

Auswertung der zeitliche Lichtmodulation unter Verwendung von bildauflösenden Messgeräten

Annika Stein, Philipp Wiswesser, Johannes Ledig

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Zusammenfassung

Reale Lichtszenen weisen oft eine Kombination aus verschiedenen Lichtquellen und auch Tageslicht auf. Die herkömmliche Messmethode erfordert für eine solche Szene mehrere Einzelmessungen mit einem Leuchtdichtephotometer (als Spot-TLM-Messgerät) oder einem nah an der Lichtquelle platzierten Beleuchtungsstärke-Photometer. Diese Szenen können aber auch mit Hochgeschwindigkeitskameras oder bildgebende Leuchtdichtemessgeräten (engl. Imaging luminance measurement devices, ILMD) in einer Messung aufgenommen und ausgewertet werden. Ein derartiges Messverfahren beschreibt damit eine Alternative zur gängigen Methode und wird in diesem Beitrag anhand von gängigen Lampentypen demonstriert. Aus den Aufnahmen werden die Metriken zur zeitlichen Lichtmodulation (engl. temporal light modulation, TLM) berechnet, dabei werden die Parameter der einzelnen und der überlagerten Lichtquellen extrahiert und bewertet. Ein wesentlicher Vorteil der Aufnahme einer gesamten Szene ist es, dass auch die räumliche Verteilung der TLM betrachtet und in der Bewertung berücksichtigt werden kann. In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten und die Grenzen der bildgebenden TLM-Messung anhand von unter Laborbedingungen erstellten Beispiele aufgezeigt.

Index Terms: TLM, TLA, ILMD, daylight, SVM, Flimmer, Perlschnurreffekt

1 Einleitung

Die technische Entwicklung der LED, die ein erhebliches Potenzial zur Minimierung des Energieverbrauchs und zu Verringerung der negativen Auswirkungen der Beleuchtung auf die Umwelt hat, führt dazu, dass in so gut wie allen Bereichen überwiegend LEDs zur Beleuchtung eingesetzt werden. Der Betrieb von LED-Lampen am Niederspannungsnetz kann zu starken Schwankungen im Lichtstrom führen, die als zeitliche Lichtmodulation bezeichnet werden. Die TLM kann zu zeitlichen Lichtartefakten (engl. temporal light artefact, TLA) führen und sich unter bestimmten Voraussetzungen negativ auf die Gesundheit, das Wohlbefinden und die Sicherheit der Menschen oder Tiere auswirken. Daher legt die neue EU-Ökodesign-Verordnung 2019/2020 "Einheitliche Beleuchtungs-verordnung" Grenzen für die TLM fest. In dem

© 2023 by the authors. – Licensee Technische Universität Ilmenau, Deutschland.



This is an **Open Access** article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution ShareAlike-4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).
(<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Technischen Hinweis TN 006:2016 der CIE werden die drei TLA-Arten Flimmern, Stroboskopeffekt und der Perlschnurreffekt definiert. Für die Bewertung von Flimmern und den Stroboskopeffekt werden bereits Metriken von der CIE empfohlen. Für den Perlschnurreffekt gibt es jedoch noch keine anwendbare Metrik. [1],[2],[3],[4]

2 Zeitliche Lichtmodulation und -artefakte

Die zeitliche Modulation des Lichts ist eine weitverbreitete Erscheinung bei einer Vielzahl von Lampentypen. Der emittierte Lichtstrom einer Lampe kann durch verschiedene Ursachen während des Betriebs schwanken. Im Falle der Glühlampe wird die Modulation durch den Wechselstrom verursacht. Die periodische Umpolung des Stroms führt zu Schwankungen in der Temperatur des Filaments und somit der Lichtemission, wodurch die Glühlampe mit einer Frequenz, die dem Doppelten der Netzfrequenz entspricht, flackert. Es besteht die Möglichkeit, gezielt modulierte Licht zu erzeugen und einzusetzen. Dies wird beispielsweise bei der Dimmung von LEDs statt analog über die Stromstärke auch durch Pulsweitenmodulation (PWM) oder bei der Einstellung von Farbtönen bei RGB-LEDs angewendet. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung der Beleuchtung an unterschiedliche Anforderungen und gewünschte Lichteffekte. Durch zeitlich modulierte Licht entstehen zeitliche Lichtartefakte, die vom menschlichen Auge wahrgenommen werden können. [4],[5]

Innerhalb eines Frequenzbereichs von 0 bis 80 Hz wird dieser Effekt als Flimmern (engl. flicker) bezeichnet. Der fluktuierende Lichtstrom ist für einen stationären Beobachter in einer ruhenden Umgebung erkennbar, wobei diese Wahrnehmung oft im peripheren Sichtfeld noch deutlicher ausgeprägt ist. Netzschwankungen oder eine PWM mit geringer Frequenz können Gründe für Flimmern sein. [6]

In dem Frequenzbereich 80 Hz bis 2 kHz wird der Stroboskopeffekt (engl. stroboscopic effect) definiert. Durch diesen Effekt werden bewegte Objekte vom menschlichen Auge nicht mehr als eine Bewegung, sondern als einzelne Bildsequenzen wahrgenommen. Dies ist im periodischen Aufblitzen des Lichts begründet, dass das Objekt nur zu bestimmten Zeitpunkten beleuchtet und die visuelle Information für den Betrachter intermittierend ist. Der Stroboskopeffekt kann dazu führen, dass rotierende Objekte als stationär gesehen werden. Dies ist der Fall, wenn die Lichtfrequenz der Frequenz der Rotation entspricht. [4],[6]

Das dritte zeitliche Lichtartefakt ist der Perlschnurreffekt (engl. Phatom array effect). Dieser wird definiert als eine „Veränderung der wahrgenommenen Form oder räumlichen Position von Objekten, verursacht durch einen Lichtreiz, dessen Helligkeit oder spektrale Verteilung mit der Zeit schwankt“ und hervorgerufen durch eine sakkadische Augenbewegung über eine modulierte Quelle. Der Perlschnurreffekt ist ebenso wie der Stroboskopeffekt in dem Frequenzbereich zwischen 80 Hz und 2 kHz definiert. [4],[7]

Aufgrund der breiten Anwendungsmöglichkeiten von LEDs ist der Mensch in vielen alltäglichen Situationen den verschiedenen Formen der TLAs ausgesetzt. Es ist von

Bedeutung, TLAs zu definieren und zu bewerten, um die Öffentlichkeit auf diese Problematik aufmerksam zu machen. TLAs können insbesondere bei sensiblen Menschen Kopfschmerzen auslösen oder sogar einen epileptischen Anfall hervorrufen. Darüber hinaus können sie unbewusst Stressreaktionen im Körper auslösen, die auf lange Sicht eine Gesundheitsgefährdung darstellen können. Der Stroboskopeffekt kann dazu führen, dass rotierende Maschinen scheinbar stillstehen. Dies kann Menschen dazu verleiten, in die Maschine zu greifen und schwere Verletzungen verursachen. Es ist wichtig, auf diese potenziellen Risiken hinzuweisen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, um die Gefährdung durch TLAs zu minimieren. Dazu gehören beispielsweise die Einhaltung von Sicherheitsstandards bei der Gestaltung der Beleuchtung und die Schulung der Menschen, um sie über die potenziellen Gefahren von TLAs aufzuklären. Durch diese Maßnahmen kann das Risiko von Verletzungen und gesundheitlichen Problemen, die durch TLAs verursacht werden können, deutlich reduziert werden. [8],[9]

3 Metriken der TLM und TLA

Um die TLM einer Quelle zu beschreiben wurden Metriken eingeführt. Mit diesen sollen die TLM bewertet und eingeordnet werden können. Als erstes kann dafür die Frequenz der TLM bestimmt werden. Als nächstes kann die Modulationstiefe D_M (engl. Percent flicker, modulation depth) ausfolgender Formel berechnet werden:

$$D_M = \frac{A - B}{A + B} \cdot 100\%$$

Mit A = maximaler Wert

B = minimaler Wert

Die Modulationstiefe gibt einen relativen Wert für die zyklische Variation der Amplitude der Lichtmodulation an. Eine Hohe Modulationstiefe ist dabei eher sichtbar für den Menschen als eine geringe. [6],[8]

Eine weitere Metrik beschreibt den Flicker Index I_F . Dieser gibt einen Wert für die zyklische Variation in Bezug auf die Form der Modulationsform wieder und wie folgt ermittelt:

$$I_F = \frac{A_1}{A_1 + A_2}$$

Mit A_1 = Fläche des Signals oberhalb des Mittelwerts

A_2 = Fläche des Signals unterhalb des Mittelwerts

Der Wert des Flicker Index liegt zwischen 0 und 1 und es gilt je kleiner der Flicker Index ist, desto geringer ist das Flimmern der Quelle. [6]

Es gibt aber auch Metriken, die zur Einschätzung der Sichtbarkeit der TLAs dienen. Für das Flimmern wird der P_{st}^{LM} (stLM = short term light modulation) herangezogen. Dieser gilt als Messwert des sichtbaren Flimmerns und setzt das Flimmern der zu

untersuchenden Quelle in Bezug auf das Flimmern einer Glühlampe. Bei einem Wert von 1 kann das Flimmern von 50 % der Menschen wahrgenommen werden. Je kleiner der Wert wird, desto weniger Personen nehmen diesen Effekt wahr. Der P_{st}^{LM} bezieht sich auf die prozentuale Gewichtung von verschiedenen Frequenzbereichen des Flimmerns. Die Gewichtung erfolgt aufgrund der Empfindlichkeit des menschlichen Auges gegenüber verschiedenen Frequenzen des Flimmerns. [3],[10]

Der Stroboskopeffekt kann mittels SVM (engl. Stroboscopic visibility measure) bewertet werden. Der SVM ist ein Sichtbarkeitsmaß für den Stroboskopeffekt, der im Zusammenhang mit sich bewegenden Objekten auftreten kann. Bei einem Wert von 1 nehmen 50 % der Menschen diesen Effekt wahr, je geringer der Wert wird, umso weniger Personen können den Stroboskopeffekt identifizieren. Aus einer Probandenstudie im Jahr 2015 konnte ein Schwellenwert T_i für die Wahrnehmung des Stroboskopeffekts ermittelt werden. Dieser geht in der Berechnung des SVM ein.

$$SVM = \sqrt[3,7]{\sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{C_i}{T_i}\right)^{3,7}}$$

Mit: $C_i = \frac{S_i}{S_0}$

S_i = relative Amplitude der i-ten Fourier Komponente der relativen Beleuchtungsstärke E_i

T_i = Schwellenwert der Wahrnehmung

Diese Metriken werden eingesetzt, um Lichtquellen im Bezug auf ihr Gefährdungspotenzial hinsichtlich ihrer verursachten TLA einzuschätzen und zu bewerten. [4],[11],[12]

4 TLM Messungen mit bildauflösenden RGB Hochgeschwindigkeitskamera

Die Messung zeitlicher Lichtmodulationen bezieht sich auf die Erfassung und Bewertung von Variationen in der Lichtintensität oder Farbe im zeitlichen Verlauf. Diese Messungen können mit Hilfe von speziellen Messgeräten wie Leuchtdichtephotometer (als Spot-TLM-Messgerät) durchgeführt werden. Diese Instrumente erfassen die Lichtdaten über einen bestimmten Zeitraum und ermöglichen die Analyse der zeitlichen Variationen. Lichtszenen mit unterschiedlichen Quellen erfordern mit solchen Spot-TLM-Messgerät mehrere Einzelmessungen. Mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera oder eines ILMD können diese Szenen simultan erfasst und orts- bzw. winkelaufgelöst analysiert werden. Dabei wird eine Bildsequenz der Szene mit allen aktiven Lichtquellen mit einer möglichst hohen Bildrate (frames per second = fps) aufgenommen. Die einzelnen Bilder der Sequenz können dann Pixel für

Pixel mit einem Python-Programm ausgewertet werden. Die Pixel akkumulieren innerhalb der gewählten Belichtungszeit je nach Lichteinfall unterschiedlich viele Ladungen. Aus der Bildsequenz kann dann für jeden Pixel des Sensors die Signalform der Leuchtdichte wiedergegeben werden.

Für die Aufnahmen wird eine Hochgeschwindigkeitskamera IDT OS 7 – S3 vom Hersteller Imaging Solutions verwendet (siehe Abbildung 1). Diese ist mit einem CMOS-Sensor mit einer Farbtiefe von 12/36-Bit und einem 32 GB DDR Ringspeicher ausgestattet. Der Sensor verwendet einen Global Shutter. Laut Spezifikation weist dieser eine minimale Integrationszeit von 1 Mikrosekunde auf. Bei einer Auflösung in HD (1920 x 1280 Pixel) können Bildsequenzen mit einer Rate von bis zu 4200 fps und bei Verringerung der Auflösung von bis zu 130000 fps aufgenommen werden. Außerdem besitzt die Kamera einen als Bayer-Matrix RGB-Farbfiler. [13]



Abbildung 1: Foto der Hochgeschwindigkeitskamera IDT OS 7 – S3 von Imaging Solutions mit ZF.2 Makro-Planar 2/50 Objektiv des Herstellers Carl Zeiss.

Für die beispielhafte Demonstration einer realen Szene wurde eine Szenerie mit einer Vielzahl verschiedener Lichtquellen aufgebaut, siehe Abbildung 2. Die linke Lichtquelle ist eine Philips Hue White Ambiance LED-Lampe. Diese Lampe basiert auf kaltweißen und warmweißen LEDs und bietet die Möglichkeit, die ähnlichste Farbtemperatur sowie die Helligkeit über eine Digitalschnittstelle mittels einer App einzustellen. Das Licht der LED wird gleichmäßig durch einen Diffusor abgestrahlt. Außerdem enthält die Szene einen ISELED ADK LED-Streifen mit RGB-LEDs, der zur Schaffung eines Lichtambientes verwendet werden kann. Dieser Streifen ermöglicht die individuelle Einstellung des Farbtons und der Helligkeit. Die einzelnen Packages mit RGB-LEDs enthalten einen Treiberbaustein und sind auf dem Streifen in gleichmäßigen Abständen angebracht. Des Weiteren wurde eine handelsübliche 60 W Glühlampe mit einem gefrosteten (mattierten) Glaskolben verwendet. Die rechte Lichtquelle ist eine OSRAM A 60 LED-Filament Lampe, die über einen klaren

Glaskolben verfügt. Durch die Verwendung dieser verschiedenen Lichtquellen für Beleuchtungszwecke mit ihren jeweiligen Eigenschaften und Einstellungsmöglichkeiten stellt dies eine realistische und zugleich auch hinsichtlich der TLM komplexe Lichtszene dar. Dies ermöglichte eine detaillierte Untersuchung und Verifizierung der angewandten Messmethode.



Abbildung 2: Foto der Szene , links mit eingeschalteter Raumbelichtung und Tageslichtanteil (E27-Lampen ausgeschaltet), rechts Bildausschnitt aus der mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Bildsequenz mit Beschriftung.

Zunächst wird die Glühlampe betrachtet, siehe Abbildung 3a). Aus der mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Bildsequenz kann der relative zeitliche Verlauf der Leuchtdichte dargestellt werden. Die Glühlampe weist einen Offset auf, der im Nachglühen des Filaments aufgrund dessen Wärmekapazität begründet ist. Der sinusförmige 100 Hz Verlauf auf ist die Folge der Verdopplung der 50 Hz Netzfrequenz aufgrund der in beiden Halbwellen im Filament umgesetzten Leistung. Die A 60 LED Filament Lampe, siehe Abbildung 3b), zeigt ebenso ein 100 Hz Verlauf, jedoch ist dieser sägezahnförmig ausgeprägt und weist ebenfalls einen Offset auf. Dieses kann der Restwelligkeit der Glättung im enthaltenen elektronischen Vorschaltgerät zugeschrieben werden. Bei der Philips Hue Lampe, Abbildung 3c), wurde ein mittlerer Weißton und eine Dimmstufe von 80 % für diese Messung ausgewählt. In der Bildsequenz ist zu erkennen, dass auf einen kurzen kaltweißen Puls ein warmweißes Plateau folgt. Dies spiegelt sich auch im zeitlichen Verlauf wider. Anhand der Farbkanäle der Kamera kann auf die kaltweißen (kw) und warmweißen (ww) Anteile der Lampe geschlossen und deren Modulationsform jeweils durch eine entsprechende Linearkombination extrahiert werden. Als letztes wird der RGB LED Streifen, siehe Abbildung 3d), mit eingestelltem Weißlicht analysiert. Hier werden die zeitlichen Verläufe drei nebeneinander liegenden RGB LED-Dies dargestellt. Anhand der drei Farbkanäle der Kamera kann verdeutlicht werden, dass der Weißton durch zueinander phasenverschobene PWM der RGB LED realisiert wird. Zudem zeigt sich,

dass jedes Package aufgrund des asynchronen Betriebes eine andere Phasenlage und eine leicht unterschiedliche Periodendauer aufweist.

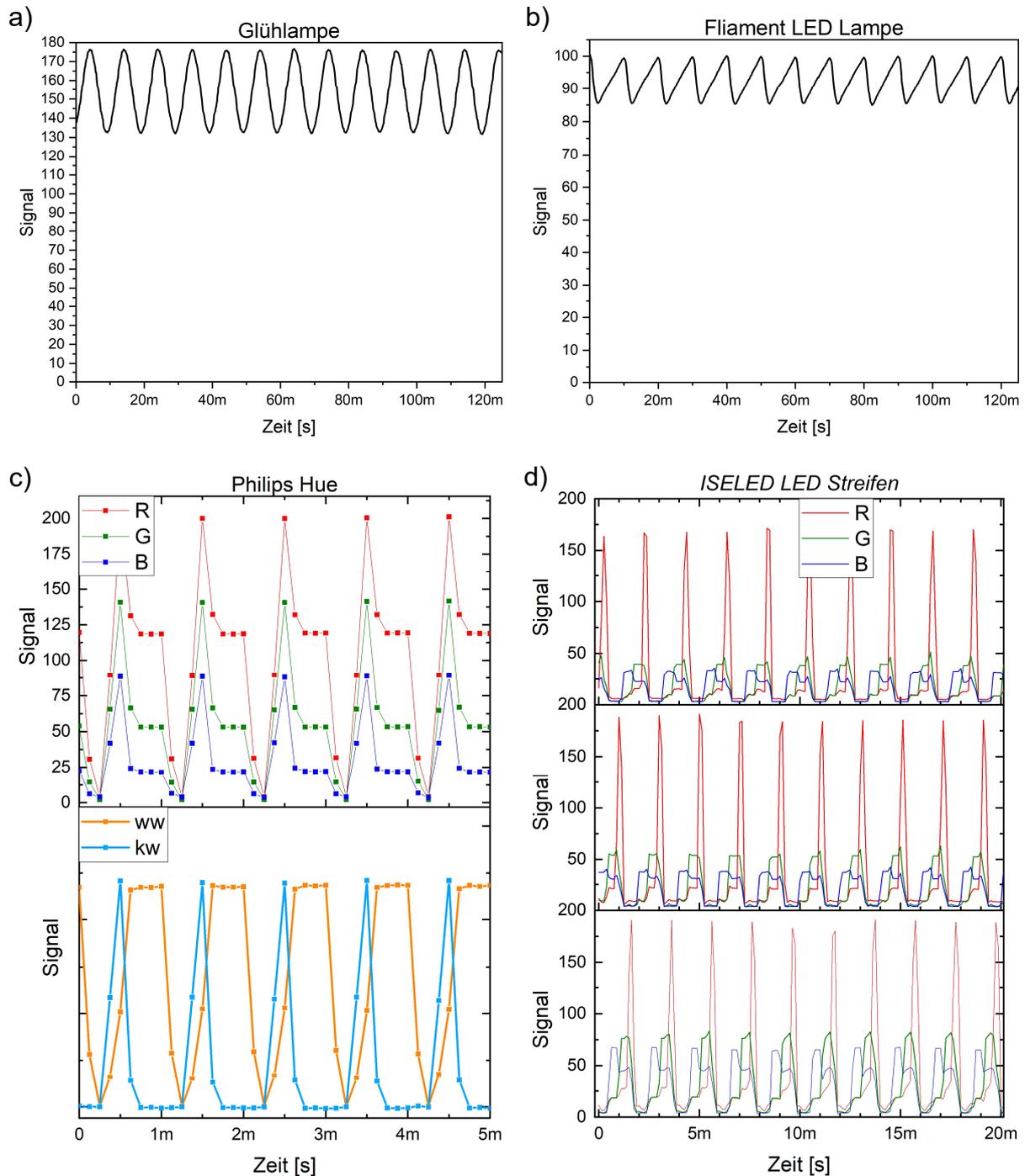


Abbildung 3: zeitlicher Verlauf der aus der Bildsequenz extrahierten Signalverläufe der Pixelwerte einer Auswerteregion entsprechend der Lichtmodulationen der verwendeten Lampen, a) Glühlampe, b) Filament Lampe, c) Philips Hue (oben Farbkanäle der Kamera sowie unten Zerlegung in Farbkanäle der Lampe), d) drei Regionen des ISELED LED Streifen.

Diese Messungen zeigen auf, dass die TLM mit der Hochgeschwindigkeitskamera visualisiert und auch hinsichtlich der zeitlichen Farbmodulation analysiert werden kann. Die Methode bringt Vorteile in Hinblick der örtlichen Auflösung und der Auswertung einer ganzen Szene. Durch den integrierten RGB-Filter können auch Lichtquellen in ihrer farblichen Darstellung bewertet werden. Schwächen weist das System in Bezug auf die benötigten Datenmengen auf. Die Daten einer HD-Aufnahme mit 5000 fps und 200 Einzelbildern (40 ms) beträgt bereits ca. 2,5 GB. Diese Datenmengen zu speichern und weiterzuverarbeiten benötigt enorme Speicherkapazitäten und Rechenleistung. Um verlässliche Werte aus den Videos ziehen zu könnten müsste die Kamera justiert und kalibriert werden, dies kann sehr aufwendig und kostspielig sein. Außerdem ist bei der Berechnung der Metriken aufgefallen, dass die Berechnung der Frequenz durch verschiedene Methoden erfolgen kann, die alle ihre Vor- und Nachteile aufweisen. Die Unsicherheiten, die daraus entstehen, müssen in jedem Fall berücksichtigt werden.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des gemeinsamen normativen Forschungsprojekts 20NRM01 MetTLM durchgeführt, das aus dem EMPIR-Programm finanziert wurde und von den teilnehmenden Staaten und dem Programm Horizont 2020 für Forschung und Innovation der Europäischen Union kofinanziert wird.

5 References

- [1] J. Steinbach, A. Gerspacher, B. Schlomann, „Potential für energieeffiziente Beleuchtungssysteme in Unternehmen und Hemmnisse bei der Umsetzung“, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, März 2019.
- [2] P. Dekker, “Publishable Summary for 20NRM01 MetTLM Metrology for temporal light modulation”, Euramet, Delft, Dezember 2022.
- [3] European Commission. COMMISSION REGULATION (EU) 2019/2020, 1.10.2019.
- [4] D. Sekulovski, (Chair), “Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models”, International Commission on Illumination (CIE), 2016.
- [5] M. Perz, (Chair), “Visual aspects of time-modulated lighting systems”, CIE, Januar 2022.
- [6] M. Schakel, (Chair), “Guidance on the Measurement of Temporal Light Modulation of Light Sources and Lighting Systems”, CIE, 2021.
- [7] J. E. Roberts, A.J. Wilkins, “Flicker can be perceived during saccades at frequencies in excess of 1 kHz” Roberts, Lighting Research & Technology, 2013.

- [8] A. Wilkins, J. Veitch, B. Lehman, “A Review of the Literature on Light Flicker: Ergonomics, Biological Attributes, Potential Health Effects, and Methods in Which Some LED Lighting May Introduce Flicker, IEEE, 2010.
- [9] “IEEE recommended practices for modulating current in high-brightness LEDs for mitigating health risks to viewers”, IEEE Std 1789-2015, pp. 1-80, Jun. 2015.
- [10] “Equipment for general lighting purposes - EMC immunity requirements - Part 1: Objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method”, IEC TR 61547-1:2020.
- [11] M. Perz, I. Vogels, D. Sekulovski, “Modeling the visibility of the stroboscopic effect occurring in temporally modulated light systems”, Lighting Research & Technology, 2015.
- [12] “Equipment for general lighting purposes - Objective test method for stroboscopic effects of lighting equipment”, IEC TR 63158:2018.
- [13] Image Solutions. IDT OS – Serie, Image Solutions. – <https://www.imaging-solutions.de/OS.html>, 2023.