrichtlinie 2019/2020 für LED's und OLED's bei Vollastbetrieb für den P_{st}^{LM} einen Wert ≤ 1 fest und für den **SVM** ein Wert $\leq 0,9$.
- Ab 1.9.2024 gilt gemäß der EU-Ökodesignrichtlinie für den **SVM** ein Wert $\leq 0,4$ betragen.

Weitere Bewertungsverfahren

Ein auf Vorsorge basierendes Verfahren wird von der **IEEE Standard Association** beschrieben. Hierbei werden in Abhängigkeit von Modulationstiefe und Frequenz einzelne Bereiche zwischen 10 Hz – 90 Hz und 100 Hz – 2000 Hz definiert, in dem ein niedriges Risiko besteht sowie kein sichtbarer Flimmer Effekt (NOEL = no observable effect level) zu beobachten ist. Die Berechnungen beziehen sich ausschließlich auf die Frequenz und die Modulationstiefe und lassen die Wellenform außer Betracht.



Alle Werte unterhalb der orangenen Linie (NOEL) stellen einen Unbedenklichkeitsbereich dar während Werte oberhalb der blauen Linie wahrnehmbares Flimmern wahrscheinlich werden lassen.

Für eine handelsübliche Lampe mit einer Modulationsfrequenz von 100 Hz bedeutet dies eine maximale Modulationstiefe von 0,08 bei niedrigem Risiko und eine maximale Modulationstiefe von 0,03 als empfohlener Wert. Diese Vorgabe wird von flimmerarmen Lichtquellen eingehalten.

Baubiologie

Das in der Baubiologie angewandte Verfahren zur Messung der Welligkeit bzw. Modulationstiefe ist dennoch nicht gänzlich überholt, weil der berechnete Unterschied zwischen maximaler und minimaler Helligkeit einen sehr großen Einfluss auf die unmittelbare und mittelbare Wahrnehmung von Flimmereffekten besitzt und auch für alle Frequenzen gilt. Somit sind Energiesparlampen, LED's und Glüh- sowie Halogenlampen weiterhin vergleichbar. Allerdings sollte gleichzeitig die Wellenform und Flimmerfrequenz angegeben werden.

Die Standardkommission empfiehlt vorsorglich für den SBM 2023 in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern eine Modulationstiefe von 0,01.

Quellenangaben für diesen Artikel:

LITG Publikation 48: Störungen und gesundheitliche Beeinträchtigungen durch das Flimmerverhalten künstlicher Lichtquellen. ISBN 978-3-927787-70-4 1.Auflage Sept. 2022

Schierz,C.: Schnelle zeitliche Lichtmodulationen: zum technischen Stand der Flimmerbewertung in Licht2021 Tagungsband

IEEE Standard Association: Recommended Practices for modulating Current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers; IEEE Std 1789™2015; ISBN 978-0-7381-9644-2

CIE: Visual Aspects Of Time-Modulated Lighting Systems- Definitions and Measurement Models; CIE TN 006:2016

IEC: Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements Part 1: An objective voltage fluctuation immunity test method; IEC TR 61547-1; ISBN 978-2-8322-2649-0

ZVEI Fachverband Licht: Lichtmodulation Temporal Light Artefacts und Wechselwirkung mit technischen Geräten, November 2021

Current Biology Vol 16 No 2R44 Viagra slows the visual response to flicker
[https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822\(06\)01023-2.pdf](https://www.cell.com/current-biology/pdf/S0960-9822(06)01023-2.pdf)

Harding, G.F.A.; Photosensitive Epilepsie, London: Mac Keith Press,1994