

Lux junior 2019

14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs 6. bis 8. 9. 2019 Dörrfeld/Ilm

Tagungsband



Deutsche Lichttechnische
Gesellschaft e.V.

th
TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Lux junior 2019

14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs 6. bis 8.9.2019 Dörfeld/Ilm

Tagungsband

14. Internationales Forum
für den lichttechnischen Nachwuchs

6. bis 8. September 2019
Dörfeld bei Ilmenau

Herausgegeben von

Cornelia Vandahl und Christoph Schierz

Veranstalter:

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik

und

Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LiTG)
Bezirksgruppe Thüringen-Nordhessen

Impressum

Lux junior 2019, Tagungsband

14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs

Dörfeld/Ilm, 06. – 08. September 2019

Herausgegeben von

Cornelia Vandahl und
Christoph Schierz

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
Deutschland

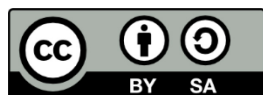
URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019200472

DOI: 10.22032/dbt.38440

Veröffentlicht durch

Universitätsbibliothek Ilmenau
ilmedia
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
Deutschland
www.tu-ilmenau.de/ilmedia

© Technische Universität Ilmenau (Thür.), 2019



Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).
(<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Vorwort

Während des 14. Internationalen Forums für den lichttechnischen Nachwuchs präsentieren Studenten, Doktoranden und junge Absolventen ihre Forschungs- und Entwicklungsergebnisse aus allen Bereichen der Lichttechnik. Die Themen bewegen sich dabei von Beleuchtungsanwendungen in verschiedensten Bereichen über Lichtmesstechnik, Kraftfahrzeugbeleuchtung, LED-Anwendung bis zu nichtvisuellen Lichtwirkungen.

Das Forum ist speziell für Studierende und junge Absolventen des Lichtbereiches konzipiert. Es bietet neben den Vorträgen und Postern die Möglichkeit zu Diskussionen und individuellem Austausch.

Seit ihrer ersten Austragung 1993 entwickelte sich die zweijährig stattfindende Tagung zu einer Traditionsveranstaltung, die das Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau gemeinsam mit der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft LiTG e. V. durchführt.

Cornelia Vandahl, 2019

Index

Vorwort	iii
Rudawski, Frederic; Knoop, Martine.....	1
Enhanced human centric lighting - Individual automated lighting condition by means of a wearable light dosimeter	
DOI: 10.22032/dbt.39587	
Thelen, Laura; Novotny, Philipp; Broszio, Kai; Knoop, Martine	9
Evaluierung der Auswirkungen von klein- und großflächigen Leuchten auf die Melatoninsuppression als Maß für nicht-visuelle Wirkungen von Licht	
DOI: 10.22032/dbt.39588	
Barkholdt, Frithjof; Broszio, Kai; Völker, Stephan	19
Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung der nicht-visuellen Wirkungen von Licht und dessen lichttechnische Charakterisierung	
DOI: 10.22032/dbt.39589	
Eichbrett, Nadine; Broszio, Kai; Völker, Stephan.....	29
Finde den NIF-Supersitzplatz	
DOI: 10.22032/dbt.39592	
Petrov, Lyubomirov Orlin	35
Research on the electrical parameters of modern LED street luminaire	
DOI: 10.22032/dbt.39593	
Santourian, Irina; Teichert, Sven; Hauer, Kai-Olaf; Schirmacher, Alfred	43
Investigation of the suitability of high-power LEDs for the use as radiation source for PTB's gonioreflectometer	
DOI: 10.22032/dbt.39594	
Jost, Thomas; Stephan, Serge; Stäcker, Martin C.....	51
LED-Beleuchtung in der Pferdehaltung. Horse Centric Lighting	
DOI: 10.22032/dbt.39595	

Petrinska, Iva; Ivanov, Dilyan; Georgiev, Valchan	63
Influence of the light distribution of luminaires and the room surfaces' reflectance on the illumination levels, uniformity and glare in indoor lighting systems	
DOI: 10.22032/dbt.39597	
Nikolova, Kamelia; Petrinska, Iva; Ivanov, Dilyan; Pavlov, Dimitar	71
Photobiological Risk from the Spectral Emission of Human Centric LED Luminaires – Case Study	
DOI: 10.22032/dbt.39600	
Weigt, Benjamin; Homeyer, Kai	77
Einfluss von Betriebsstrom und Umgebungstemperatur auf den Alterungszustand der elektrischen Größen von High Power LEDs	
DOI: 10.22032/dbt.39601	
Feßler, Jan; Katona, Markus; Trampert, Klaus; Neumann, Cornelius	87
Rückwärtsschnitt zur geometrischen Kalibrierung einer kamerabasierten Goniometermesstechnik für hochauflösende Lichtstärkeverteilungen	
DOI: 10.22032/dbt.39604	
Katona, Markus; Trampert, Klaus; Neumann, Cornelius; Schwanengel, Christian .	101
Systemanalyse eines bildgebenden LVK Messsystems mittels Monte Carlo Simulation	
DOI: 10.22032/dbt.39606	
Leontopoulos, Marina	115
Analyse von Digitalkameras im Infrarotbereich für die 3D-Rekonstruktion von Personen	
DOI: 10.22032/dbt.39607	
Müller, Silke	127
Entwicklung eines Farbkalibrierungssystems für ein Mehrkameranensystem zur 3D Rekonstruktion von Personen	
DOI: 10.22032/dbt.39608	
Kallenbach, Laura; Gerloff, Thorsten; Ledig, Johannes.....	137
Einfluss von Tuben zur Abschirmung von Streulicht bei photometrischen Messungen	
DOI: 10.22032/dbt.39609	

Benkner, Simon; Khanh, Tran Quoc.....	147
Sensor array for the analysis of the lighting situation in an intelligent industrial hall	
DOI: 10.22032/dbt.39610	
Petrov, Lyubomirov Orlin; Musev, Angel Kostadinov.....	155
Harmonic distortions from LED lighting in industrial buildings	
DOI: 10.22032/dbt.39611	
Balagus, Jens; Khanh, Tran Quoc.....	161
Auswirkung von spektral moduliertem Licht auf die Photosynthese von Pflanzen	
DOI: 10.22032/dbt.39612	
Helmer, Melanie; Neumann, Cornelius.....	169
Methode zur Messung des Einflusses von Lichtimpulsen auf die visuelle Leistungsfähigkeit	
DOI: 10.22032/dbt.39613	
Stubenrauch, Nicole; Schierz, Christoph.....	179
Entwicklung eines Robustheitsmaßes für die Wahrnehmung von LEDs	
DOI: 10.22032/dbt.39614	
Pavlov, Dimitar; Nikolova, Kamelia; Ivanov, Dilyan.....	189
Lighting of Ski Slopes	
DOI: 10.22032/dbt.39615	
Janke, Pascal; Thoma, Aniella; Locher, Jürgen; Bertram, Torsten.....	197
Dimmung des Scheinwerferlichts für zukünftige Elektrofahrzeuge	
DOI: 10.22032/dbt.39616	
Baumann, Maximilian; Helmer, Melanie; Neumann, Cornelius.....	211
Anwendung von Projektionstechniken im automobilen Interieurbereich	
DOI: 10.22032/dbt.39617	
Schöneich, Markus; Lachmayer, Roland; Neumann, Cornelius.....	221
Reflexionsverhalten von Interieur-Materialien im Kraftfahrzeug	
DOI: 10.22032/dbt.39618	

Müller, Jan; Bursy, Marcel; Wallaschek, Jörg	235
Laserscheinwerfer im Automobil – Scannendes Lasersystem mit eindimensionalem Facettenreflektor	
DOI: 10.22032/dbt.39619	
Alp, Aysenur; Bursy, Marcel; Wallaschek, Jörg	247
High-Resolution Laser Scanning Systems with Acousto-Optic Deflectors and Optimised Optics Design	
DOI: 10.22032/dbt.39620	
Zimmermann, Dennis; Naumann, Cornelius	259
Simulation und Design mikrostrukturierter Linsen für automobiler Scheinwerfer	
DOI: 10.22032/dbt.39621	
Erkan, Anil; Kobbert, Jonas; Kosmas, Kyriakos; Khanh, Tran Quoc	269
Lichttechnische Eignungsprüfung von Retrofit-LEDs als Ersatz für Halogenleuchtampen in Kfz-Scheinwerfern	
DOI: 10.22032/dbt.39622	

Enhanced Human Centric Lighting

Individual automated lighting condition by means of a wearable light dosimeter

Frederic Rudawski and Martine Knoop
Technische Universität Berlin

Abstract

The aim of this research is to develop a wearable daytime light dosimeter that can be implemented in a lighting solution, to offer individual, automated and optimized lighting conditions. To do so, the dosimeter is orientated towards the standard CIE S 026/E:2018 “CIE System for Metrology of Optical radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light”, considering the spectral sensitivities of the different retinal receptors and the impact of the field of view.

For optimized lighting conditions, the luminaire’s luminous intensity distribution must be adaptable in spectral power distribution and in direction. If the optimal spectral light incidence distribution for ipRGC-influenced responses to light purposes is known, the required luminous intensity distribution of a luminaire for a certain room geometry with certain room surface reflection values can be calculated. For this purpose, a spectral radiosity algorithm is in development. With a feedback loop between luminaire and dosimeter the light distribution can be continuously adapted as required.

Index Terms: Human Centric Lighting, lighting control, dosimeter

1 Introduction

Research shows, that electromagnetic radiation in the visible spectral range not only enables the human eye and brain to perceive colours, contrasts and forms, but also induces non-image forming (NIF) effects or ipRGC-influenced responses to light (IIL) in the human body, e. g. melatonin suppression, influence on acute alertness and performance or changes in the core body temperature.

A great number of studies on IIL was conducted at night, examining the melatonin level in subjects. While ipRGC cells seems to play a major role in nighttime IIL, the daytime



interaction of the different retinal receptor types is still not fully understood. Additionally, the light stimulus is often described insufficiently studies [1], due the interdisciplinary character of the which hampers the progress in IIL research.

Lucas et al. [1] suggest a spectral measurement of the light stimuli at eye level and an integral weighted evaluation of the five sensitivity functions of the human retinal photoreceptors, the so-called action spectra, compare figure 1. This procedure was adapted in the CIE Standard CIE S 026/E:2018 [2] with slightly different terminology. This allows for a homogeneous data acquisition and hence for a better understanding of IIL. If that is not feasible, a complementary guideline was published with recommendations for measurements concerning IIL studies [3]. These recommendations also address the problem that the light incidence angle might play a role in the effect size of IIL due to non-evenly distributed ipRGC cells on the retina or differences in the sensitivity of ipRGC cells. This in turn could result in different findings in similar IIL studies, Broszio et al. [4] illustrate this problem in more detail.

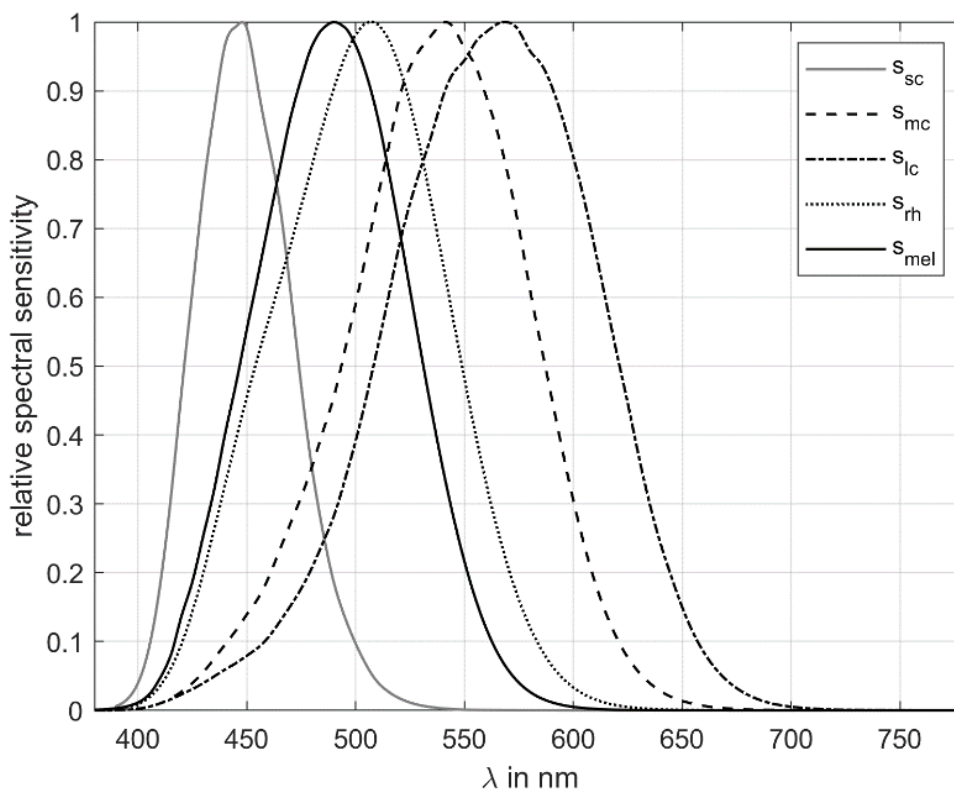


Figure 1: α -opic action spectra of the retinal photoreceptors according to CIE S 026 [2]

Khademagha et al. [5] identified different parameters in an extensive literature review that are believed to influence IIL, see table 1.

Table 1: Parameters for NIF effect analysis [5]

luminous	temporal
spectrum	timing
quantity	duration
directionality	history

To consider the temporal parameters according to Khademagha et al. [5] a wearable measurement device would be suitable. A camera-based system that also considers the integral weighted measurements according to the CIE Standard S 026 [2] by including the action spectra of the five photoreceptors would fulfil the requirements. The measuring system will be henceforth called dosimeter and has the following advantages compared to other devices:

Data that is collected by such a dosimeter could be reassessed for any new insights on IIL, since it contains all necessary information, and thereby accelerate future research and applications. The dosimeter could furthermore be used as a data logger for an automated personal lighting control next to its use as a research tool. This research will focus on the second application in the form of extended human centric lighting.

2 Aims and objectives

For in future known correlations between light stimuli and IIL, an assessment of the temporal and luminous parameters would allow an optimization of an artificial indoor lighting situation for an individual. With an adequate luminaire this process could be automated resulting in an automated and optimized personal wearable lighting control system.

Figure 2 displays the workflow of the lighting control system. The dosimeter collects data and sends it to a compatible luminaire. The lighting control system in the luminaire evaluates the dosimeter data and determines an optimized light stimulus for the participant. A simulation algorithm in the lighting control calculates the necessary luminous intensity distribution curve in dependency of position and viewing direction of the dosimeter and the reflection values of the room. This procedure is repeated continuously.

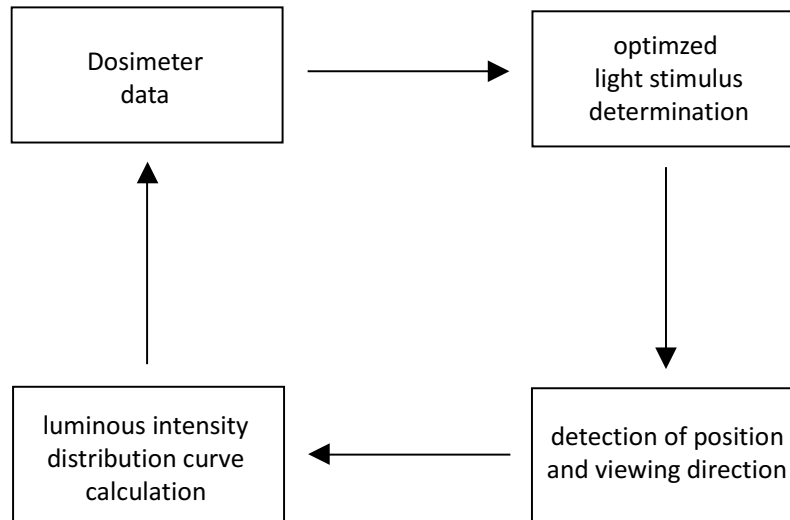


Figure 2: schematic workflow

3 Dosimeter

To collect spatial resolved data over the complete field of view in a short time frame a camera system with a fish-eye lens is suitable, easy to assemble and cost-effective. The images can be separated into different sections of interest which can be weighted with a light incidence factor according to the estimated effect size influence. Each section can be evaluated according to the weighting action spectra and the sections be integrated over the covered area resulting in five values for each measurement. The main problem to solve is the gathering of five different weighted integral measurements with an usual three channel RGB camera system.

Inanici [6] describes a procedure for accurate luminance image acquisition with a normal RGB camera and high dynamic range (HDR) images. This technique was also used with low-cost components controlled by a Raspberry Pi computer [7]. Inanici and Jung [8] extended the HDR luminance image procedure for melanopic irradiance assessments. They also found that the error of the melanopic weighting is linear and can be corrected by a constant factor.

To implement a working dosimeter, an extension of the HDR image approach will be tested. For the necessary additional two channels two different approaches will be pursued.

1. Firstly, an assessment of two imaginary channels from a linear combination of two adjoining RGB channels will be tested. Through the linear combination of two RGB channels the spectral focus will be altered. This would result in five channels using only one camera.

2. Secondly, the field of view can be simplified into two main sections since the photoreceptors are not evenly distributed over the retina: The focus point with colour vision (RGB) and the peripheral field of view comprising roughly of the remaining photoreceptors. By using additional filters in the peripheral field of view the spectral focus can be altered.

4 Light distribution optimization

With a microcontroller in the luminaire the dosimeter's data can be evaluated. The dosimeter's position and viewing direction can be estimated by edge comparison of a low-res image of the dosimeter with the room geometry. For the transmission of the collected dosimeter data to the luminaire, an appropriate data protocol must be implemented.

To determine the optimized luminous distribution curve of the luminaire(s) for a desired light stimulus from the participant's point of view, a backwards simulation of the light distribution in the room geometry in dependency of the reflection values of the enclosing room surfaces is planned. This will be achieved with an adapted spectral radiosity simulation tool developed in 2018 during a diploma thesis [9]. With additional cameras in the luminaire –analogue to the dosimeter– the room geometry and the reflectance values for the five action spectra can be estimated by an evaluation of the camera HDR images.

The spectral simulation program persists of a simple mesh algorithm and the calculation of the radiation exchange between the mesh patches. The program was developed for daylight distribution calculations of spectral sky data in interiors. The program will be extended to handle artificial lighting and objects in the room geometry. Figures 3 to 5 show a simple room geometry mesh, a colour rendering of the final simulation and the radiance and irradiance distribution of an exemplary mesh patch.

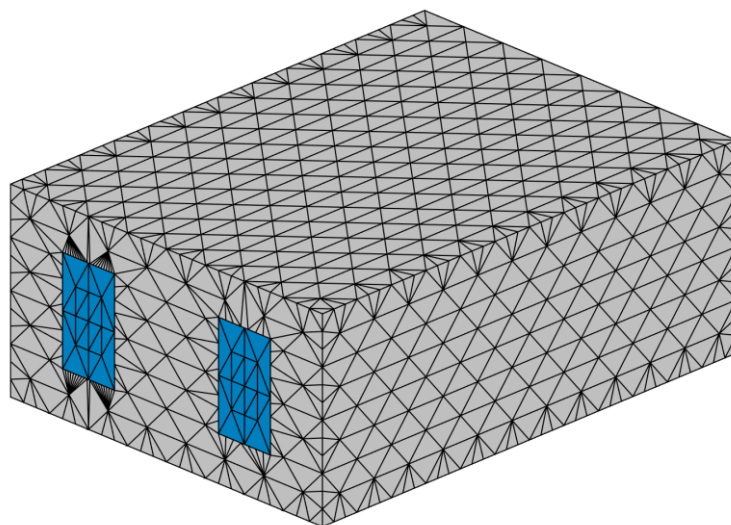


Figure 3: Mesh of a simple room geometry [9]

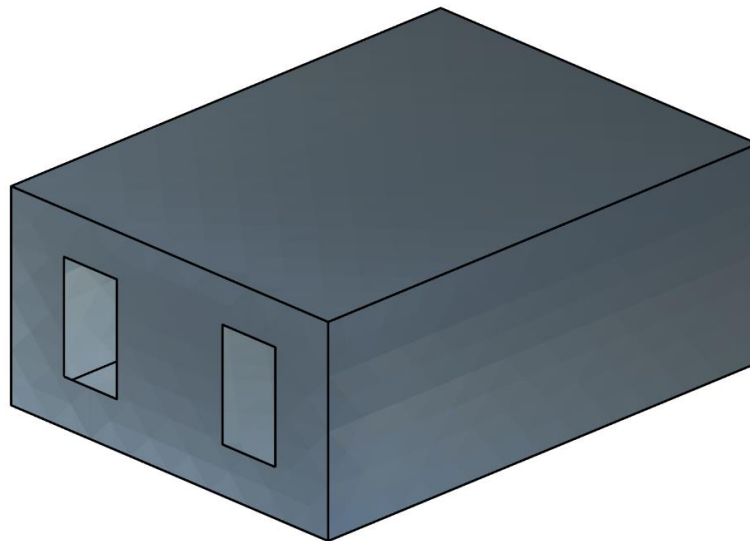


Figure 4: Colour rendering of a simple room geometry simulation [9]

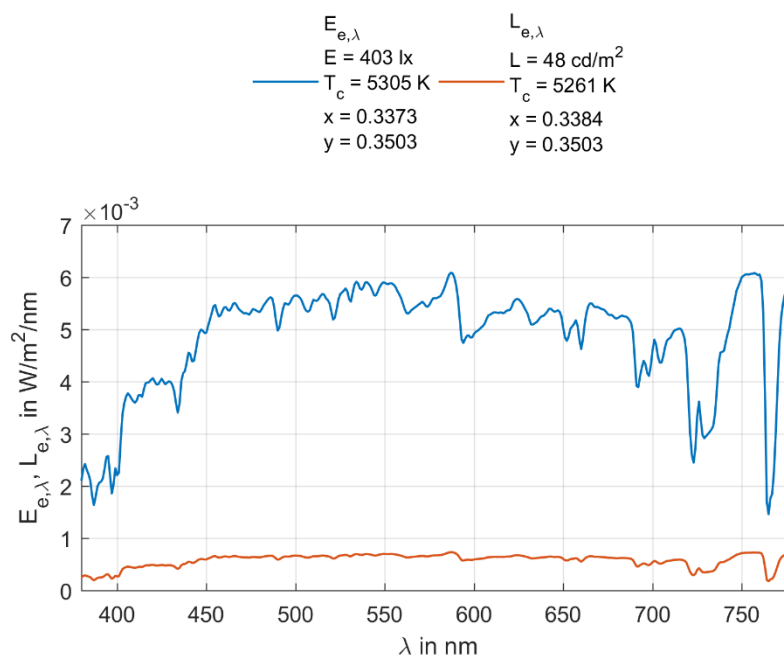


Figure 5: Exemplary spectral radiance and irradiance simulation of an exemplary mesh patch [9]

5 Luminaire

To enable personal lighting, the luminaire must be able to emit light in different directions depending on the viewing direction of the individual. This allows for the utilization of the light incidence, which is believed to have influence on the IIL effect size [5]. The luminaire should also be able to emit different spectra with adaptable intensity.

References

- [1] Lucas, Robert J. et al. (2014), “Measuring and using light in the melanopsin age”. In: *Trends in Neurosciences* 37 (1), pp. 1–9. issn: 0166-2236. doi: 10.1016/j.tins.2013.10.004.
- [2] International Commission on Illumination (2018), *CIE S 026/E:2018 CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light*. International standard. isbn: 978-961-93733-4-7.
- [3] Knoop, Martine et al. (2019), “Methods to Describe and Measure Lighting Conditions in Experiments on Non-Image-Forming Aspects”. In: *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society* 15 (2–3), pp. 163–179. issn: 1550-2724. doi: 10.1080/15502724.2018.1518716.
- [5] Broszio, Kai et al. (Sept. 2017), “Effective radiant flux for non-image forming effects – is the illuminance and the melanopic irradiance at the eye really the right measure?” In: *Proceedings of the Lux Europa 2017: European Lighting Conference*. (Ljubljana, Slovenia). Ed. by Matej B. Kobav, pp. 31–36.
- [5] Khademagha, Parisa et al. (2016), “Implementing non-image-forming effects of light in the built environment: A review on what we need”. In: *Building and Environment* 108, pp. 263–272. issn: 0360-1323. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.08.035.
- [6] Inanici, Mehlika N. (2006), “Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system”. In: *Lighting Research & Technology* 38 (2), pp. 123–134. doi: 10.1191/1365782806li164oa.
- [7] Mead, Alex R. and Mosalam, Khalid M. (2017), “Ubiquitous luminance sensing using the Raspberry Pi and Camera Module system”. In: *Lighting Research & Technology* 49 (7), pp. 904–921. doi: 10.1177/1477153516649229.
- [8] Inanici, Mehlika N. and Jung, Bo (2018), “Measuring circadian lighting through high dynamic range photography”. In: *Lighting Research & Technology* 0 (0), pp. 1–22. doi: 10.1177/1477153518792597.
- [9] Rudawski, Frederic R. (2018), “Determination and representation of spectral and spatial distribution of daylight in interiors”. Diploma thesis. Berlin, Germany: Technische Universität Berlin.

Evaluierung der Auswirkungen von klein- und großflächigen Leuchten auf die Melatoninsuppression als Maß für nicht-visuelle Wirkungen von Licht

Laura Thelen,¹ Philipp Novotny,² Dipl.-Ing. Kai Broszio,¹ Dr. Martine Knoop,¹
Prof. habil. Dr.-Ing. Stephan Völker¹

¹ Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

² Ludwig-Maximilians-Universität München

Zusammenfassung

Seit der Entdeckung des ipRGC Rezeptors gilt dem Forschungsgebiet nicht-visuelle (eng. non-image-forming, NIF) Wirkung von Licht neue Aufmerksamkeit. "Nicht-visuell" bedeutet, dass ein Fehlen des ipRGC (engl. intrinsically photosensitive retinal ganglion cells) Rezeptors keine Auswirkung auf das Sehen des Menschen hätte, jedoch wären Auswirkungen auf den circadianen Rhythmus des Menschen zu beobachten. Der ipRGC Rezeptor ist eine fotosensitive Ganglienzelle und mit nur weniger als 5% aller Ganglienzellen auf der Netzhaut des Auges verteilt. Der Rezeptor enthält das Photopigment Melanopsin. Wird der Rezeptor angeregt, so kann nachts die Ausschüttung des Hormons Melatonin durch die Zirbeldrüse gehemmt werden. Melatonin wird zunehmend im Laufe der Abendstunden und während der Nacht ausgeschüttet. Mit einer angepassten Beleuchtung könnte der circadiane Rhythmus eines Menschen unterstützt werden. Zur Untersuchung des Einflusses der Größe der Lichtquelle auf die Melatoninunterdrückung wurde im Jahr 2013 von Philipp Novotny et al. eine Probandenstudie mit 30 Versuchsteilnehmern durchgeführt. Diese wurden mit zwei unterschiedlich großen Flächen beleuchtet, um zu erforschen ob die Melatoninunterdrückung flächenabhängig ist. Der Melatoninspiegel wurde mittels Salivaprobe untersucht. Bereits 2010 führte Philipp Novotny et al. dieselbe Probandenstudie mit 6 Versuchsteilnehmern durch. Die Auswertung der Studiendaten ergaben einen Trend, dass eine große Fläche die Melatoninausschüttung unter den verwendeten Versuchsbedingungen mehr unterdrücken könnte.[5] Mittels einer größeren Teilnehmerzahl sollte dies 2013 wiederholt überprüft werden, jedoch wurden die Ergebnisse bisher noch nicht veröffentlicht. Dieser Beitrag stellt die ermittelten Ergebnisse von Novotny et al.s zweiter Studie vor, analysiert diese und berücksichtigt zusätzliche Faktoren wie z.B. den Einfallswinkel des Lichts in die Augen des Betrachters. Zur Charakterisierung der Lichtbedingungen und Beschreibung des Stimulus für nicht-visuelle Effekte wurde der Aufbau von Novotny et al.s Studie in einem LED Testraum am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Berlin rekonstruiert. Hierbei soll eine fundierte Aussage über die Wirkung unterschiedlich großer Flächen getroffen werden.

Index Terms: ipRGC, Melatoninunterdrückung, Flächenabhängigkeit



1 Aktueller Forschungsstand:

Nicht-visuelle Wirkung von Licht bietet noch viel Forschungspotential. Da die ipRGC erst 2001 nachgewiesen werden konnten, und somit der Ursprung des biologischen Prozesses der Melatoninbildung erstmals mit der Wirkung des Lichts verbunden werden konnte, sind viele Einflussfaktoren noch nicht ausreichend erforscht. Bei folgenden Faktoren ergeben unabhängig voneinander geführte Studien jedoch eine ähnliche Auswirkungen:

1.1 Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke

Je höher die Leuchtdichte ist und damit die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge, desto höher ist die Melatoninunterdrückung. [11] Die ipRGC erreichen jedoch bei vertikalen Beleuchtungsstärken von $E_v = 500 \text{ lx}$ ein Plateau und höhere Beleuchtungsstärken haben keinen stärkeren Einfluss mehr auf die Stimulierung der Zellen. Bei $E_v = 100 \text{ lx}$ werden 50% der Ausreizung der ipRGC erreicht. [9]

1.2 Wellenlänge der Lichtquelle

Kurzwelliges, blaues Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 460 \text{ nm}$ bis 490 nm unterdrückt das Melatonin am stärksten. Die DIN SPEC 5031-100 beschreibt die spektrale Sensitivitätsfunktion der Melatoninunterdrückung und zeigt ein Maximum bei einer Wellenlänge von 490 nm , was dem aktuellsten Forschungsstand entspricht. [8] [19] [18]

1.3 Richtungsabhängigkeit der Lichtquelle zum Betrachter

Nasal auftreffendes Licht unterdrückt die Melatoninproduktion mehr als schläfenseitig auftreffendes Licht. [12] [13] Aus dem oberen Blickfeld auftreffendes Licht ist wirksamer als aus dem unteren. [14] [15]

1.4 Anatomie und Physiologie des Betrachters

Die Unterdrückung von Melatonin ist umso höher, wenn beide Augen beleuchtet werden anstelle von nur einem. [16] Jedoch bedeutet dies nicht, dass verschiedene Lichtbedingungen keinen Effekt auf blinde Menschen haben. Es wurde nachgewiesen, dass blaues Licht den Melatoninspiegel von Blinden ebenfalls beeinträchtigen kann. [17]

1.5 Ergebnis aus dem bisherigen Stand der Forschung

Aus den bisherigen Forschungen, besonders aus den letzteren zwei Punkten, ergibt sich die Aufteilung des Raumes für einen Betrachter wie in den Abbildungen 1 und 2 zu sehen ist. Broszio et al. schlagen in ihrer Veröffentlichung [2] vor, die Frontansicht in sechs Feldern aufzuteilen.

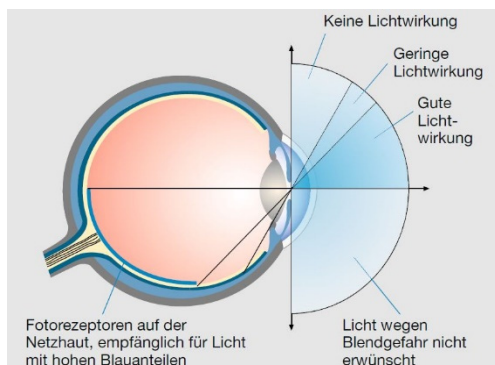


Abb. 1 Aufteilung der Höhenwinkel des einfallenden Lichts von der Fördergemeinschaft Gutes Licht [1]

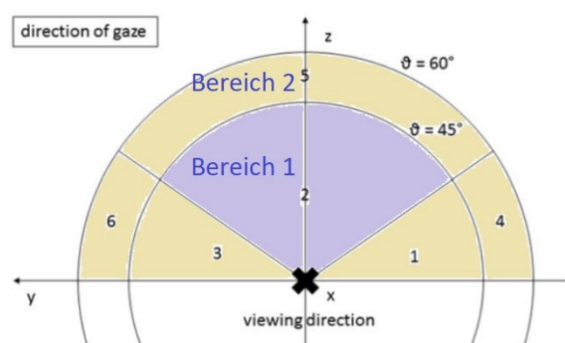


Abb. 2: Aufteilung des Blickfeldes in 6 Bereiche adaptiert von Broszio et al. [2]

1.6 Beleuchtungsstärke am sowie Flächenabbildung auf das Auge

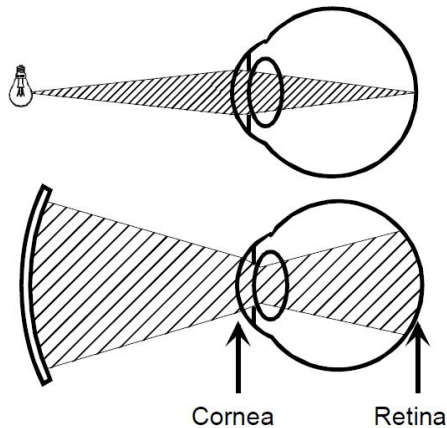


Abb. 3 Vergleich der Abbildung von großer und kleiner Fläche - von Schierz [4]

Aufgrund des biologischen Aufbaus des Auges werden Flächen unterschiedlich von der Hornhaut auf die Netzhaut abgebildet. Während eine punktförmige Lichtquelle auch nur punktförmig auf die Netzhaut abgebildet wird, deckt eine großflächige Lichtquelle mehr Zellen der Netzhaut ab, da sie großflächig abgebildet wird (siehe Abb. 3)[4]. Hierbei ergibt sich das Problem, dass häufig die Beleuchtungsstärke an der Hornhaut des Auges verglichen wird. Jedoch ist die Leuchtdichte der Lichtquellen, die auf die Netzhaut des Auges abgebildet werden, als Vergleichsparameter aussagekräftiger. Sie ist proportional zur Netzhautbeleuchtungsstärke, die für eine adäquate Beurteilung zu nutzen wäre. Außerdem hat die Leuchtdichte den Vorteil im Gegensatz zur Beleuchtungsstärke nicht vom Abstand der Lichtquelle zum Betrachter abzuhängen.[4]

Hat man also eine kleine Lichtquelle und verwendet die Beleuchtungsstärke als Maß, dann wird die kleine Fläche auch klein abgebildet und die gesamte Beleuchtungsstärke wirkt auf den kleinen abgebildeten Punkt. Bei einer großen Lichtquelle wirkt die gesamte Beleuchtungsstärke, jedoch über die Fläche verteilt, also wirkt weniger Beleuchtungsstärke auf die einzelnen Punkte der gesamten großen Fläche, als bei der kleinen Lichtquelle.

2 Studienbeschreibung:

Im Jahr 2013 untersuchte Philip Novotny et al.[5] die Auswirkung von unterschiedlich großen Flächen auf die Melatoninunterdrückung von 30 Probanden, je 15 Frauen und Männer. Es wurden zwei Flächen

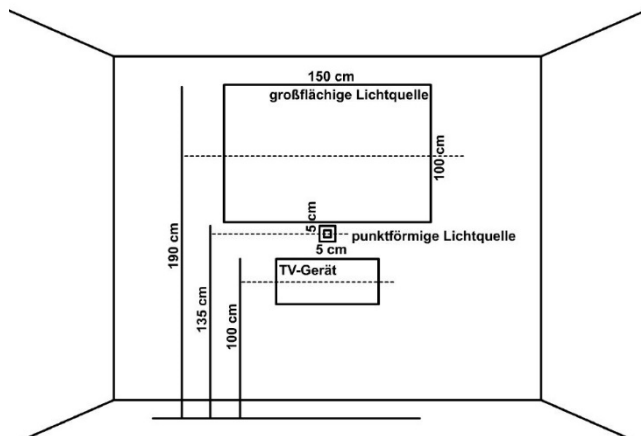


Abb. 4 Aufbau von Novotny et al.[5]

gewählt, eine große und eine kleine. Dessen Dimensionierung und Parameter sind in Tab. 1 und der Aufbau ist in Abb. 4 zu sehen. Die Studienteilnehmer wurden ab 21 Uhr untersucht. Nach einer zweistündigen Washoutphase, ein Zeitbereich, in dem die Probanden nur von blaugefiltertem Licht umgeben waren, wurden sie mit einer der beiden Lichtquellen für zwei Stunden beleuchtet, während der Versuchsteilnehmer gerade aus auf einen Fernsehbildschirm blickte. Der Fernseher wurde mit einem Blaufilter versehen, damit dessen Blauanteile keine Auswirkung auf die Probanden haben kann. Der Melatoninspiegel des Teilnehmers

wurde in äquidistanten Zeitabständen mittels Salivaproben bestimmt. Es wurden ab 21 Uhr in 20-minütigen Abständen insgesamt 12 Salivaproben entnommen. Nach einer Woche kamen die Versuchsteilnehmer wieder in die Versuchsräumlichkeiten und wurden unter denselben Bedingungen mit der jeweils anderen Lichtquelle beleuchtet und untersucht.

Tab. 1 Auflistung der Dimensionierung und Parameter der Lichtquellen von Philip Novotny et al.s Studie [5]

	Kleine Lichtquelle	Große Lichtquelle
Dimension der Fläche	5 cm x 5 cm	150 cm x 100 cm
Mittlere Höhe der Lichtquelle	135 cm	190 cm
Material vor Lichtquelle	Milchglas	Weiß bemalte, homogenstreuende Platte
Ähnlichste Farbtemperatur	10713 K	18504 K
a_{mel}	1,14	1,328
Beleuchtungsstärke an der Hornhaut	91 lx	86 lx

3 Methodik

Die Lichtquellen aus Novotny et al.s Probandenversuch wurden maßstabsgetreu in dem LED-Testraum des Fachgebiets Lichttechnik der TU Berlin rekonstruiert. Es sollte hierbei herausgefunden in welche Bereiche das Licht aus der Perspektive des Betrachters fällt. In dem Testraum ist die komplette Wand mit LED Kacheln versehen. 40 cm vor den Kacheln hängt eine Leinwand, die das Licht der LED-Kacheln diffus verteilt. In diesem Zwischenraum von Leinwand und LED-Kacheln, wurden mittels nichtlichtdurchlässigem Materials das Licht so abgedeckt, dass die Maße der großen und kleinen Lichtquelle (s. Tab. 1) erreicht werden. Mit Hilfe einer Leuchtdichtekamera (*LMK 5 color* der Firma Techno Team Bildverarbeitung GmbH) im Abstand von 85 cm zur Wand und 120 cm Höhe, wurden die Leuchtdichtebilder aufgenommen und ausgewertet.

4 Auswertung:

4.1 Vergleich der Felder:

Bei der kleinen Lichtquelle kommt das gesamte Licht aus dem Bereich 1 (siehe Definition der Felder in Abb. 2). Die große Lichtquelle belegt alle Bereiche wie in Abb. 5 zu sehen ist. Aus dem Bereich 1 trifft 56% der Gesamtbeleuchtungsstärke auf den Betrachter, und daraus folgen 37% für den Bereich 2 und die restlichen 7% fallen in den Bereich, dem keine Lichtwirkung zugeschrieben wird. Somit fällt die Mehrheit in den als "Gute Lichtwirkung" bezeichneten Bereich.

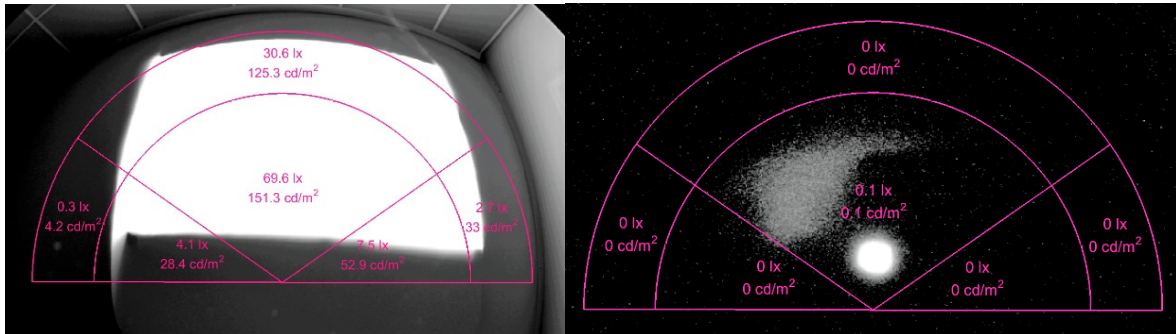


Abb. 5 LMK Aufnahmen der großen Lichtquelle (links) und der kleinen Lichtquelle (rechts)

4.2 Abbildungsbereich auf der Retina:

Lichtquellen werden ihrer Größe entsprechend auf der Retina abgebildet. So werden punktförmige Lichtquellen punktförmig abgebildet, großflächige Lichtquellen werden großflächig abgebildet [4]. Somit ist auch der Abbildungsbereich auf der Retina zu beachten. Bei einem gleichen Wertebereich des Pupillendurchmessers, ist jedoch zu sehen, welche Auswirkungen eine gleiche Hornhautbeleuchtungsstärke, als Maß zur Vergleichbarkeit der Lichtquellen, auf die retinale Beleuchtungsstärke hat. Die kleine Lichtquelle erzeugt eine viel höhere retinale Beleuchtungsstärke. Dies lässt vermuten, dass die kleine Lichtquelle die beleuchteten Bereiche der Netzhaut immens stark reizt. Somit hat sie möglicherweise einen größeren Einfluss auf die Melatoninunterdrückung, als die große Lichtquelle mit einer niedrigeren retinalen Beleuchtungsstärke. Es sei jedoch vorab angemerkt, dass bei 500 lx vertikaler Beleuchtungsstärke am Auge schon eine Sättigung der subjektiven Wachsamkeit erreicht sein kann.

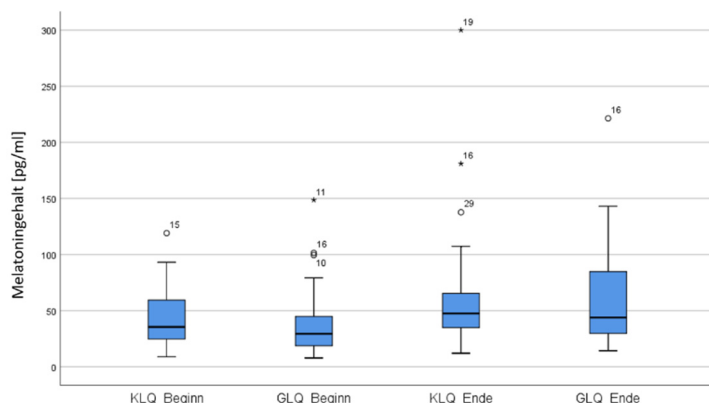
Tab. 2 Berechnete retinale Beleuchtungsstärke mittels Pupillendurchmesser; aus Novotny et al. [5]

	d_p [mm]	E_R [lx]
Kleine Lichtquelle	2,5 –	414
	6,5	– 2801
Große Lichtquelle	2,5 –	0,9 –
	6,5	6,1

4.3 Statistische Auswertung

Die Melatoninwerte der Studie wurden statistisch untersucht, wobei der Anfangswert (AW) vor der Beleuchtung und der Endwert (EW) nach der Beleuchtung der jeweiligen Quelle miteinander verglichen wurden.

4.3.1 Kleine Lichtquelle vs große Lichtquelle



Beide Lichtquellen ergaben ein signifikantes Ergebnis mit $p < 0.05$, jedoch hat die kleine Lichtquelle minimal weniger unterdrückt. Der Abstand der Mittelwerte von Anfangs- zum Endwert der kleinen Lichtquelle (AW: 41.9 pg / ml; EW: 63.6 pg / ml) ist höher als bei der großen Lichtquelle (AW: 39.3 pg / ml; EW: 59.5 pg / ml).

Abb. 2: Boxplots der Melatoninwerte der kleinen Lichtquelle (KLQ) und großen Lichtquelle (GLQ) zu Beginn und Ende

4.3.2 Kleine Lichtquelle (korrigiert) vs große Lichtquelle

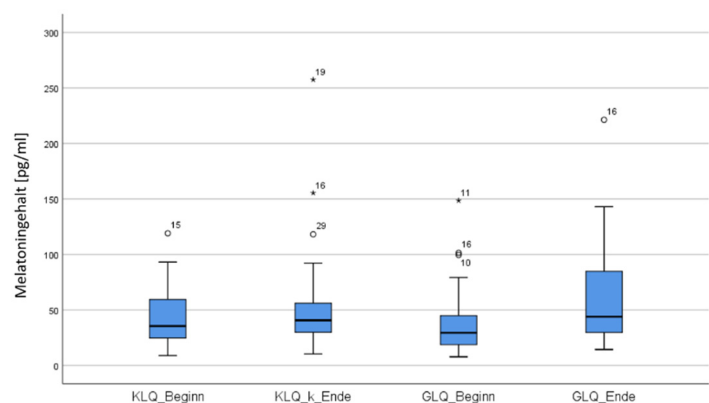


Abb. 3: Boxplots der Melatoninwerte der korrigierten kleinen Lichtquelle (KLQ) und großen Lichtquelle (GLQ) zu Beginn und Ende

Da die große Lichtquelle aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften vermutlich besser für die Melatoninunterdrückung geeignet ist als die kleine Lichtquelle, wurde nach einem Korrekturfaktor für die Melatoninwerte gesucht. Hierbei wurde auf die unterschiedlichen melanopischen Wirkungsfaktoren zurückgegriffen. Der melanopische Wirkungsfaktor der großen Lichtquelle war höher (s. Tab.1) und wurde auf die Melatoninendwerte der kleinen Lichtquelle angewandt. Dies folgte in einer Reduzierung des Endwertes der kleinen Lichtquelle von

ursprünglich 63.6 pg/ml zu 54.6 pg/ml. Das statistische Ergebnis wurde zudem nicht signifikant, was bedeuten könnte, dass die kleine Lichtquelle eine stärkere Melatoninunterdrückung verursachte.

4.3.3 Frauen vs Männer

Ein Vergleich der Melatoninwerte von Frauen und Männern (s. Tab. 3) ergab, dass Frauen nicht nur einen deutlich höheren Melatoninanstieg hatten, sondern auch der Mittelwert des Anfangswertes wesentlich höher war als bei den Männern.

Dass der Anstieg bei Frauen so stark ist konnten bereits Chellappa et al. beobachten [6], wo Männer zweimal so stark auf blaues Licht reagierten. Ferner fanden Gunn et al. [7] in ihrer Studie heraus, dass Männer allgemein weniger Melatonin ausschütten.

Tab. 3 Vergleich des Anfangs- und Endwertes nach Frauen und Männern getrennt für die kleine Lichtquelle

Kleine Lichtquelle	Anfangswert	Endwert
Frauen	49,4 pg/ml	71,7 pg/ml
Männer	34,4 pg/ml	37,5 pg/ml

5 Fazit

Zieht man die Kapitel 4.1 und 4.2 in Betracht, so vermutet man eine stärkere Unterdrückung des Melatonins durch die kleine Lichtquelle. Jedoch sieht man in Kapitel 4.3, dass die große Lichtquelle trotz ihrer kleineren retinalen Beleuchtungsstärke, dass Melatonin leicht besser unterdrückt. Dies könnte u.a. an der lichttechnischen Beschaffenheit der großen Lichtquelle liegen. Die große Lichtquelle hat nach Tab. 1 viel mehr Blauanteile, auch der melanopische Wirkungsfaktor ist höher. Weiterhin könnte es an einer größeren Abdeckung von ipRGC liegen. Auch wenn die kleine Lichtquelle eine über 100-fache retinale Beleuchtungsstärke verursacht, so wird sie aufgrund ihrer punktförmigen Abbildung nur wenige ipRGCs stimulieren. Der genaue Grund für die Ergebnisse ist jedoch derzeit unklar.

Die Anwendung des melanopischen Wirkungsfaktors der großen Lichtquelle auf die Melatoninwerte der kleinen Lichtquelle ergab, dass die kleine Lichtquelle besser das Melatonin unterdrückt, jedoch ist es ungewiss ob solch ein Korrekturfaktor überhaupt angewandt werden darf.

Die Auswertung der Daten wurde zusätzlich zu den unterschiedlichen lichttechnischen Eigenschaften auch durch die verschiedenen Höhen der Mittelpunkte der Flächen erschwert. Die große Lichtquelle besitzt mit 190 cm einen wesentlich höheren Mittelpunkt als die kleine Lichtquelle mit 135 cm.

Ferner wurde die Beleuchtungsstärke an der Hornhaut für beide Lichtquellen gleichgehalten. Dies sorgt für unterschiedliche Beleuchtungsstärken auf der Retina. Und obwohl die große Lichtquelle eine geringe Beleuchtungsstärke auf der Retina verursacht, unterdrückte sie das Melatonin stärker als die kleine Lichtquelle.

Die große Lichtquelle unterdrückte zwar das Melatonin besser, aber es ist nicht klar zuzuordnen aus welchem Grund dies geschah. Zudem ist unbekannt inwieweit die Lichtquellen wirksam waren, da es keine Kontrollprobandengruppe gab bzw die gleichen Probanden wurden nicht ein drittes Mal untersucht, wobei keine der beiden Lichtquellen eingesetzt wurde.

6 Empfehlung für zukünftige Studien

Der Probandenversuch von Novtony et al. ist ein wichtiger Anhaltspunkt für zukünftige Forschung. Mittels aktuellen Forschungsstand sollte ein Probandenversuch mit unterschiedlich großen leuchtenden Flächen wiederholt werden, da bislang nur Trends, jedoch keine fundierten Aussagen aufgestellt werden konnte. Essentiell ist dabei, dass auf die lichttechnischen Eigenschaften und ihre Vergleichbarkeit geachtet wird.

6.1 Angabe des Alters der Probanden

Bei einer Wiederholung wird zum einen empfohlen das Alter der Probanden anzugeben. Es war in der Auswertung durch fehlende Angaben des Studienprotokolls nicht möglich zu sagen, ob das Durchschnittsalter der Probanden bei 32 Jahren lag. Dies ist der Referenzwert der DIN SPEC 5031-100 [7]. Eine Abweichung dieses Alters bedarf eines Korrekturfaktors, da mit dem Altern des Auges die Transmission von blauem Licht, aufgrund einer gelblichen Färbung der Hornhaut, abnimmt. [4] [8]

6.2 Kontrollprobandengruppe

Weiterhin wird empfohlen entweder eine Kontrollprobandengruppe einzuführen oder die Probanden ein drittes Mal zu einem Dunkelszenario in die Räumlichkeiten einzuladen, um deren Melatoninwerte ohne Lichtquelle zu beobachten.

6.3 Lichthistorie

In der Studie wäre zusätzlich zu einer Washoutphase eine Protokollierung der Lichthistorie sowie zur Schlafqualität für die möglichst genaue Interpretation der Ergebnisse von Vorteil, da bereits vor der Washoutphase sich die Melatoninwerte der Probanden untereinander stark unterschieden und es somit nicht eindeutig war, an welchen Einflüssen es vor dem Betreten der Versuchsräumlichkeiten lag.

6.4 Verbesserung der Protokollierung

Zuletzt möchte noch auf die Empfehlung zur Beschreibung und Messung von Lichtszenen von Knoop et al. [10] in ihrer aktuellsten Veröffentlichung verwiesen werden. In dieser wird zusätzlich erläutert, wie wichtig eine umfangreiche und möglichst detaillierte Beschreibung und Dokumentation der Methodik eines Versuchsaufbaus und dessen Durchführung ist.

7 Literatur

[1] Fördergemeinschaft Gutes Licht. „Wirkung des Lichts auf den Menschen“. In: *licht.wissen* 19 (), S. 15–21. url: www.licht.de (besucht am 11. 06. 2019).

[2] Kai Broszio u. a. *Effective radiant flux for non-image forming effects – is the illuminance and the melanopic irradiance at the eye really the right measure?* Hrsg. von Technische Universität Berlin. Berlin, Germany, 2015.

[3] Jens Hannibal u. a. „Melanopsin expressing human retinal ganglion cells: Subtypes, distribution, and intraretinal connectivity“. In: *The Journal of comparative neurology* 525.8 (2017), S. 1934–1961. doi: 10.1002/cne.24181.

[4] Christoph Schierz. „Zur Photometrie nichtvisueller Lichtwirkungen“. In: 6. *Symposium „Licht und Gesundheit“* (März 2008), S. 112–123.

[5] Philipp Novotny u. a. „The Solid Angle of Light Sources and Its Impact on the Suppression of Melatonin in Humans“. In: *Human-Computer Interaction. Towards Intelligent and Implicit Interaction*. Hrsg. von David Hutchison u. a. Bd. 8008. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 454–463. isbn: 978-3-642-39341-9. doi: 10.1007/978-3-642-39342-6_50.

[6] Sarah L. Chellappa u. a. „Sex differences in light sensitivity impact on brightness perception, vigilant attention and sleep in humans“. In: *Scientific reports* 7.1 (2017), S. 14215. doi: 10.1038/s41598-017-13973-1.

[7] Pippa J. Gunn u. a. „Sex differences in the circadian profiles of melatonin and cortisol in plasma and urine matrices under constant routine conditions“. In: *Chronobiology international* 33.1 (2016), S. 39–50. doi: 10.3109/07420528.2015.1112396.

[8] *DIN SPEC 5031-100:2015-08, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren*. Berlin. doi: 10.31030/2334694.

[9] Christian Cajochen. „Alerting effects of light“. In: *Sleep medicine reviews* 11.6 (2007), S. 453–464. issn: 1087-0792. doi: 10.1016/j.smrv.2007.07.009.

[10] Martine Knoop u. a. „Methods to Describe and Measure Lighting Conditions in Experiments on Non-Image-Forming Aspects“. In: *LEUKOS* 15.2-3 (2019), S. 163–179. issn: 1550-2724. doi: 10.1080/15502724.2018.1518716.

[11] K. Thapan, J. Arendt und D. J. Skene. „An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans“. In: *The Journal of physiology* 535.Pt 1 (2001), S. 261–267. issn: 0022-3751. doi: 10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00261.x.

[12] Melanie Rüger u. a. „Nasal versus temporal illumination of the human retina: effects on core body temperature, melatonin, and circadian phase“. In: *Journal of biological rhythms* 20.1 (2005), S. 60–70. issn: 0748-7304. doi: 10.1177/0748730404270539

[13] E. K. Visser, D. G. Beersma und S. Daan. „Melatonin suppression by light in humans is maximal when the nasal part of the retina is illuminated“. In: *Journal of biological rhythms* 14.2 (1999), S. 116–121. issn: 0748-7304. doi: 10.1177/074873099129000498.

- [14] Gena Glickman u. a. „Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans“. In: *Journal of biological rhythms* 18.1 (2003), S. 71–79. issn: 0748-7304. doi: 10.1177/0748730402239678.
- [15] T. A. Lasko, D. F. Kripke und J. A. Elliot. „Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields“. In: *Journal of biological rhythms* 14.2 (1999), S. 122–125. issn: 0748-7304. doi: 10.1177/074873099129000506.
- [16] Jenny Y. Wang u. a. „Ocular Regulation of the Human Pineal Gland: the Significance of Total Retinal Exposure for Melatonin Suppression“. In: *Biologic Effects of Light 1998*. Hrsg. von Michael F. Holick und Ernst G. Jung. Bd. 146. Boston, MA: Springer US, 1999, S. 367–374. isbn: 978-1-4613-7296-7. doi: 10.1007/978-1-4615-5051-8_59.
- [17] C. A. Czeisler u. a. „Suppression of melatonin secretion in some blind patients by exposure to bright light“. In: *The New England journal of medicine* 332.1 (1995), S. 6–11. issn: 0028-4793. doi: 10.1056/NEJM199501053320102.
- [18] Steven W. Lockley, George C. Brainard und Charles A. Czeisler. „High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light“. In: *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 88.9 (2003), S. 4502–4505. issn: 0021-972X. doi: 10.1210/jc.2003-030570.
- [19] Christian Cajochen u. a. „High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light“. In: *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 90.3 (2005), S. 1311–1316. issn: 0021-972X. doi: 10.1210/jc.2004-0957.

Aufbau eines Versuchsstandes zur Untersuchung der nicht-visuellen Wirkungen von Licht und dessen lichttechnische Charakterisierung

Frithjof Barkholdt, Kai Broszio, Stephan Völker
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik
Einsteinufer 19, 10587 Berlin;
frithjof@barkholdt-lighting.de

Abstract/Zusammenfassung

Die nicht-visuellen Lichtwirkungen (eng. non-image-forming, NIF) bilden ein weites Forschungsfeld, welches in der modernen Gesellschaft aufgrund der langen Aufenthaltsdauern in Innenräumen, zunehmend an Bedeutung gewinnt. Die Abhängigkeit dieser Effekte von dem dominanten Einfallswinkel des Lichtes auf das menschliche Auge ist ein Forschungsschwerpunkt am Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin. Ziel dieser Arbeit ist es, einen bereits vorhandenen Versuchsraum baulich für einen Probandenversuch im Bereich NIF vorzubereiten und lichttechnisch klar nach den relevanten Normen (bspw. CIE S026 und DIN SPEC 5031-100) und über deren Anforderungen hinausgehend zu charakterisieren.

In dem Versuch sollen zwei Lichtszenen gezeigt werden, die bei fester Blickrichtung die Augen der Probanden aus zwei unterschiedlichen Regionen beleuchten. Dabei soll eine jeweilige vertikale Beleuchtungsstärke von 1000 Lux am Auge erreicht werden. Das Spektrum soll einer typischen Bürosituation entsprechen, dabei eine hohe melanopisch gewichtete Bestrahlungsstärke besitzen, und in beiden Lichtsituation gleich sein.

Realisiert wird dies mit insgesamt 12 LED-Paneelen mit jeweils 3 unterschiedlichen LED-Gruppen (kaltweiß, warmweiß, blau). Die Anordnung im Raum wird mittels einer DIALux-Simulation im Vorfeld ermittelt und anschließend umgesetzt.

Für die Messung der lichttechnischen Eigenschaften wird zunächst mittels eines Spektroradiometers das mit $V(\lambda)$ bewertete Spektrum am Probandensitzplatz aufgenommen. Dabei wird zugleich verifiziert, dass eine Beleuchtungsstärke von 1000 Lux in beiden Lichtsituationen erreicht wird.



Anschließend wird ein Leuchtdichtebild sowie Strahldichteaufnahmen melanopisch- und $V'(\lambda)$ -gewichtet, des Raumes erstellt, um eine genaue Dokumentation der Lichtsituation zu ermöglichen. Ergänzt werden diese durch Spotmessungen mit dem Spektroradiometer in aussagekräftigen Raumrichtungen.

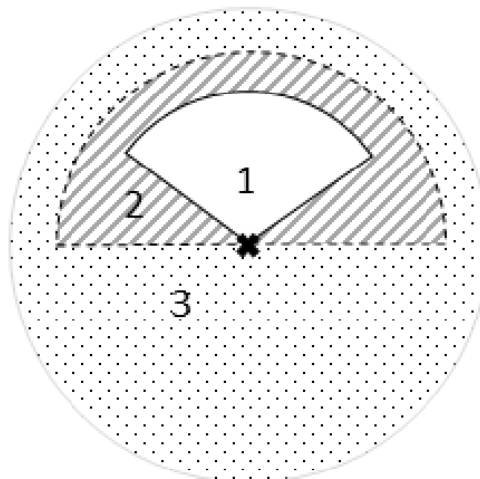
Zur Sicherstellung der zeitlichen Stabilität werden die Messungen wiederholt über eine längere Einschaltphase der LED-Paneele durchgeführt.

Die eingerichteten Lichtszenen zeigen sich über einen mehrstündigen Zeitraum stabil und erfüllen die Anforderungen des Probandenversuchs.

Einleitung

Die Untersuchung der Richtungsabhängigkeit der NIF-Effekte erfordert zwei unterschiedliche Lichtsituationen, welche zum einen hauptsächlich aus der von Knoop u. a. [3] definierten Region 3 den Probanden beleuchten bzw. eine Haupteinfallrichtung des Lichtes aus Region 1 und 2 realisieren sollen.

Abb. 1: 3 Regionen nach Kai Broszjo



Das Spektrum der beiden Szenen darf sich aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht unterscheiden und sollte eine sehr hohe melanopische Wirksamkeit aufweisen. Da das melanopische Wirkspektrum [4] sein Maximum im bläulichen Bereich des sichtbaren Spektrums hat, sollte die ähnlichste Farbtemperatur sowie die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge E_v für eine maximale melanopische Wirksamkeit möglichst hoch sein. In dem

vorherigen Probandenversuch von Kai Broszio wurde für E_v ein Wert von 1000 lx aus der Hälfte des Halbraumes erreicht (2000 lx insgesamt). Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit diesem Versuch, wird der Zielwert für E_v in beiden Lichtsituationen ebenfalls auf 1000 lx festgelegt.

Eine genaue Analyse und Dokumentierung der realisierten Lichtsituationen ist im Anschluss an die Umsetzung unverzichtbar, um eine Vergleichbarkeit des Probandenversuches sicherzustellen.

Aus diesen Überlegungen folgten für die vorliegende Arbeit zwei Fragestellungen:

1. Wie kann ein Versuchsraum konfiguriert werden, welcher die oben genannten Anforderungen angemessen gut erfüllt?
2. Wie sieht eine vergleichbare Dokumentation der lichttechnischen Verhältnisse für eine Studie im Bereich der NIF aus?

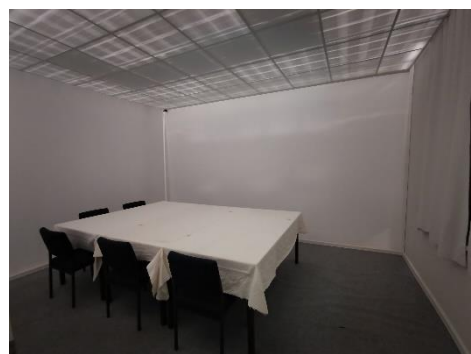
Aufbau und Methodik

Zur Ermittlung einer anforderungsgerechten Konfiguration der 12 zur Verfügung stehenden LED-Leuchten, wurde das Testbüro vermessen und in die Lichtsimulationssoftware DIALux evo eingepflegt.

Abb. 2: Simulation des Büros



Abb. 3: Foto des Büros



Zur Realisierung der beiden Lichtszenen (Beleuchtung der oberen- bzw. unteren Hemisphäre der Retina) wurde sich für eine Aufteilung der LED-Paneele auf zwei Bereiche im Testbüro entschieden. Die Beleuchtung der oberen Hemisphäre, im Folgenden Lichtszene 1 genannt, soll durch in der

Raumdecke angebrachte Paneele gewährleistet werden. Durch die Reflexion des Lichtes auf der Tischdecke, kann somit eine dominante Beleuchtung der oberen Hemisphäre der Retina erreicht werden. Lichtszene 2 soll durch die in der dem Probanden gegenüberliegende Wand angebrachte Paneele die untere Hemisphäre beleuchten. In einer ersten Simulation ordnete der Autor für die Lichtszene 2 drei der LED-Paneele in einer Reihe auf einer Höhe der Unterkante von 2m an. Jedoch sorgten die in dieser Konfiguration vorhandenen hohen Leuchtdichten für zu große Blendungseffekte, sodass die Anzahl der verwendeten Leuchten auf fünf in gleicher Anordnung erhöht wurde. Die sieben verbleibenden Paneele wurden in einer U-Form in der Decke über dem Tisch positioniert. Der Bereich direkt oberhalb des Probandensitzplatzes wurde dabei ausgespart, um die direkte Beleuchtung zu minimieren.

Unter Benutzung der Leuchtendaten wurde anschließend eine Berechnung der vertikalen Beleuchtungsstärken an der Position des Gesichtes des Probanden (in der Simulation durch einen annähernd hautfarbenen Quader repräsentiert) durchgeführt. Aufgrund der zu erwartenden Größenunterschiede der Probanden und unkalkulierbaren Kopfbewegungen, wurde ein Berechnungsbereich von 30cmx30cm mit einer Mittelpunkthöhe von 115cm mittig des Tisches festgelegt. Zusätzlich wurde an dieser Position das Unified Glare Rating (UGR) ermittelt, um eine normüberschreitende Blendung des Probanden auszuschließen.

In einem iterativen Prozess wurde daraufhin für beide Lichtszenen eine Einstellung der drei LED-Kanäle gefunden, welche eine Beleuchtungsstärke von jeweils 1000 Lux erreicht und dabei ein UGR von 19 nicht überschreitet. Da die gewählte Anordnung diese Anforderung mit ausreichend Reserven erfüllte, wurde diese Konfiguration als geeignet befunden und im Testbüro umgesetzt. Die sich ergebenden Lichtsituationen, sind in den folgenden Abbildungen dargestellt und beschrieben.

Tab. 1: Dimmerwerte der beiden Lichtszenen sowie gemessener CRI und $a_{v, mel}$

Lichtszene	480nm [%]	2000K [%]	4000K [%]	CRI	$a_{v, mel}$
1	58	0	80	80,96	1,61
2	73	0	94	79,29	1,63

Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 4: Lichtszene 1



Abb. 5: Lichtszene 2



Die maßgeblichen Größen, die zur Beschreibung einer Lichtsituation für Versuche im Bereich der nicht-visuellen Lichtwirkungen anzugeben sind, werden in der DIN SPEC 5031-100 [4] spezifiziert. Da die Norm derzeit überarbeitet wird, orientiert sich diese Arbeit zudem an über die Norm hinausgehenden Anforderungen, wie sie unter anderem in der CIE 026 [1] und dem Paper „Methods to Describe and Measure Lighting Conditions in Experiments on Non-Image-Forming Aspects“ [3] formuliert sind. Die folgende Auflistung beinhaltet die wesentlichen Größen, welche für die Beschreibung der Versuchssituation als erforderlich angesehen werden und deren Ergebnisse ausgewertet werden:

1. mittlere melanopisch bewertete Strahldichte der leuchtenden Fläche L_{mel}
2. mittlere Leuchtdichte der leuchtenden Fläche $L_{v,s}$
3. melanopischer Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$
4. Ähnlichste Farbtemperatur (CCT)
5. Allgemeiner Farbwiedergabe Index (CRI)
6. Unified Glare Rating (UGR)
7. vertikale Bestrahlungsstärke am Auge
8. vertikale Beleuchtungsstärke E_v am Auge
9. α -opisch bewertete Bestrahlungsstärke am Auge
10. zeitliche Veränderung der spektralen Verhältnisse
11. räumliche spektrale Unterschiede
12. regional empfangene gewichtete Bestrahlungsstärken

Ergebnisse

Tabelle 2 zeigt die ermittelten Größen 1-6 sortiert pro Lichtszene. Die Daten zeigen keine relevanten Unterschiede zwischen den beiden Situationen. Die Angaben zum Unified Glare Rating beruhen aus Gründen des unverhältnismäßigen Aufwandes lediglich auf dem simulierten Modell und spiegeln die reale Situation daher nur annähernd wieder.

Tab. 2: Ausgewertete Größen 1-6

	Lichtszene 1	Lichtszene 2
L_{mel} in $[\frac{W}{sr \cdot m^2}]$	5947	5816
$L_{v,s}$ in $[\frac{cd}{m^2}]$	2598	2600
$a_{mel,v}$	1.61	1.63
CCT	6233	6194
CRI	80.96	79.29
UGR	<10	17.3

Quelle: Eigene Darstellung

Die Lichtverhältnisse am Auge schlüsselt Tabelle 3 auf. Ergänzend zur genormten waagerechten Messposition wurde eine zweite, um 15° zur Horizontalen geneigte Position, erfasst. Diese entspricht der zu erwartenden Blickrichtung der lesenden Probanden. Die Abweichungen zwischen den beiden Lichtszenen in der waagerechten Position ist auch hier minimal. In der geneigten Position sind größere Unterschiede feststellbar und die Lichtexposition der Probanden in Lichtszene 2 als höher einzustufen. Die Beleuchtungsstärke liegt etwa 80 lx über dem geforderten Maß, da die Lichteinstellung der Szenen aus Vergleichbarkeitsgründen mit einem fehlerbehafteten Spektroradiometer durchgeführt wurden.

Tab. 3: Auswertung Spektroradiometer-Messung

	Lichtszene 1		Lichtszene 2	
	Waagrecht	15°Neigung	Waagrecht	15°Neigung
Beleuchtungsstärke [lx]	1082.55	855.31	1084.77	987.91
Cyanopisch bewertete Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	75.60	58.69	74.76	67.59
Melanopisch bewertete Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	160.85	125.64	163.57	148.40
Rhodopisch bewertete Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	176.23	137.99	178.22	161.84
Chloropisch bewertete Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	186.86	147.02	188.03	171.02
Erythropisch bewertete Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	190.44	150.36	191.50	174.37
Bestrahlungsstärke [$\frac{\mu W}{cm^2}$]	393.55	309.88	397.72	361.78

Quelle: Eigene Darstellung

Die Messkurven der Langzeitmessungen sind in Abb. 6 dargestellt. Die insgesamt etwa 1800 Messungen pro Lichtszene sind auf jeweils 230 Messkurven gemittelt worden. Vor Beginn der Messungen befanden sich die Leuchten über einen langen Zeitraum in einem ausgeschalteten Zustand. Die Ergebnisse der Messungen zeigen eine kontinuierliche Abnahme des Spektrums über die gesamte Messdauer. Zur besseren Visualisierung zeigt daher Abb. 7 das Differenzspektrum der ersten und letzten Messung als repräsentative Entwicklung. Die Abweichungen über den Zeitraum der 2 Stunden zeigen keine deutliche spektrale Veränderung und einen vernachlässigbaren Abfall der gesamten Beleuchtungsstärke

Abb. 6a: Langzeitmessung Lichtszene 1

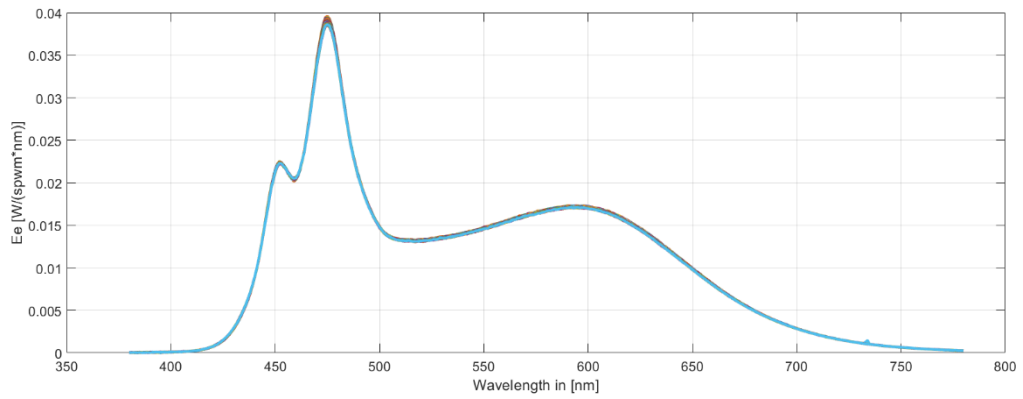


Abb. 6b: Langzeitmessung Lichtszene 2

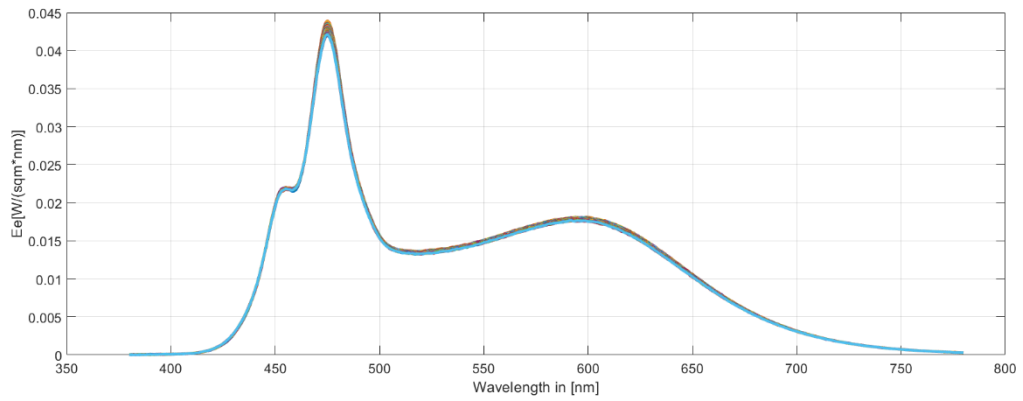


Abb. 7a: Differenzspektrum Lichtszene 1

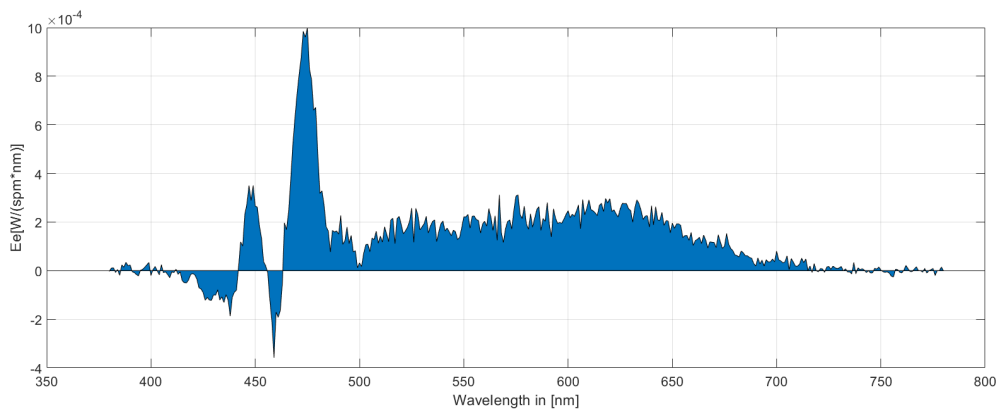


Abb. 7b: Differenzspektrum Lichtszene 2

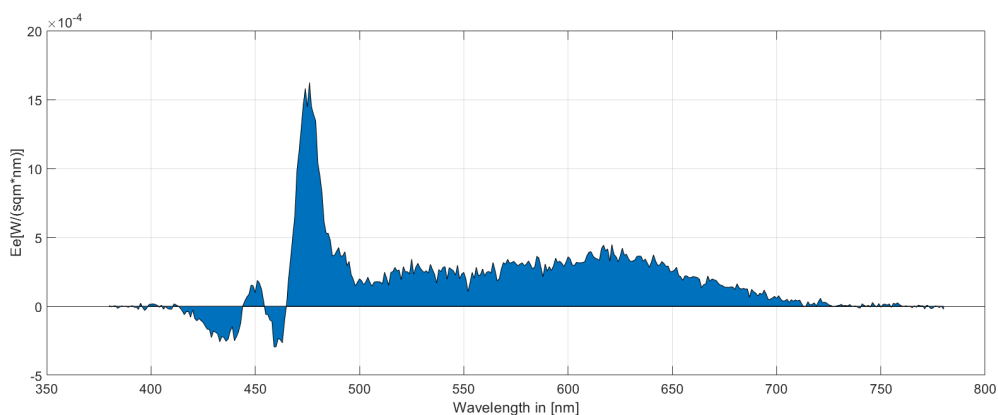


Tabelle 4 zeigt die Verteilung des einfallenden Lichtes auf die drei Regionen. Zu sehen ist eine dominante Beleuchtung der Probanden aus Region 3 in Lichtszene 1. Region 1 und 2 tragen hauptsächlich zur Beleuchtungsstärke in Lichtszene 2 bei.

Tab. 4: Anteile der gewichteten Bestrahlungsstärken am jeweiligen Gesamtwert aus den 3 Regionen in %

	Lichtszene 1		Lichtszene 2	
	E_{mel}	$E_{v,s}$	E_{mel}	$E_{v,s}$
Region 1	7,18	6,9	52,45	52,59
Region 2	30,18	29,86	16,36	16,01
Region 3	62,64	63,24	31,19	31,19

Quelle: Eigene Darstellung

Fazit

Die Auswertung der Messungen zeigt, dass die Anforderungen an den Versuchsraum bei der Konfiguration eingehalten werden konnten. Lichtszene 1 beleuchtet die Probanden vornehmlich aus Region 3, während Lichtszene 2 den geforderten Hauptlichteinfall aus Region 1 und 2 realisiert. Beide Szenen zeichnen sich durch ein sehr ähnliches Spektrum mit einem hohen melanopischen Wirkungsgrad und einer vertikalen Beleuchtungsstärke von über 1000 lux am Auge aus. Als limitierender Faktor einer weiteren Steigerung des melanopischen Wirkungsgrades, stellte sich die

Anforderung an eine adäquate Farbwiedergabe heraus [2]. Die Lichtbedingungen in dem Testbüro sind über einen Versuchszeitraum von zwei Stunden als stabil zu betrachten und die Variation des Spektrums innerhalb des Raumes liegt in einem vertretbaren Rahmen. Eine Einschätzung der subjektiven Blendung sollte in der Durchführung des Versuches von den Probanden eingeholt werden.

Die Dokumentation des Versuchsaufbaus erforderte eine Zusammenstellung verschiedener Anforderungen, die aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Schriften an eine vollständige Dokumentation nicht-visueller Versuche gestellt werden. Ein gesammeltes Template für eine einheitliche Dokumentation wäre wünschenswert.

Referenzen

- [1] CIE (2018): CIE Draft International Standard (DIS 026/E:2018): CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light.
- [2] Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (Hg.) (2016): LICHT 2016 : Karlsruhe, 25. - 28. September; Tagungsband - Proceedings ; [22. Gemeinschaftstagung = 22nd Associations' Meeting]: KIT Scientific Publishing.
- [3] Martine Knoop; Kai Broszio; Aicha Diakite; Carolin Liedtke; Matthias Niedling; Inga Rothert et al. (2019): Methods to Describe and Measure Lighting Conditions in Experiments on Non-Image-Forming Aspects. In: *LEUKOS* 0 (0), S. 1–17. DOI: 10.1080/15502724.2018.1518716.
- [4] SPEC, D. I.N.: 5031-100 (2015): Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik-Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen-Größen. In: *Formelzeichen und Wirkungsspektren*.

Finde den NIF- Supersitzplatz

Nadine Eichbrett, Kai Broszio, Stephan Völker

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik

Einsteinufer 19, 10587 Berlin; nadine.s.eichbrett@campus.tu-berlin.de

Einführung

NIF-Effekte (eng. non-image-forming, NIF) werden von vielen Parametern beeinflusst. Zum einen von der vorherrschenden Lichtsituation, zum anderen vom Faktor Mensch. Die Lichtsituation wird durch die spektrale und räumliche Verteilung sowie eine mögliche Dynamik des Lichts, den Zeitpunkt der Beleuchtung, Richtung der Lichteinstrahlung sowie die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge bestimmt. Beim Menschen spielt z.B. das Alter, der individuelle Chronotyp, der Zeitpunkt der Lichtexposition im Hinblick auf zirkadiane Änderungen sowie die Lichthistorie eine Rolle (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV); CIE) .

Die für NIF-Effekte hauptverantwortlichen intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC) sind besonders für blaues Licht empfindlich. Das für sie festgelegte Aktionsspektrum wird als melanopisches Wirkungsspektrum ($s_{mel}(\lambda)$) bezeichnet. Forschungen ergaben, dass hohe Beleuchtungsstärken und hohe ähnlichste Farbtemperaturen einen positiven Effekt auf nicht visuelle Wirkungen haben. Zudem gibt es Hinweise darauf, dass die Sensitivität der ipRGCs von deren Lage auf der Netzhaut abhängt, wobei sie im unteren Teil der Netzhaut eine höhere Empfindlichkeit aufweisen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass auch Zapfen und Stäbchen einen Einfluss auf NIF-Effekte haben (DIN Deutsches Institut für Normung e. V; Lucas et al. 2014)

Dieser Beitrag zeigt anhand der lichttechnischen Charakterisierung eines Hörsaals der TU Berlin welchen Einfluss die Wahl des Sitzplatzes, unter zusätzlicher Berücksichtigung der Lichteinfallrichtung und möglicher empfindlicher Regionen der Netzhaut, auf den Stimulus für NIF-Effekte hat.

Ziel ist es, anhand der spektral und räumlich aufgelösten Messungen einen oder mehrere optimale Sitzplätze im Hörsaal zu ermitteln, an denen optimale Lichtbedingungen für NIF-Effekte herrschen. Zusätzlich soll untersucht werden, welchen Einfluss die zusätzliche Berücksichtigung der Lichteinfallrichtung und vermuteter, empfindlicher, retinaler Regionen des Beobachters auf die Position des optimalen Sitzplatzes hat. Besonderes Augenmerk wird dabei auch darauf gerichtet, welchen Einfluss die Projektionsfläche im vorderen Teil des Hörsaals auf die melanopisch gewichtete Bestrahlungsstärke hat.



Methodik

Der Hörsaal HE101 ist mit einer speziellen Beleuchtungsanlage ausgestattet. Die verbauten Langfeldleuchten, sind mit jeweils fünf verschiedenen Leuchtstofflampen (blau, grün, rot, kaltweiß, warmweiß; genaue Daten sind nicht verfügbar) bestückt. Diese Leuchtstofflampen können separat angesteuert werden und ermöglichen die Einstellung verschiedener Lichtszenen. Für fünf voreingestellte Lichtszenen wurden an 14 aussagekräftigen Plätzen räumlich und spektral aufgelöste Messungen vorgenommen. Aufgrund vorangegangener Messungen im Hörsaal wird von einer hohen Gleichmäßigkeit der einzelnen Lichtszenen ausgegangen und wegen des symmetrischen Aufbaus nur auf einer Seite des Hörsaals gemessen. Wobei die Reihe 8 im Messraster zur Überprüfung dieser Annahme dient.

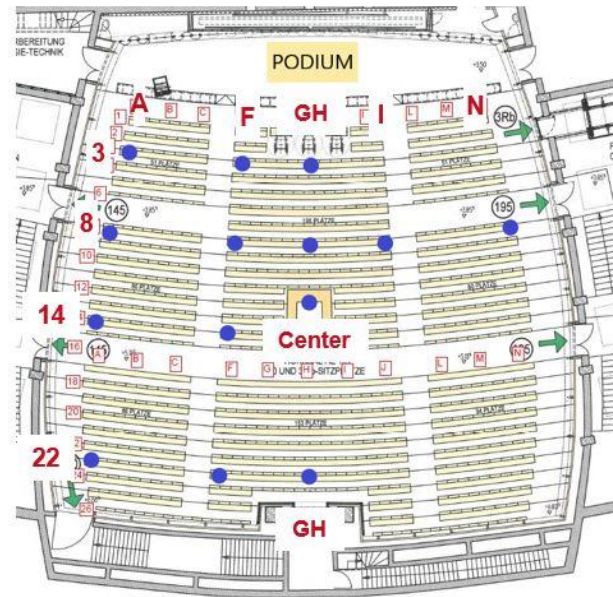


Abbildung 1: Sitzplan des HE101 mit Messpunkten



Abbildung 2: Messaufbau. Leuchtdichtkamera LMK 5 color (links), Radiospektrometer und Beleuchtungsstärkemessgerät für E_v (rechts), sowie für E_h auf

Die Messgeräte wurden mit Hilfe von Stativen parallel zueinander an einem Messpunkt aufgestellt und in Blickrichtung ausgerichtet (Abb. 2). Die vertikale Beleuchtungsstärke sowie das vertikale Spektrum am Auge, wurden mittels einer Halterung auf gleicher Höhe von 1,20m gemessen (Jeti Specbos 1211UV & Czibula & Grundmann MobiLux). Zusätzlich wurden auf derselben Höhe Leuchtdichte- bzw. Strahldichteaufnahmen aufgenommen. Die Besonderheit dieser Aufnahmen ist, dass die dafür verwendete Leuchtdichtkamera (TechnoTeam LMK 5 color) verschiedene Filter ($V(\lambda)$, $V'(\lambda)$, $s_{mel}(\lambda)$) besitzt, sodass die räumlich aufgelösten rezeptorbezogenen Bestrahlungsstärken für alle Rezeptortypen erfasst wurden. Die horizontale Beleuchtungsstärke auf der Nutzfläche wurde auf dem Tisch des dazugehörigen Sitzplatzes gemessen. Somit wurden die Raumparameter in größerem Detail beschrieben, als dies in vielen bisherigen Studien zu NIF-Wirkungen üblich war.

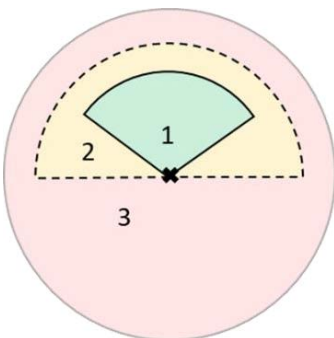


Abbildung 3: Einteilung wahrscheinlicher relevanter Regionen im oberen Halbraum für NIF-Effekte

Die räumliche Auswertung beruht darauf, dass sich, unter Berücksichtigung der retinalen Sensitivitätsunterschiede, anatomischer Einschränkungen und Abhängigkeit der Position der Lichtquelle, wahrscheinlich relevante Regionen im betrachteten Halbraum für NIF-Effekte finden lassen (Abb. 3).

Licht, welches aus Region 1 kommt, fällt auf die untere Netzhauthälfte in beiden Augen. Licht aus dieser Region wird eine sehr gute Wirksamkeit zugeschrieben. Licht aus Region 2 fällt jeweils nur auf die untere Netzhauthälfte in einem Auge. Dabei fällt es entweder auf die Nasenseite oder aus dem Höhenwinkelbereich über 45° - 60° in beide Augen. Licht aus dieser Region wird eine gute Wirksamkeit zugeschrieben. Licht, welches

aus Region 3 kommt, wird keine gewünschte Wirksamkeit für NIF-Effekte zugeschrieben. (Broszio et al. 2018; Knoop et al. 2019)

Auswertung und Ergebnisse

Anhand der Szene „Beamer“ erfolgt die Beschreibung und Auswertung der Ergebnisse. Für die Auswertung der räumlich aufgelösten Messungen wurden die Leuchtdichteaufnahmen, welche mit dem $V(\lambda)$ und dem $s_{mel}(\lambda)$ Filter aufgenommen wurden, mit der LMK LabSoft (Techno Team Bildverarbeitung GmbH) und einem MATLAB Programm (programmiert von Frederic Rudawski) verarbeitet (Abb.4).

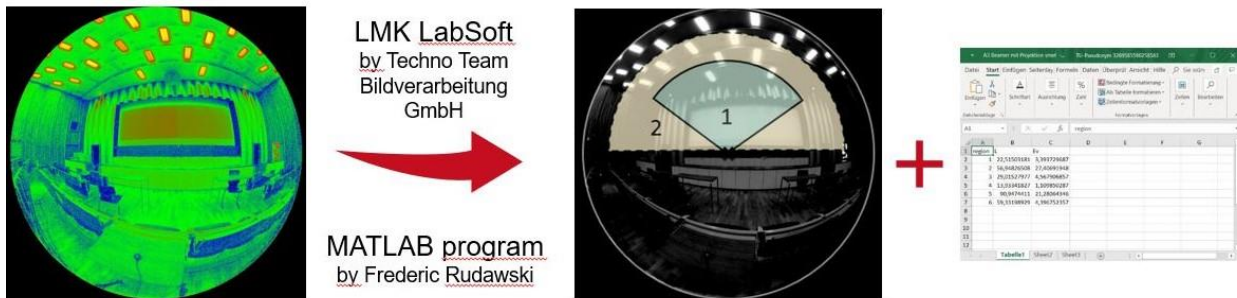


Abbildung 4: Schematischer Ablauf der Auswertung der Leuchtdichteaufnahmen

Es wurde für jede Aufnahme eine Bilddatei und eine Excel Tabelle mit dem Leuchtdichte- und dem Bestrahlungsstärkebeitrag jeder Region ausgegeben. Bei der verwendeten Leuchtdichtekamera handelt es sich um eine Spezialanfertigung ohne Anpassung der Software LabSoft des Herstellers TechnoTeam an den $s_{mel}(\lambda)$ Filter und die damit gemessenen Werte. Die Messwerte geben somit nicht die melanopisch gewichtete Bestrahlungsstärke in W/m^2 wieder, aber verhalten sich proportional zu dieser. Diese Werte wurden über einen schematischen Sitzplan aufgetragen und verglichen (Abb. 5).



Abbildung 5: Links: $E_{e,v,mel}$ über alle Regionen. Rechts: $E_{e,v,mel}$ aus den vermuteten empfindlichen Regionen 1+2 und die prozentualen Anteile bezogen auf den Absolutwert aus allen Regionen des jeweiligen Sitzplatzes

Links in Abbildung 5 ist die vertikale melanopische Bestrahlungsstärke aus allen drei Regionen (Abb. 3) über einen schematischen Sitzplan aufgetragen. Im Zentrum befindet sich der höchste Wert für die $E_{e,v,mel}$. Im Verlauf von Reihe drei zur mittleren Reihe ist eine stetige Zunahme zu erkennen. Von der mittleren Reihe zur hinteren Reihe nimmt die $E_{e,v,mel}$ wieder stark ab.

Im Vergleich dazu sieht man rechts den Anteil der $E_{e,v, mel}$ aus den Regionen eins und zwei bezogen auf den jeweiligen Sitzplatz. Es ist ersichtlich, dass an jedem Platz ca. 50% der $E_{e,v, mel}$ aus dem für NIF-Effekte vermutlich relevanten Regionen kommen. An Platz A14 kommen sogar 76% aus den Regionen eins und zwei. Maximale absolute Werte der melanopisch gewichteten Bestrahlungsstärke finden sich an dem Platz (Center – GH/Center) in der Mitte und dem Platz N8 ganz rechts.

Für die Auswertung der spektral aufgelösten Messungen wurden die aufgenommenen Spektren in die CIE Irradiance Toolbox (http://files.cie.co.at/784_TN003_Toolbox.xls) eingegeben und die melanopisch gewichtete Bestrahlungsstärke für jeden Sitzplatz berechnet (Abb. 6).

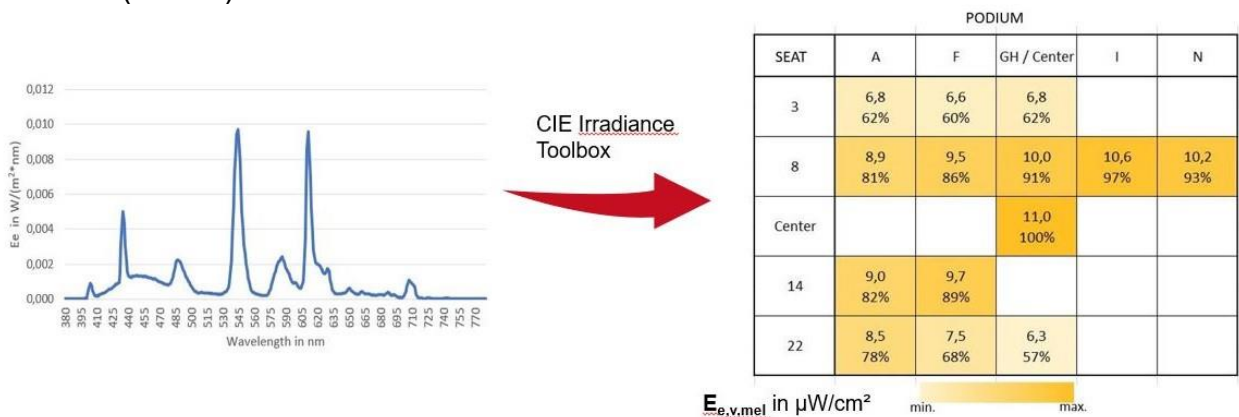


Abbildung 6: Schematische Auswertung der spektral aufgelösten Messung. Eingabe eines Spektrums in die CIE Irradiance Toolbox, Ausgabe der melanopisch gewichteten Bestrahlungsstärken in $\mu W/m^2$ an jedem Messpunkt.

Der Vergleich erfolgt zwischen den Werten bei eingeschalteter und ausgeschalteter Projektionsfläche (Abb. 7).

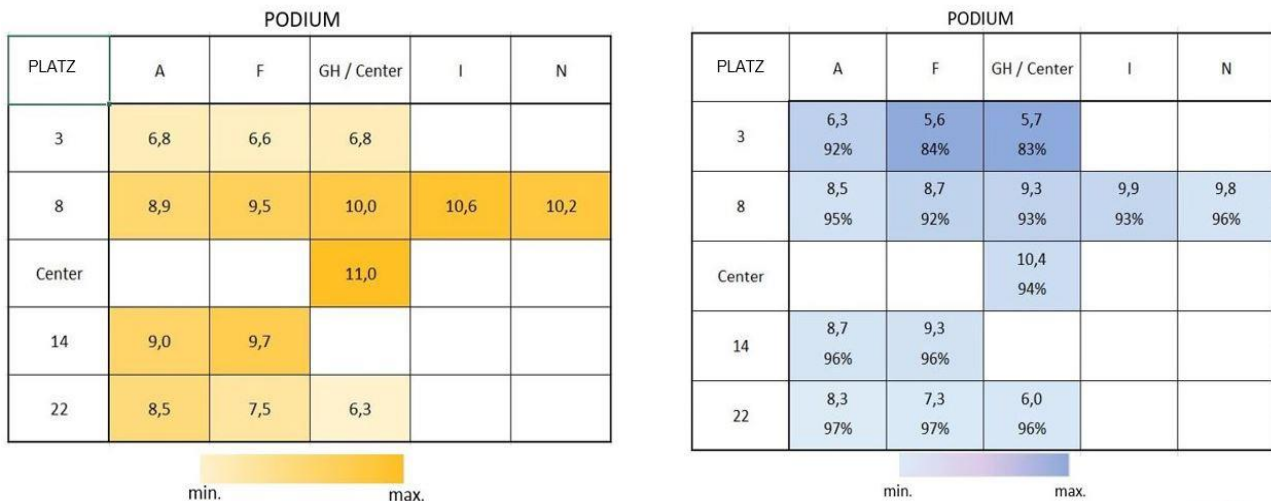


Abbildung 7: Schematischer Sitzplan. Vergleich der melanopisch gewichteten Bestrahlungsstärke in $\mu W/cm^2$ bei eingeschalteter Projektionsfläche (links) und ausgeschalteter Projektionsfläche bezogen auf den jeweiligen Sitzplatz (rechts).

In Abbildung 7 ist die melanopisch gewichtete Bestrahlungsstärke in $\mu W/cm^2$ sowohl bei eingeschalteter als auch bei ausgeschalteter Projektionsfläche über einen schematischen Sitzplan aufgetragen.

Links sind die Absolutwerte der melanopisch gewichteten Bestrahlungsstärke bei eingeschalteter Projektionsfläche aufgetragen. Die Werte in den Reihen drei, acht und 14

fallen höher aus, als in der dritten und letzten Reihe. Auch im Verlauf vom Rand (Reihe A) zur Mitte (Reihe GH / Center) hin ist eine Zunahme der melanopisch gewichteten Bestrahlungsstärke zu sehen.

Rechts ist die auf den jeweiligen Sitzplatz bezogene melanopisch gewichtete Bestrahlungsstärke bei ausgeschalteter Projektionsfläche aufgetragen. Die Prozentzahl gibt an, wieviel der ursprünglichen melanopisch gewichteten Bestrahlungsstärke im Vergleich zur eingeschalteten Projektionsfläche am jeweiligen Platz ankommt.

In den vorderen Reihen nimmt die melanopisch gewichtete Bestrahlungsstärke bis zu 17% ab. In der hinteren Reihe nimmt der Einfluss der Projektionsfläche ab, beträgt aber immer noch bis zu 4%.

Im Randbereich ist auch ein Einfluss der Projektionsfläche zu erkennen, wobei dieser im Vergleich zum Verlauf vom vorderen zum mittleren Bereich, geringer ausfällt.

Die erwartete Symmetrie konnte weder bei den räumlich als auch bei den spektral aufgelösten Messungen nachgewiesen werden, was auf falsch verbaute Leuchtstofflampen und zusätzlich eingeschaltete Strahler in der Decke zurückzuführen sein könnte.

Fazit und Diskussion

Der Anteil der vertikalen melanopischen Bestrahlungsstärke aus den für NIF-Effekte möglichen relevanten Regionen ist im mittleren Bereich des Hörsaals am höchsten. Besonders auffällig ist Platz A14 mit 76% Bestrahlungsstärkeanteil aus Region eins und zwei. Möglicherweise beeinflussen zusätzlich in diesem Bereich verbaute Strahler die Messung, so dass sich dieser Platz als besonders günstig erweist.

Der Vergleich der melanopisch gewichteten Bestrahlungsstärke bei ein- und ausgeschalteter Projektionsfläche zeigt, dass sich in beiden Lichtsituationen im mittleren Bereich des Hörsaals die besten Bedingungen für NIF-Effekte herrschen.

Der Einfluss der Projektionsfläche ist, wie erwartet, in den vorderen Reihen besonders hoch, lässt nach Hinten und in den Randbereichen stark nach, ist aber immer noch vorhanden. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die Holzvertäfelung im Randbereich des Hörsaals einen weiteren Einfluss ausübt.

Die erwartete Symmetrie konnte weder bei den räumlich als auch bei den spektral aufgelösten Messungen nachgewiesen werden, was eventuell durch falsch verbaute Leuchtstofflampen und zusätzlich eingeschaltete Strahler in der Decke verursacht wird. Hier bedarf es der Prüfung ob sich gegebenenfalls auf der nicht vermessenen Seite des Hörsaals weitere „ideale“ Sitzplätze befinden.

Alles in allem weisen die Messungen darauf hin, dass unter der Berücksichtigung der Lichteinfallrichtung und möglicher empfindlicher Regionen der Netzhaut, die Wahl des Sitzplatzes durchaus einen Einfluss auf den Stimulus für NIF-Effekte hat. Die unter den Lichtbedingungen „idealen“ Sitzplätze befinden sich im mittleren Bereich dieses Hörsaals, wobei besonders der Sitzplatz GH Center / Center hervorzuheben ist.

Literaturverzeichnis

Broszio, Kai; Knoop, Martine; Niedling, Mathias; Völker, Stephan (2018): Effective Radiant Flux for Non-image Forming Effects – is the Illuminance and the Melanopic Irradiance at the Eye Really the Right Measure? In: *Light & Engineering/Svetotekhnika* 26 (2), S. 68–74.

CIE: CIE 218:2016. Research Roadmap for Healthful Interior Lighting Applications. Unter Mitarbeit von J. A. Veitch, F. Bisegna, S. Hubalek, M. Knoop, Y. Koga, H. Noguchi et al. CIE (218), zuletzt geprüft am 15.09.2016.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV): DGUV Information 215-220 „Nichtvisuelle Wirkungen von Licht auf Menschen“.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V: DIN SPEC 5031-100.

Knoop, Martine; Broszio, Kai; Diakite, Aicha; Liedtke, Carolin; Niedling, Mathias; Rothert, Inga et al. (2019): Methods to Describe and Measure Lighting Conditions in Experiments on Non-Image-Forming Aspects. In: *LEUKOS*, S. 1–17. DOI: 10.1080/15502724.2018.1518716.

Lucas, Robert J.; Peirson, Stuart N.; Berson, David M.; Brown, Timothy M.; Cooper, Howard M.; Czeisler, Charles A. et al. (2014): Measuring and using light in the melanopsin age. In: *Trends in neurosciences* 37 (1), S. 1–9. DOI: 10.1016/j.tins.2013.10.004.

Research on the electrical parameters of modern LED street luminaire

Assoc. Prof. Orlin Lyubomirov Petrov, PhD

University of Ruse; Ruse; BULGARIA

opetrov@uni-ruse.bg

Abstract

The report presents the study of the electrical parameters (P, Q, S, $\cos \varphi$, harmonic pollution, etc.) of a modern LED street luminaire.

For the purpose of the study, an LED streetlight luminaire with COB-LED and a glass optical system was selected. The electrical power of the luminaire is 30 watts, the power supply voltage is 220 volts, the driver is on reputable manufacturer.

The luminaire has been studied for a long period of operation for a period of 1 month. To measure the data, a power network analyzer with very good accuracy and the ability to record the measured parameters is used. The report presents the results of the measurement of the LED illuminator and the processing of the received data.

There are made appropriate conclusions from the study.

Index Terms: LED street light, LED parameters, electrical parameters of LED

1 Introduction/Einleitung

The use of LED street luminaires is becoming more and more common in the design and reconstruction of street lighting systems. Taking into account the advantages of LED luminaires (such as longer life, better efficiency, better light quality), we should also not overlook the problems that might arise on the parameters on power grid. This is mainly due to the fact, that these luminaires are electronic devices, that need a stable DC power supply. Typically, the power modules are pulse power supplies with different characteristics and qualities.

The purpose of the work is to study the electrical parameters (P, Q, S, $\cos \varphi$, PF, harmonic pollution and etc.) of a modern street lighting.



2 Exposition

For the purposes of the present study, a modern street LED luminaire was selected, with electrical power 30W and the 220 VAC supply voltage. The illuminator is shown in Fig. 1. Fig. 2 shows the light distribution curve and the cone diagram of the luminaire.



Figure 1. LED street luminaire Vega 1-30

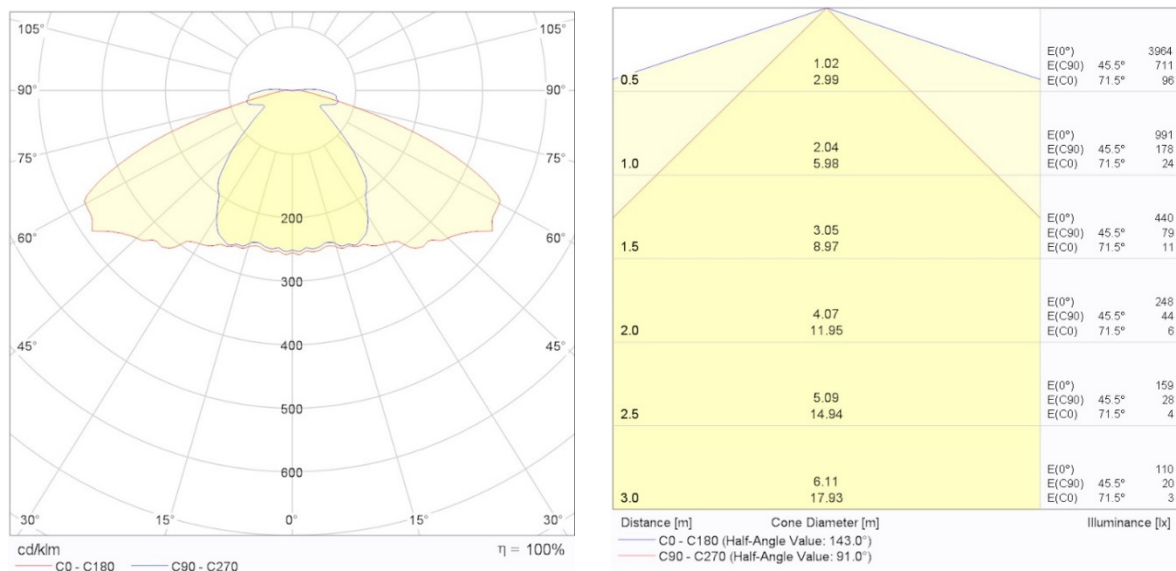


Figure 2. Light distribution curve and the cone diagram of the luminaire Vega 1-30

In the table 1 are shown the characteristics of street LED luminaire.

Table 1.

Technical characteristics of the tested luminaire

Model	Vega 1-30
LED Chip	CITIZEN
LED Driver	Meanwell
Power Factor	> 0.95
Input Voltage	190 – 250 V
Electrical Power	30 W
Luminous Flux	3900 Lm
Type of light	DayLight
Color temperature	5000 K
Index on Color Rendering	> 80 Ra
Working range	–35 °C to +45 °C
Protection	IP 66
Operating Life	over 50 000 h
Body	Aluminum

The network analyzer - BMR Power Line Analyzer PLA33DL with very good technical parameters and good measurement accuracy ($\pm 1\%$ error) was used to study the electrical parameters of the power supply network. The measurement is carried out for one month during the summer period, with the interval of recording the parameters being 5 min. The summer period is selected since the illuminator is operating in a heavier temperature mode. The measurements meet the requirements of EN 61010-1, EN 61000.

After processing the obtained results, was calculated the averaged values of the electrical parameters, and there are presented in Table 2. On Fig. 3.1 - 3.3 there are shown the graphical dependencies of some of the studied parameters.

Table 2.**Measurement of the electrical parameters of the tested luminaire****Voltage parameters**

Harmonic, Y	Y _u , V	Y _u , %
1	224,5	100
3	1	0,5
5	3,7	1,6
7	0,6	0,3
9	1,3	0,6
11	0,5	0,2
13	0,9	0,4
15	0,7	0,3
17	0,4	0,2
19	0,4	0,2

P =	0,031	kW
S =	0,032	kVA
cos φ =	0,957	
PF =	0,931	
Q =	-0,007	kVAr

THD U =	1,9	%
RMS =	224,6	V

Current parameters

Harmonic, Y	Y _i , A	Y _i , %
1	0,15	100
3	0,08	55,2
5	0,03	17,2
7	0,01	3,4
9	0	0
11	0	0
13	0	0
15	0	0
17	0,01	3,4
19	0	0

THD I =	55,1	%
RMS =	0,15	A

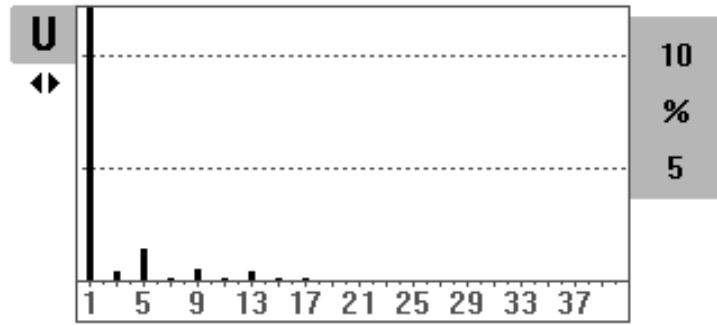


Figure 3.1. Generated Harmonic Voltage Pollution

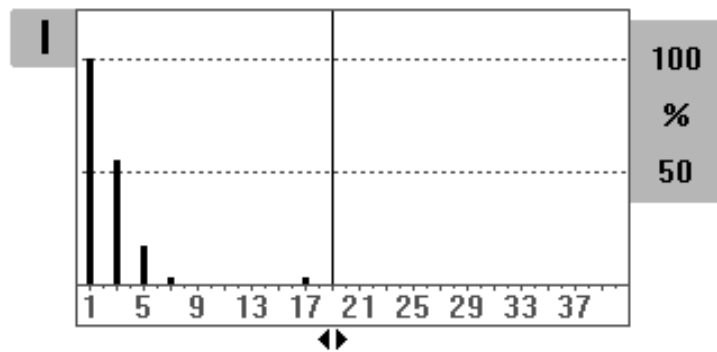


Figure 3.2. Generated Harmonic Current Pollution

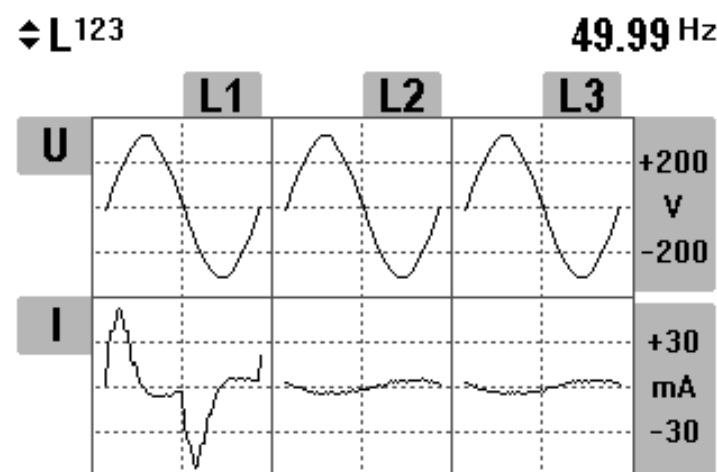


Figure 3.3. Form of the sinewave of the supply voltage and current

After analyzing the presented data, we can observe the following:

- The basic electrical parameters, determining the quality of the electrical energy, for the studied luminaire are very good. The $\cos \varphi$ parameter has a high value close to that declared by the manufacturer. The PF parameter also has a high value. These two parameters indicate that we will have minimal losses of reactive energy;
- The THD U parameter, defining the generated harmonic voltage pollutions, has a very small value. This is also evident from the graphical interpretation of voltage harmonics;
- The THD I parameter defining the generated total harmonic current pollutions has a very high value exceeding the recommended one according to EN 61000. From the graphical dependence, it is apparent that these are mainly harmonics 3 and 5;
- The current sine wave is highly distorted, due to the high THD I parameter.

3 Conclusion

1. The electrical parameters of a street-type LED luminaire of a modern type were studied. Tested luminaire have a nominal electrical power of 30 W and a quality power module.
2. It has been established from the tests, that the THD I parameter, which determines the generated total harmonic current pollutions, has a very high value (THD I = 55.1%) exceeding the recommended according to EN 61000. From the graphical dependence are shown that this is harmonics with numbers 3 and 5. When constructing a lighting system comprising many luminaires, respectively increasing the power of the system, it can be expected that the influence of harmonics on current will be substantial.
3. The remaining electrical parameters are within the limits prescribed by the standard.

4 References

- [1] EN 61000-2018. Electromagnetic compatibility.
- [2] EN 61010-2018. Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use.
- [3] Dimitrijević, M., Litovski, V., Power Factor and Distortion Measuring for Small Loads Using USB Acquisition Module, Journal of Circuits Systems and Computers 20 No. 5, pp. 867–880, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, Aug 2011

- [4] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, Or Unbalanced Conditions, IEEE Std, pp. 1459-2010, March 2010.
- [5] Majithia CA, AV Desai, AK Panchal, Harmonic analysis of some light sources used for domestic lighting, *Lighting Res. Technol.* 2011; 43: pp. 371–380, DOI 10.1177/1477153510394597
- [6] Tagare, D. M., *Reactive Power Management*, McGraw-Hill Education, 2007.
- [7] Wakileh, J. G., *Power Systems Harmonics*, Springer, 2001.
- [8] Webster, J. G., *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, IEEE Press, 1999.

Investigation of the suitability of high-power LEDs for the use as radiation source for PTB's gonioreflectometer

Irina Santourian¹, Sven Teichert¹, Kai-Olaf Hauer¹, Dr. Alfred Schirmacher¹

¹Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig

Abstract

The application areas in which light-emitting diodes (LEDs) are used as radiation sources are growing steadily. Main reasons are their long lifetime, efficiency and the available high radiation power. Also, the increase of accessible spectral ranges through the use and production of new semiconductor compounds make them attractive for many applications.

Due to these advantages of LEDs, the suitability as (supplementary) radiation sources for the existing robot-based gonioreflectometer at PTB was investigated.

Index Terms: High-power LEDs, gonioreflectometer, radiance factor, homogeneous sphere radiator

1 Introduction

The PTB gonioreflectometer [1] is the national standard for directed diffuse reflection measurements to determine the absolute spectral radiance factor $\beta(\lambda)$ in a variety of bidirectional measurement geometries. The irradiation of a sample with a homogeneous unpolarized measuring beam is carried out by a special integrating sphere radiation source equipped with an internal 400 W quartz-tungsten halogen lamp [2]. This sphere radiator can be swiveled around the sample on a large rotation stage. In combination with a five-axis robot for sample manipulation placed in the center of the apparatus and with a fixed detection direction, this setup enables highly precise measurements [3] of the reflection properties of diffuse reflecting materials in almost any irradiation and detection geometry relative to the surface normal of the specimen.

The radiation source plays a key role within the measuring principle. A homogeneous radiation source with high output and with a highly Lambertian beam profile across a wide spectral range is required. Ideally the whole solar spectrum from 200 nm to



2500 nm should be covered to perform spectral radiance factor measurements. However, although using a high-power halogen lamp, the output of the sphere radiator is limited especially in the short wavelength range and considerably long measurement cycles are needed to gain good measurement statistics. The main reason for this difficulty results from the fact, that already when measuring white standards as examples for samples with highest reflection factor, the ratio between lamp and reflected signal is higher than 1000 : 1, getting even worse for standards exhibiting a short wavelength absorption edge.

Through current development in LED manufacturing such sources are available now with high power in the short wavelength range. Therefore, a sphere radiator based on LED sources was developed to improve the measurement capabilities of the existing robot-based gonireflectometer, laying the emphasis on the spectral range ranging from long UV to the short visible.

2 LED sphere radiation source

An LED sphere radiation source (LED sphere radiator, LED-SR) was constructed based on the principle of the currently used integrating sphere radiation source.

The outer part of the integrating sphere is made of aluminum and includes an inner part with a diameter of 150 mm made of sintered PTFE.

Due to its higher diffuse reflection in the short wavelength spectral range, sintered PTFE was used instead of a standard barium sulfate coating for the LED-SR. At the center of the sphere an internal reflector consisting of a barium sulphate coated aluminum plate is mounted. The position of the reflector can be adjusted with respect to the sphere's center to obtain a homogeneous reflected beam profile. As primary source a combination of three different types of commercially available high-power LEDs was chosen which emit in the wavelength range from 350 nm to 450 nm. The LEDs were mounted on a specially designed heat sink and air cooler (Figure 1). This new LED-SR retains the benefits of the existing system and improves the available radiant power in the short wavelength spectral range.

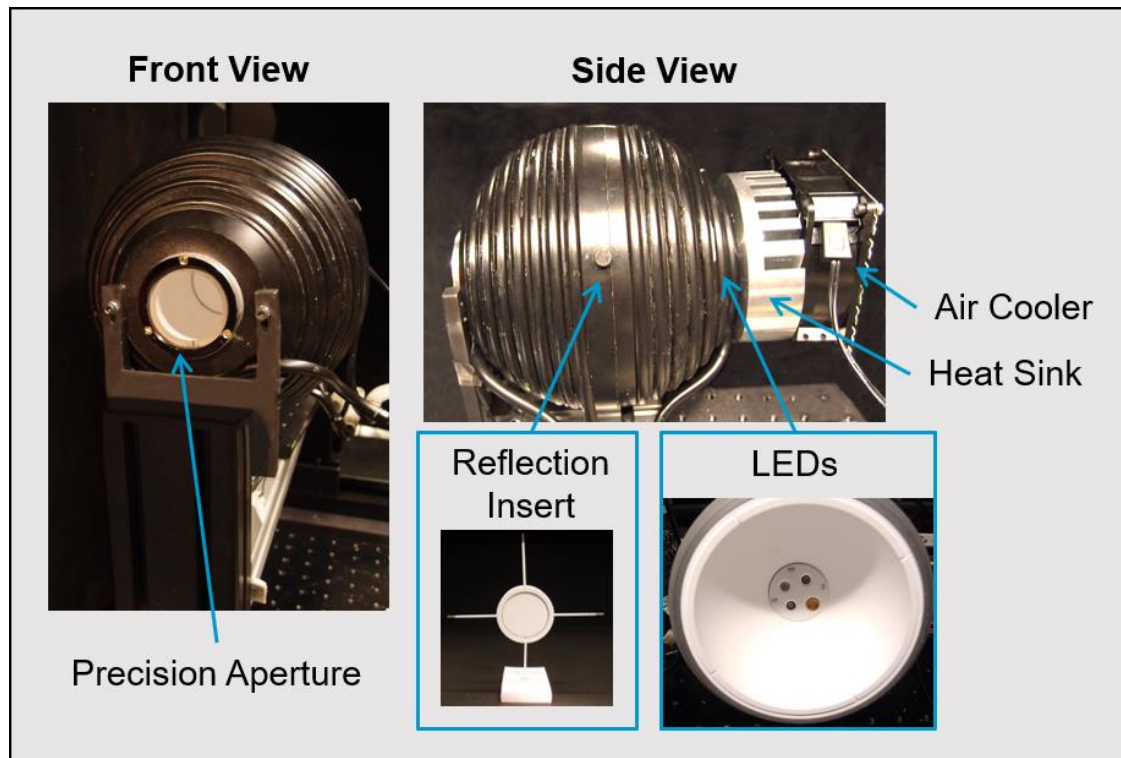


Figure 1: Structure of the LED sphere radiation source (LED-SR) with sintered PTFE coating and high-power LEDs (365 nm (x2), 395 nm and 415 nm).

3 Results and Discussion

Since the spectral range and coverage, the temporal stability, and the homogeneity of the radiation field on the sample surface are of great importance for goniometric measurements, especially these properties of the LED-SR were extensively investigated.

3.1 Spectral Range

The spectral irradiance of the developed LED-SR in comparison to the standardly used sphere radiation source is shown in Figure 2.

As expected by design, the LED-SR shows a spectrum consisting of a composition of the three peaks of the individual LEDs. Below 442 nm the LED-SR showed a significantly higher signal than the standard radiator along with only moderate variations in spectral irradiance.

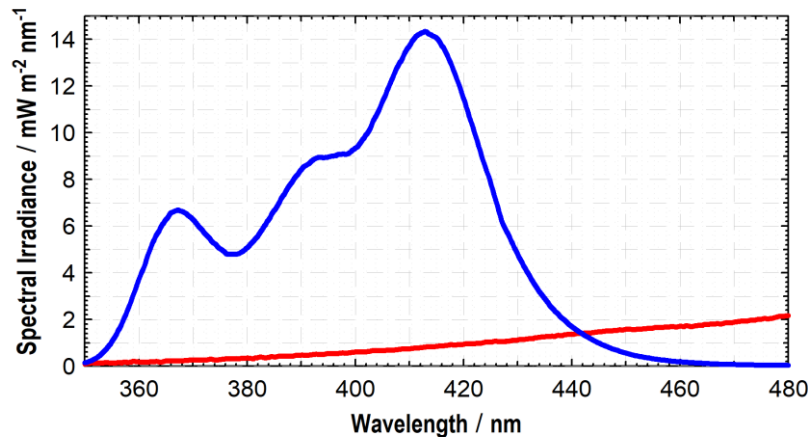


Figure 2: Spectral irradiance of the LED sphere radiation source (blue) and the standardly used sphere radiation source (red), measured with an Avantes (AvaSpec-ULS2048L StarLine) Array Spectrometer.

3.2 Output stability

The broad-band emission of the LED-SR was measured in the center of the precision aperture for 50 h by using an imaging lens (1 : 1) and a high precision silicon photodiode with an 2 mm aperture (Figure 3). A significant temperature-dependent oscillation of the photocurrent was observed, which is mainly due to the passive temperature regulation. The deviation of the photocurrent over the whole period was around 0.25 % (~0.06 nA).

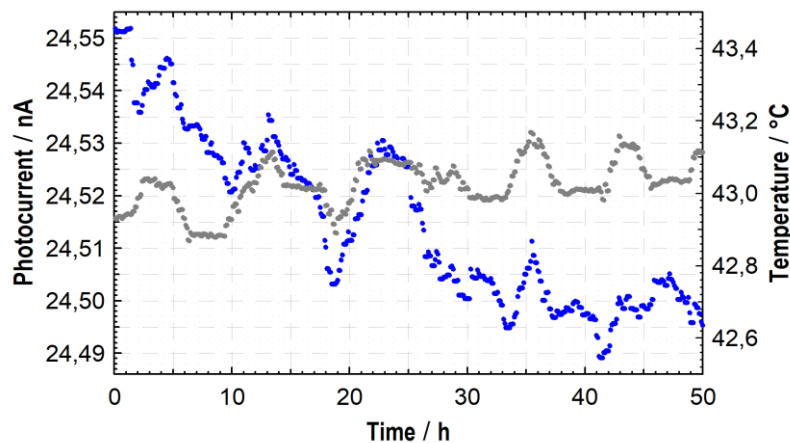


Figure 3: Detected photocurrent (blue) and the temperature of the LEDs (grey) of the LED-SR. The photocurrent was recorded with a Hamamatsu Si-Photodiode (S1337-1010BQ) and a Keysight digital multimeter (B2985A).

The relative decrease of the detected photocurrent of the LED-SR in comparison to a comparable model of the standardly used sphere radiator is shown in Figure 4. The relative change of the photocurrent for both radiation sources show, beside the temperature-dependent oscillation of the LED-SR, a similar trend. But the oscillations must be removed in a ready-to-measure system to gain the full advantage as offered by the considerably higher output.

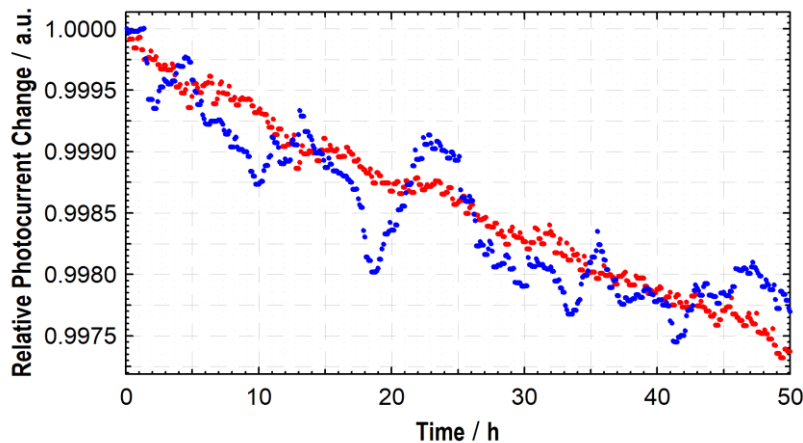


Figure 4: Measured relative photocurrent change of the LED-SR (blue) and the standardly used sphere radiator (red). Both curves have been normalized at time zero for comparison.

To get an understanding of the spectral stability, the spectrum was measured after a burn-in time of 0.5 h and an operation time of 1 h and 18 h (Figure 5). The deviation of the measured spectrum in the significant spectral range of the LEDs after the burn-in time to an operation time of 18 h was less than $\pm 1.5\%$. Due to the measurable thermal influence of the emission of the LED-SR as seen in the emitted photocurrent measurement (Figure 3) a final statement regarding the temporal and spectral stability is difficult to make. According to the long-term photocurrent measurement (Figure 3) the complete deviation of the spectrum after an operation time of 18 h corresponds to a change of the emitted photocurrent of about 0.02 nA to 0.04 nA.

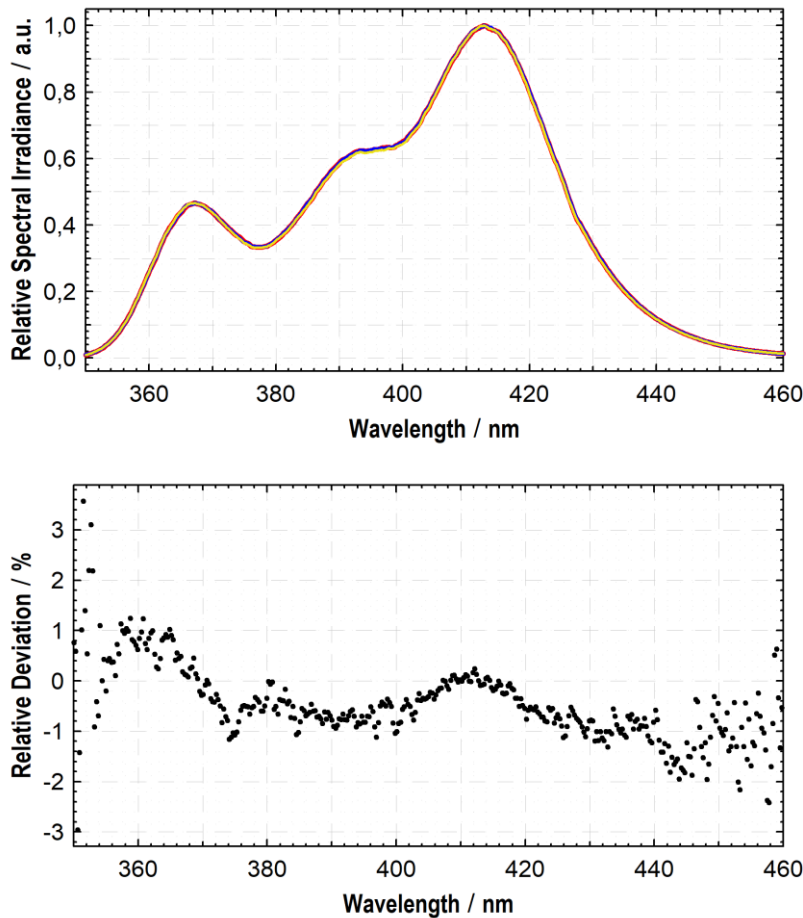


Figure 5: Top: Relative Spectral irradiance of the LED-SR measured with an Avantes (AvaSpec-ULS2048L StarLine) Array Spectrometer after a burn-in time of 0.5 h (red), an operation time of 1 h (blue) and 18 h (yellow). Bottom: Relative deviation of the measured LED-SR spectrum after an operation time of 18 h.

Based on the current cooling approach of the LED-SR (passive temperature control), the temporal stability can probably be improved by using an actively regulated temperature control, a modification which currently is in development. In addition, it must be checked whether the spectral stability of the LED-SR then meets the requirements of the final measurement setup.

3.3 Homogeneity of the radiation field

To verify the homogeneity of the emitted radiance of the LED-SR a measurement setup was built utilizing the principle of previous homogeneity measurements of the standardly used sphere radiation source [2].

The radiation source was mounted on a two-dimensional xy-translation stage. The emitted radiance was measured with a spot of 2 mm in diameter across the 40 mm precision aperture of the LED-SR by moving the radiation source row-wise with the

translation stage and using a 1:1 image generated by a $f = 500$ mm lens and a high precision silicon photodiode equipped with 2 mm aperture.

The measured beam profile depends on the position z of the reflecting insert placed inside and close to the center of the sphere radiator. The $z=0$ position is defined as the equatorial plane of the sphere radiator; therefore, the z -position indicates the distance of the reflector to the center of the sphere. A positive shift of the z -position means the reflector is moved towards the precision aperture of the sphere. A negative shift means the reflector is moved in the direction of the radiation source. By varying the z -position of the internal reflector a uniform beam distribution profile was adjusted. In [2] a detailed overview of the measurement setup and the measurement procedure is given.

Figure 6 shows the two-dimensional homogeneity plot of the emitted radiance of the LED-SR at a $z=-1.9$ mm position of the reflection insert normalized to the emitted radiance in the center of the precision aperture.

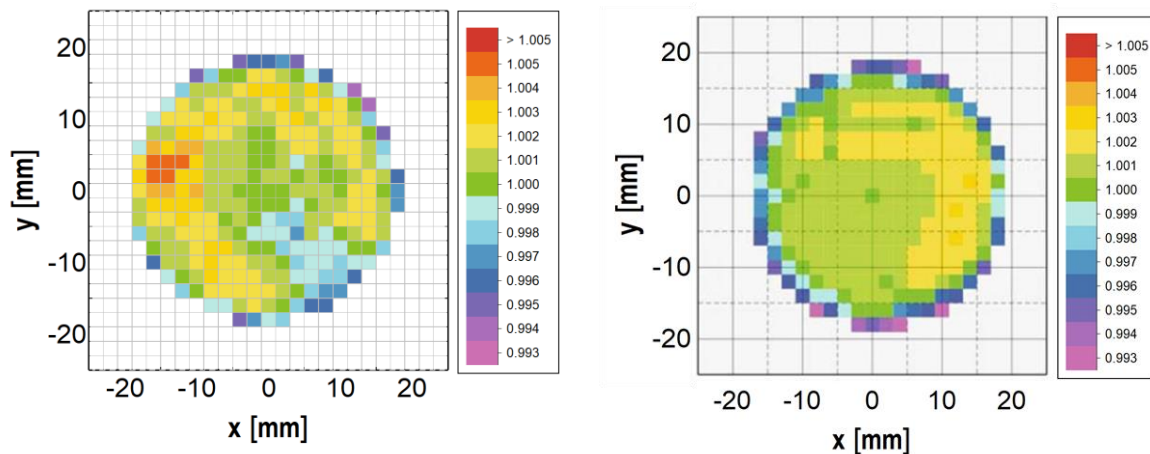


Figure 6: Homogeneity plot of the emitted radiance of the LED-SR at $z=-1.9$ mm position of the reflection insert (left side) compared with standardly used sphere radiation source using a 200 W quartz-tungsten halogen lamp at $z=-1.94$ mm position of the reflection insert (right side, picture taken from [2]) normalized to the emitted radiance in the center of the precision aperture.

It should be noted that the surface of the available reflection insert had two areas with small unevenness causing slight inhomogeneity. These are visible in the plot by red and light blue spots. This will be improved in the final version of the LED-SR by using a newly primed reflection plate. Moreover, a similar position of the reflection insert resulted as optimum position for the reflection target in the system under study.

Under this condition the homogeneity of the beam profile for the LED-SR is in the range of ± 0.5 %. This result is only slightly worse to the homogeneity plot of the standardly used sphere radiator with reflection insert in the optimum position ($z=-1.94$ mm). Exchanging the reflection insert and repeating the selection of the optimum z -position for the LED-SR will probably lead to an even better homogeneity of the beam profile.

4 Outlook

The first studies of a newly developed LED sphere radiation source showed that the basic properties such as spectral range and stability required for the use as the radiation source for the gonireflectometer were promising. An active temperature regulation should be added to the LED-SR to obtain a better temperature independent temporal stability. Also, the homogeneity of the radiation beam, which is an important parameter for the measurements, is comparable to the currently used integrating sphere radiation source.

In a next step of evaluation, the LED-SR it will be mounted on the measuring system to perform comparative measurements. Already realized preliminary tests with a previous LED-SR test model implemented in the gonireflectometer setup showed a smaller standard deviation for the radiation factor even with few measurement cycles. The results shown here and the discussed improvements indicate that the final version of the LED-SR will be a valuable supplementary radiation source for the existing robot-based gonireflectometer.

5 Acknowledgement

The authors thank the members of the mechanical workshop Jörn Hauffe, Morten John and Marcel Janik for the construction of several parts of the LED sphere radiation source. This work was partly supported by the European EURAMET Metrology Innovation and Research Program (EMPIR) (Grant No. JRP 16NRM08). We gratefully acknowledge the support of the Braunschweig International Graduate School of Metrology B-IGSM.

6 References

- [1] D. Hünerhoff, U. Grusemann, and A. Höpe, “New robot-based gonireflectometer for measuring spectral diffuse reflection”, *Metrologia*, BIPM and IOP Publishing Ltd, Vol. 43, No. 2, pp. 1-10, March 2006
- [2] K. Hauer and A. Höpe, “High-grade uniform light source for radiometric and photometric applications”, *MAPAN*, Springer Science+Business Media S.A., Vol. 24, No.3, pp. 175-182, September 2009
- [3] C. Strothkämper, A. Ferrero, A. Koo, P. Jaanson, G. Ged, G. Obein, S. Källberg, J. Audenaert, F. B. Leloup, F. M. Martínez-Verdú, E. Perales, A. Schirmacher, and J. Campos, “Multilateral spectral radiance factor scale comparison”, C. Strothkämper et al., *Applied Optics*, OSA Publishing, Vol. 56, No. 7, pp. 1996-2006, March 2017

LED-Beleuchtung in der Pferdehaltung. Horse Centric Lighting

Thomas Jost*, Serge Stephan*, Martin C. Stäcker*

*NORKA Automation GmbH, Lange Str. 1, DE-27313 Dörverden/Hülsen, Germany

Abstract/Zusammenfassung

Wie in allen Lebensbereichen werden auch in der Pferdehaltung künstliche Lichtquellen eingesetzt. Die in der Allgemeinbeleuchtung verwendeten weißen Leuchtdioden (LEDs) sind aus Effizienzgründen an die Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ des Menschen bei Tag angepasst. Das abgestrahlte Spektrum dieser Lichtquellen stimmt mit dem Sehempfinden der Pferde nicht überein. Im Vergleich zu den Menschaugen sind Pferdeaugen anatomisch anders aufgebaut [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Zudem sind Pferde dämmerungs- und nachtaktive Beutetiere, deren Sehvermögen an schlechte Lichtverhältnisse, Dunkelheit und die Wahrnehmung kleinster Unstimmigkeiten sehr gut angepasst ist [7, 8, 9]. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurde der Frage nachgegangen: In wie weit sind die weißen LEDs und die übliche Art der Allgemeinbeleuchtung für den Einsatz in der Pferdehaltung geeignet? Die gesammelten Informationen wurden bewertet und daraus ein Vorschlag zu einer theoretisch möglichen artgerechten Beleuchtung in der Pferdehaltung unter Beachtung der geltenden Normen erstellt.

Schlagwörter: EquiLumen, Beleuchtung, Pferd, artgerecht, Reitanlage, Stall, LED

Like in all areas of life, artificial lighting is also used in horse husbandry. The white light-emitting diodes (LEDs) used in general lighting are adjusted to the photopic luminosity function $V(\lambda)$ of the human. The radiated spectrum of thus light sources does not conform with the visual perception of horses. Compared to the human eyes, horse eyes are differently anatomically designed [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Moreover horses are crepuscular and nocturnal prey animals, whose vision is very well adapted to the dim light, darkness and the perception of the smallest discrepancies [7, 8, 9]. As part of a literature review, the question was asked: To what extent are the white LEDs and the usual type of lighting suitable for use in horse husbandry? A proposal for a theoretically possible species-appropriate illumination in horse keeping in compliance with the applicable standards was created.

Index Terms: EquiLumen, Lighting, Horse, species-appropriate, Horse husbandry, Stable, LED

1 Einleitung

In der modernen Pferdehaltung werden LED-Leuchten der Allgemeinbeleuchtung eingesetzt. Diese sind auf die Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$ des Menschen bei Tag abgestimmt. Es werden überwiegend LED-Lichtquellen mit einer Farbtemperatur CCT = 4000 K und einem Farbwiedergabewert CRI > 80 (im Weiteren LED₈₄₀) verwendet. Pferdeaugen sind im Vergleich zu Menschaugen anatomisch anders aufgebaut [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Zu dem nimmt ein Pferd seine Umwelt anders als ein Mensch wahr [10], so dass die marktüblichen LED-Lichtlösungen für eine tierartgerechte Pferdehaltung nicht optimal sind. Das Ziel dieser Arbeit ist eine Formulierung der Anforderungen an eine pferdegerechte Beleuchtung sowie die Evaluation einer theoretischen pferdegerechten Lichtquelle, die dem Stand der Technik entspricht, die gesetzlichen und normativen Vorgaben erfüllt sowie den Sehkomfort der Pferde verbessern soll.



2 Visuelle Wahrnehmung der Pferde

Pferde sind von Natur aus scheue, vorwiegend dämmerungs- und nachtaktive Beutetiere [7, 8, 9], die in größeren Herden zusammenleben [11, 12, 13]. Vor der Domestizierung war ihre Überlebensstrategie das ständige Beobachten ihres Umfeldes, das Erfassen von minimalen Unstimmigkeiten in der Umgebung, die auf ein Raubtier hindeuten können, und die sofortige Flucht von der mutmaßlichen Gefahrenquelle [9]. Diese Überlebenstaktik der Pferde setzt ein exzellentes weitwinkliges Sehvermögen voraus.

2.1 Sichtfeld eines Pferdes

Im Vergleich zu einem Menschen, der ein horizontales Sichtfeld von ca. 200° hat [9, 14, 15, 16], besitzt ein Pferd ein horizontales Sehfeld von ca. 340° [8, 9, 17, 18]. Ein Pferd hat somit nur eine kleine Blindzone von ca. 20°, die direkt hinter ihm ist. Wobei es nur in einem vorwärts gerichteten Bereich von ca. 60° dreidimensional sehen kann [8, 9, 17]. Im weiten Seitenbereich sieht es zweidimensional. Ein Mensch hat im Vergleich dazu ein binokulares Sichtfeld von ca. 110° [9, 14, 15, 16]. Abb. 1 zeigt schematisch die Sichtfelder eines Pferdes und eines Menschen. Sprunghafte visuelle Änderungen im einseitigen Peripheriebereich werden vom Pferd mit einem Raubtierangriff assoziiert und führen zum Scheuen des Tieres [9, 17].

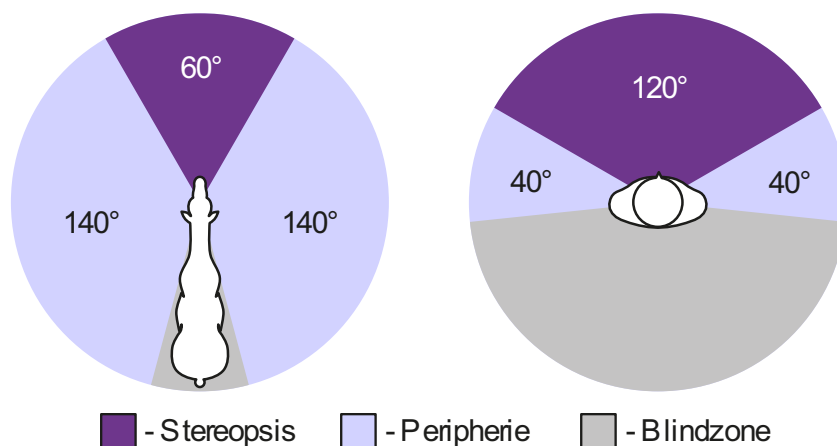


Abb. 1: Horizontales Sichtfeld eines Pferdes (links) und eines Menschen (rechts) [9].

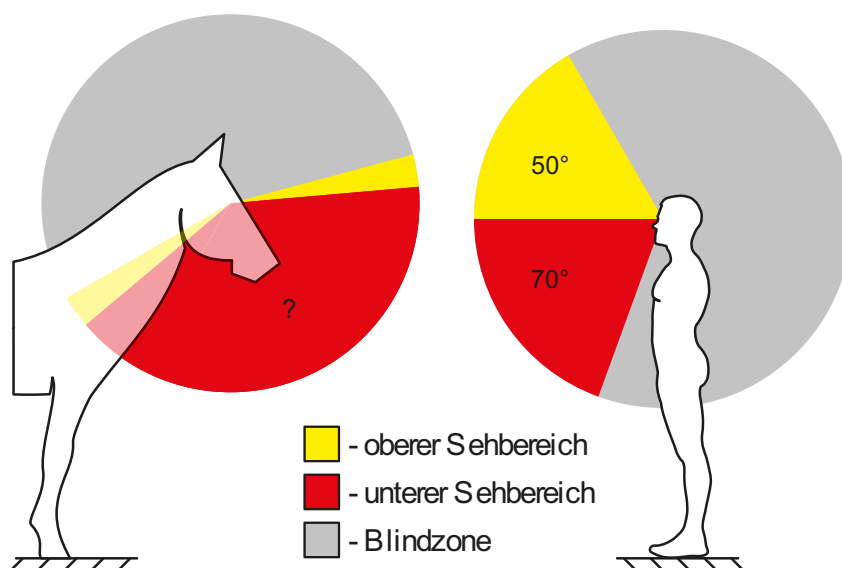


Abb. 2: Vertikales Sichtfeld eines Pferdes (links) und eines Menschen (rechts).

Lange Zeit wurde davon ausgegangen, dass Pferde Objekte, die sie mit nur einem Auge wahrgenommen haben, mit dem anderen Auge nicht wiedererkennen können. Diskriminationstests und anatomische Untersuchungen des Gehirnbalkens (Corpus callosum) bei Pferden zeigten, dass ein Austausch visueller Information zwischen den beiden Gehirnhälften stattfindet [1, 19, 20]. Allerdings ist der Gehirnbalken wesentlich kleiner als bei Menschen [1], so dass der Informationsaustausch klein sein muss.

Ein Mensch hat einen vertikalen Sehwinkel nach oben von ca. 50° und ein Sehwinkel nach unten von ca. 70° [21]. Bei Pferden ist der genaue Winkel des vertikalen Sichtfeldes unbekannt. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der Sehwinkel nach oben wesentlich kleiner als der Winkel nach unten ist [9, 17], da die natürlichen Feinde der Pferde vom Boden kommen. In Abb. 2 ist ein Vergleich vertikaler Sichtfelder eines Pferdes und eines Menschen schematisch gezeigt.

2.2 Hell-Dunkel-Adaption

Die Pferdeaugen sind durch die Dämmerungs- und Nachtaktivität der Pferde an die Dunkelheit sehr gut angepasst [7, 8, 9]. Wobei die Dunkel-Hell-Adaption - ähnlich wie beim Menschen - schneller als die Hell-Dunkel-Adaption ist [22, 23]. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei Pferden die Adaption an neue Lichtverhältnisse wesentlich länger als bei Menschen ist, da sich die Pferde in der Natur überwiegend im freien Feld aufhalten und an sprunghafte Helligkeitsverhältnisse nicht gewohnt sind. In Abb. 3 ist die Adaption eines Pferdeauges an neue Lichtverhältnisse schematisch skizziert.

Plötzliches Einschalten des Lichts hat eine starke Blendung eines Pferdes zur Folge und kann zum Scheuen des Tieres führen. Im Gegenzug sieht das Pferd beim plötzlichen Ausschalten des Lichtes für längere Zeit nichts, bis sich seine Augen an die neuen Lichtverhältnisse angepasst haben.

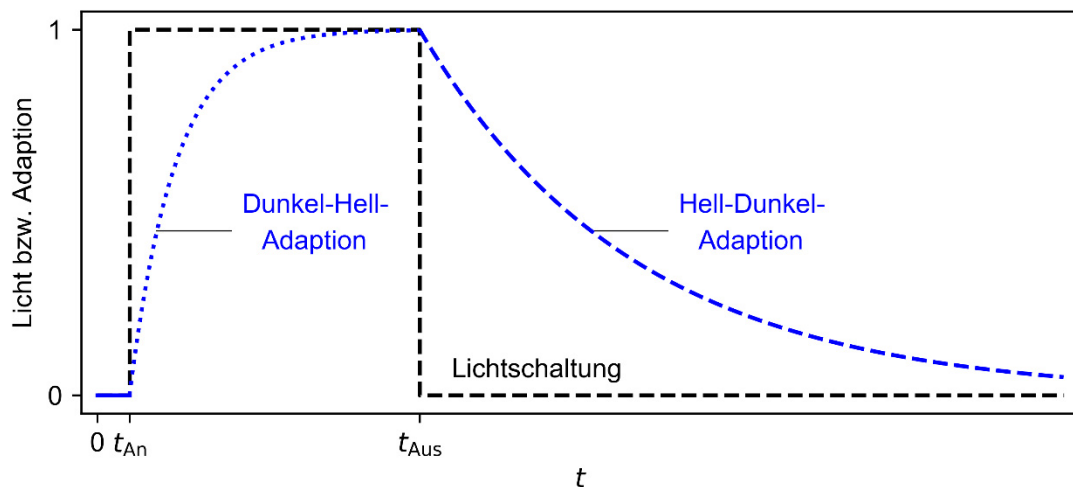


Abb. 3: Schematische Darstellung einer Lichtschaltung (schwarz, gestrichelt) sowie der Dunkel-Hell-Adaption (blau, gepunktet) und der Hell-Dunkel-Adaption (blau, gestrichelt) des Pferdeauges.

2.3 Farbsehen

Pferde sind Dichromaten [2, 4, 24, 25, 26]. Ihre Augen haben nur zwei Typen von Fotorezeptoren zur Farbwahrnehmung: M/L-Zapfen für grünes Licht und S-Zapfen für blaues Licht [2, 9, 17]. Dieses bedeutet, dass Pferde das Licht mit einer Wellenlänge $\lambda > 600$ nm (Farben Orange, Rot, Tiefrot) nicht wahrnehmen können [2, 4, 9]. Eine solche Farbwahrnehmung kann mit der Rot-Grün-Schwäche der Menschen verglichen werden [2, 9]. Sieht ein Mensch alle Regenbogenfarben, so werden die gleichen Lichtfarben von einem Pferd als Blau-Grün-Gelb-Grau wahrgenommen. Der Unterschied in dem Lichtfarbempfinden eines Menschen und eines Pferdes ist in Abb. 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei der Farbwahrnehmung des Pferdes die Farben Orange, Rot, Magenta und Violett fehlen.



Abb. 4: Farbwahrnehmung eines Menschen (links) und eines Pferdes (rechts) [2].

2.4 Hellempfindlichkeit

Die Hellempfindlichkeitskurve des Pferdes $V_H(\lambda)$ ist nicht definiert [27]. Ausgehend vom anatomischen Augenaufbau [1, 17], Nacht- und Dämmerungsaktivität [7], dem visuellen Neutralpunkt bei 480 nm [3] sowie der mittleren spektralen Empfindlichkeitsfunktion der M/L- und S-Zapfen [2] bei Pferden wird angenommen, dass die Hellempfindlichkeitskurve der Pferde $V_H(\lambda)$ der Hellempfindlichkeitskurve des Menschen bei Nacht $V'(\lambda)$ ähnelt und ihr Maximum bei $\lambda = 480$ nm hat. Die angenommene $V_H(\lambda)$ -Kurve ist in Abb. 5 (schwarz, gestrichelt) im Vergleich zu der $V'(\lambda)$ -Kurve (blau, gepunktet) und der $V(\lambda)$ -Kurve (orange, durchgezogen) dargestellt.

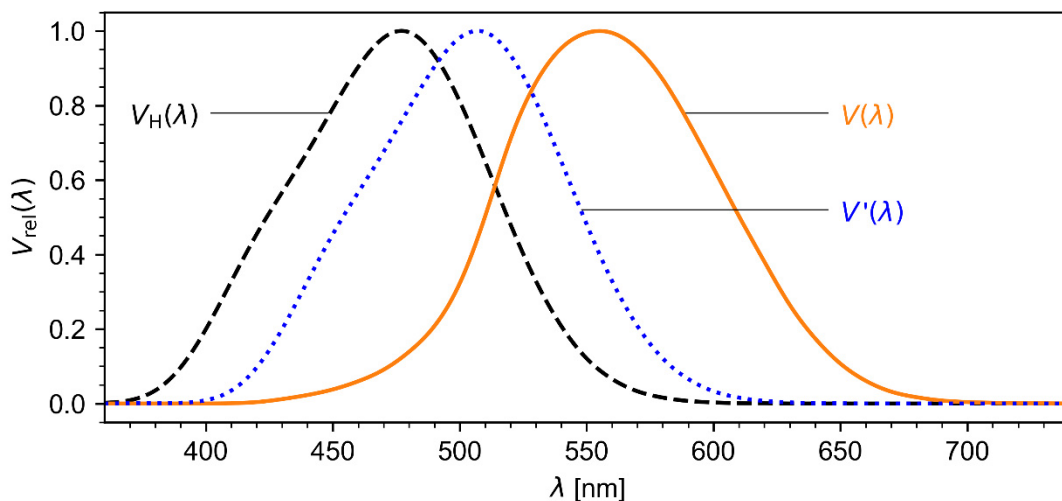


Abb. 5: Hellempfindlichkeitskurven des Menschen bei Tag $V(\lambda)$ und bei Nacht $V'(\lambda)$ sowie die angenommene Hellempfindlichkeitskurve des Pferdes $V_H(\lambda)$.

Für einen Vergleich unterschiedlicher Lichtquellen - in Bezug auf das Licht- und Hellempfinden der Pferde - wurde eine neue Einheit – EquiLumen (elm) – eingeführt. Die Einheit EquiLumen ist vergleichbar mit der Einheit Lumen. Mit EquiLumen wird der Lichtstrom Φ_{Hv} für Pferde mit der Formel

$$\Phi_{Hv} = K_{Hm} \int_0^{\infty} V_H(\lambda) \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} d\lambda$$

berechnet. Der Lichtstrom in EquiLumen gibt die mit der spektralen Hellempfindlichkeit des Pferdes gewichtete Strahlungsleistung einer Lichtquelle in einem Raumwinkel an. Zur Kennzeichnung wird der untere Index "Hv" für "Horse vision" verwendet. Der Zahlenwert K_{Hm} des Maximalwertes des photometrischen Strahlungsäquivalents wurde auf 1000 EquiLumen/Watt (elm/W) festgesetzt.

3 Pferdegerechte Lichtquelle

Eine pferdegerechte Lichtquelle muss nicht nur das Sehempfinden der Pferde verbessern, sondern auch dem Stand der Technik aus der Sicht des Menschen entsprechen. In naher Zukunft und auf lange Sicht wird nicht nur die Effizienz, sondern auch die Lichtqualität eine wesentliche Rolle in der Allgemeinbeleuchtung einnehmen. Gemäß der „Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld“ des BMU werden Lichtquellen mit einem Farbwiedergabewert von mindestens 90 in Verbindung mit einer nutzungsgerechter Lichtsteuerung gefördert [28]. Das zeigt deutlich die angestrebte Richtung der Beleuchtungsentwicklung. Deswegen soll eine pferdegerechte Lichtquelle auch einen Farbwiedergabewert CRI > 90 besitzen.

Bereits heute wird in vielen Bereichen ein hoher CRI-R9-Wert (gesättigter Rotlichtanteil) verlangt. Zum Beispiel fordert die Deutsche Bahn Netz AG für ihre Werkshallenbeleuchtung ein CRI-R9-Wert > 40 [29]. Ein Pferd sieht zwar das gesättigte Rotlicht nicht, dieser Rotlichtanteil ist aber für das menschliche Sehempfinden im roten Spektralbereich von hoher Bedeutung. Daher wurde bei der Evaluierung einer pferdegerechten Lichtquelle ein besonderer Wert auf den CRI-R9 gelegt.

Damit die pferdegerechte Beleuchtung bei den üblichen Beleuchtungsstärken von 80 bis 500 lx für den Menschen angenehm ist, wurde anhand der Behaglichkeitskurve [30] eine Farbtemperatur von maximal 5700 K angestrebt.

Wie bereits im Abs. 1 erläutert, wird sich der Vergleich einer pferdegerechten Lichtquelle in erster Linie auf die LED₈₄₀ beziehen. In Abs. 2.4 wurde gezeigt, dass die angenommene Hellempfindlichkeitskurve der Pferde $V_H(\lambda)$ im blau-grünen Spektralbereich liegt. Bei den üblichen LED₈₄₀-Leuchten weist genau dieser Bereich eine spektrale Lücke auf. Basierend auf der Erkenntnis der Farbwahrnehmung der Pferde aus dem Abs. 2.3 lässt sich folgern, dass mit dieser Art der Beleuchtung die Pferde kontrastarm sehen. Es fehlen spektrale Lichtanteile zwischen Blau und Grün. Für das kontrastreiche Sehen bei Pferden muss also bei einer pferdegerechten Lichtquelle genau diese spektrale Lücke geschlossen sein. Damit ergeben sich nachstehende technische Anforderungen an eine pferdegerechte Lichtquelle (LS_H = Light Source for Horses):

1. CCT < 5700 K
2. CRI ≥ 90
3. CRI-R9 ≥ 40
4. Effektivität > 130 lm/W
5. Geschlossene spektrale Lücke zwischen $\lambda = 450$ nm und $\lambda = 550$ nm

3.1 Mögliche Realisierung einer pferdegerechten Lichtquelle

Eine pferdegerechte Lichtquelle kann aus den LEDs mit den Farben Weiß, Blau, Cyan und Rot realisiert werden. Die weißen LEDs liefern das Grundspektrum, die Blau- und Cyan-LEDs schließen die spektrale Lücke zwischen $\lambda = 450$ nm und $\lambda = 550$ nm und die roten LEDs werden zum Anpassen der CRI- und CRI-R9-Werte verwendet. Das zahlenmäßige Verhältnis bei gleicher Bestromung mit I_{ref} und die Eigenschaften der LEDs sind in Tab. 1 aufgelistet.

LED	Eigenschaften	akt. typ. Effektivität	Verhältnis @ I_{ref}
Weiß	CCT = 4000 K, CRI > 70	210 lm/W	5/9
Blau	$\lambda_{Peak} = 475$ nm	44 lm/W	1/9
Cyan	$\lambda_{Peak} = 500$ nm	73 lm/W	2/9
Rot	$\lambda_{Peak} = 625$ nm	68 lm/W	1/9

Tab. 1: Übersicht der LEDs und ihrer Eigenschaften in der konzeptuellen pferdegerechten Lichtquelle.

Abb. 6 zeigt das Spektrum des Vorschlages einer pferdegerechten Lichtquelle und die $V_H(\lambda)$ -Kurve. Zum Vergleich ist ein Spektrum einer LED₈₄₀ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die LS_H die spektrale Lücke wie gefordert schließt. Die LS_H hat im Detail nachstehende theoretische Eigenschaften:

- CCT = 5150 K ($x = 0,3417$; $y = 0,3670$; $u' = 0,2034$; $v' = 0,4915$; $duv = 0,0089$)
- CRI = 90,5
- CRI-R9 = 78,3
- Effektivität 135 lm/W

Die LS_H hat CCT = 5150 K mit CRI = 90,5. Das ist mit einer weißen LED mit 5000 K, CRI > 90 (im Weiteren LED₉₅₀) vergleichbar. Ein entsprechendes LED-Spektrum ist Abb. 6 dargestellt.

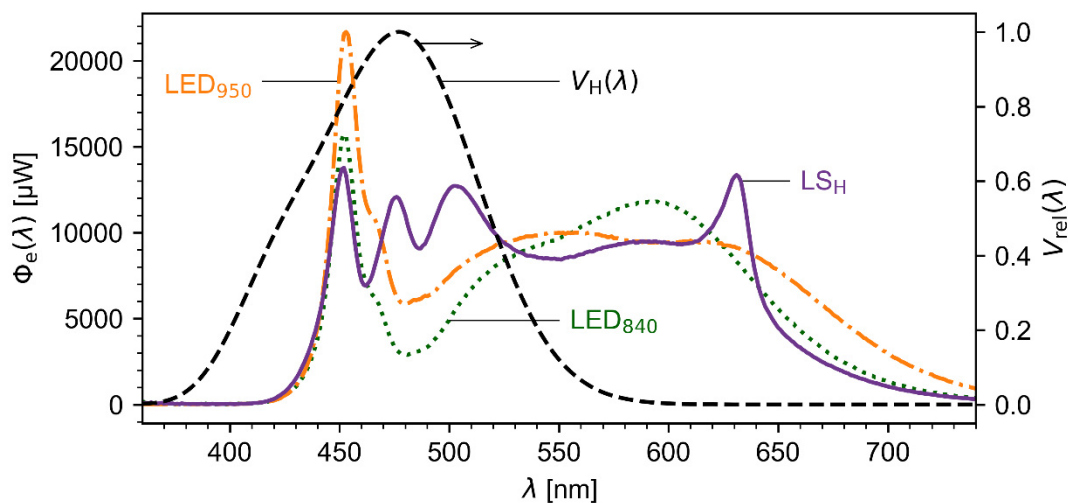


Abb. 6: Auf 683 lm normierte Spektren: LS_H (pferdegerechte Lichtquelle; violett, durchgezogen), LED₈₄₀ (CCT = 4000 K, CRI ≥ 80; grün, gepunktet), LED₉₅₀ (CCT = 5000 K, CRI ≥ 90; orange, strichgepunktet) sowie die $V_H(\lambda)$ -Kurve (schwarz, gestrichelt).

3.2 Lichtquellenvergleich

Für einen Vergleich der Spektren (LED₈₄₀, LED₉₅₀, LS_H) wurden diese mit $V(\lambda)$ -gewichtet und auf $\Phi_V = 683$ lm normiert. Das entspricht einer gewichteten Strahlungsleistung von 1 Watt. Die auf 683 lm normierten Spektren sind in Abb. 6 zu sehen. Die auf 683 lm normierten Spektren aus Abb. 6 wurden mit $V(\lambda)$ gewichtet und in Abb. 7 dargestellt. Alle Spektren zeigen eine ähnliche spektrale Leistungsverteilung, die die Form von $V(\lambda)$ -Kurve (siehe Abb. 5) widerspiegeln.

Abb. 8 zeigt CRI-R-Werte der Lichtquellen (LED₈₄₀, LED₉₅₀, LS_H). Ein Vergleich zu einer LED₈₄₀ zeigt, dass bei der LS_H die Lichtqualität in fast allen spektralen Bereichen deutlich besser geworden ist. Dieses spiegelt sich in dem CRI-Wert wider. Im Vergleich zu einer LED₉₅₀ sind die CRI-R-Werte ähnlich oder ungefähr gleich. Anhand des CRI-R5-Wertes (Türkisblau) und des CRI-R12-Wertes (Blau gesättigt) lässt sich aber ein deutlicher Unterschied im Bereich $\lambda = 450$ nm und $\lambda = 550$ nm erkennen. Bei der LS_H sind der CRI-R5-Wert bei 95,8 (93,2 bei LED₉₅₀) und der CRI-R12-Wert bei 85,2 (67,5 bei LED₉₅₀). Die Lücke im blau-grünen Spektralbereich ist geschlossen. Die auf 683 lm normierten Spektren aus Abb. 6 werden für den Vergleich im Hinblick auf visuelle Wahrnehmung der Pferde mit $V_H(\lambda)$ gewichtet. Die entsprechend gewichteten Spektren sind in Abb. 9 zu sehen. Wie es zu erwarten war, haben LED₈₄₀- und LED₉₅₀-Lichtquellen eine blau lastige spektrale Leistungsverteilung. Die LS_H zeigt dagegen eine gleichmäßigere spektrale Leistungsverteilung, höhere Intensität im blau-grünen Bereich und spiegelt die $V_H(\lambda)$ -Form (siehe Abb. 5) am besten wider. Einem Pferd sollte somit ein volleres Spektrum in seinem Sehbereich zur Verfügung stehen, so dass ein kontrastreicheres Sehen ermöglicht werden kann.

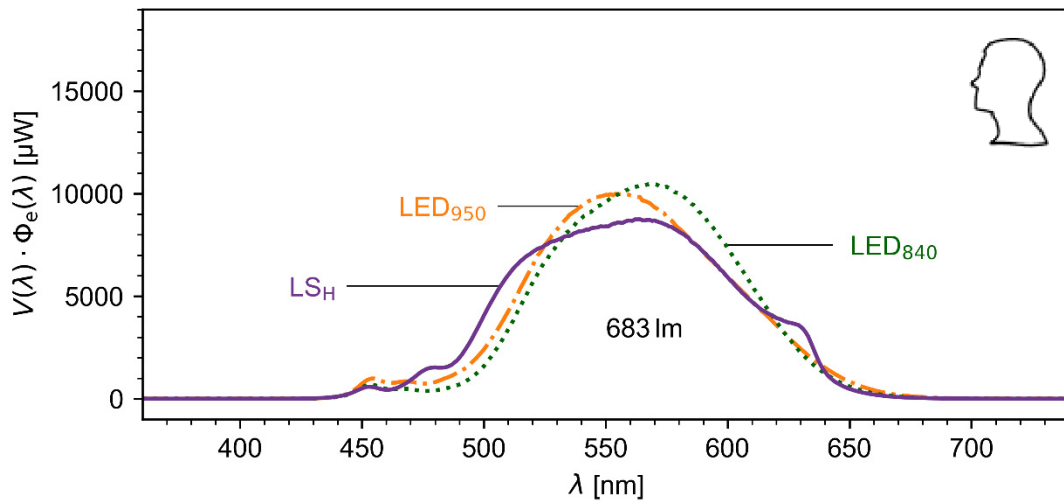


Abb. 7: $V(\lambda)$ -gewichtete Spektren (normiert auf 683 lm) aus Abb. 6: LS_H (violett, durchgezogen), LED_{840} (grün, gepunktet), LED_{950} (orange, strichgepunktet orange, punktgestrichelt).

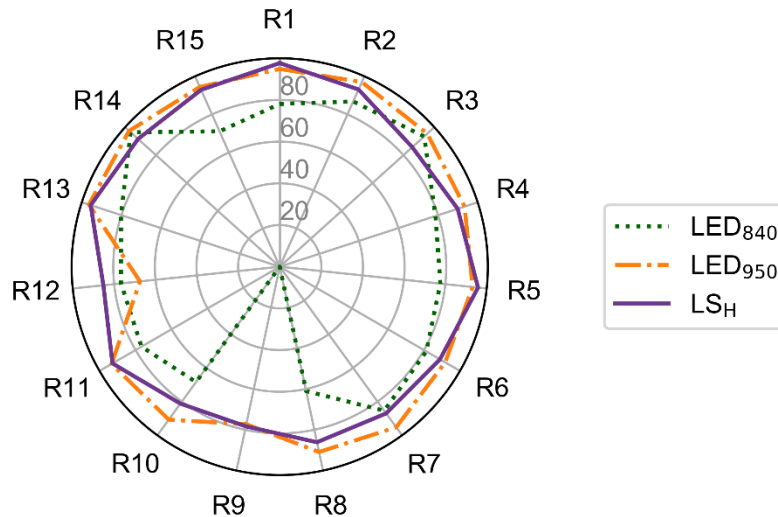


Abb. 8: CRI-R-Werte (R1 bis R15) einer LS_H (violett, durchgezogen) sowie der LED_{840} (grün, gepunktet) und LED_{950} (orange, punktgestrichelt).

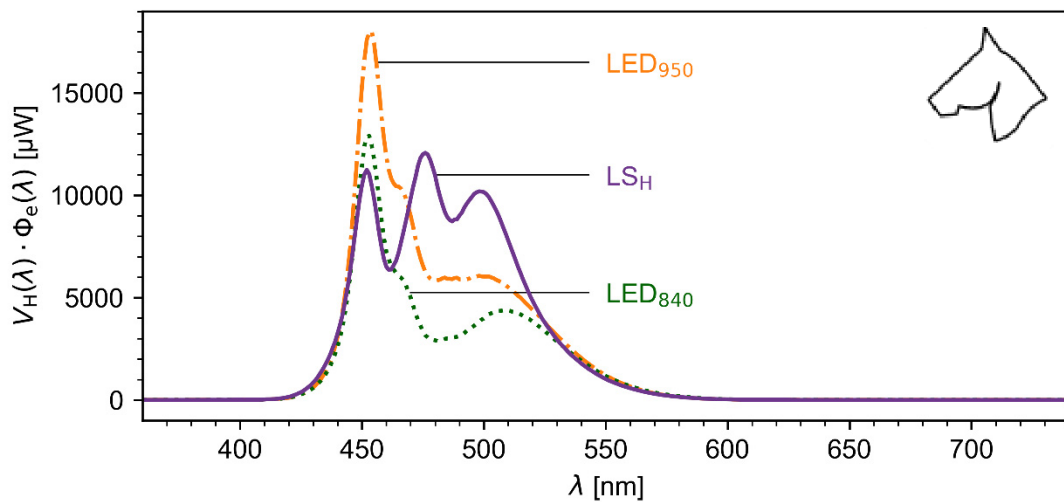


Abb. 9: $V_H(\lambda)$ -gewichtete Spektren (normiert auf 683 lm) aus Abb. 6: LS_H (violett, durchgezogen), LED_{840} (grün, gepunktet), LED_{950} (orange, punktgestrichelt).

Mit der LS_H steht dem Pferd auch mehr Licht in seinem Sehbereich zu Verfügung. Das kann anhand der Berechnung von Φ_{HV} bestimmt werden. Die LED_{840} hat 528 elm, die LED_{950} hat 756 elm und die LS_H hat 808 elm. Das ergibt eine Steigerung um 53 % im Vergleich zur LED_{840} bzw. 7 % im Vergleich zur LED_{950} bei dem gleichen Lichtstrom Φ_v von 683 lm.

4 Beleuchtungssteuerung

Im Abs. 2.2 wurde detailliert die Adaption der Pferdeaugen an neue Helligkeitsverhältnisse erläutert. Sprunghafte Helligkeitsänderungen können zum Scheuen des Tieres führen und vergrößern das Unfallrisiko in der Pferdehaltung. Ein langsames Auf- oder Abdimmen der Beleuchtung gibt den Pferdeaugen die für die notwendige Adaption an die neuen Lichtverhältnisse benötigte Zeit. Dabei soll diese Zeit wesentlich länger als für humane Anwendungen eingestellt werden. Bei der Standardlichtschaltung wird die Beleuchtungshelligkeit innerhalb einer Sekunde von 0 auf die Sollbeleuchtungsstärke E_v^{soll} geschaltet. Bei einer pferdegerechten Schaltung wird eine zweistufige Lichtschaltung vorgeschlagen. Nach Aktivierung wird im ersten Schritt sanft innerhalb einer Sekunde auf die für die Sicherheit notwendige und geforderte Beleuchtungsstärke E_v^{min} geschaltet. Anschließend soll die Beleuchtungsstärke je nach Maximalwert von E_v^{soll} mit 5 bis 20 lx/s auf E_v^{soll} hochgedimmt werden. Abb. 10 zeigt schematisch die zeitlichen Verläufe unterschiedlicher Lichtschaltungen. Auch beim Ausschalten der Beleuchtung soll die Beleuchtungsstärke von E_v^{soll} auf 0 mit 5 bis 20 lx/s sanft abgedimmt werden.

Die träge Helligkeitsadaption der Pferdeaugen hat auch zur Folge, dass bei Bewegungen der Pferde durch ungleichmäßig ausgeleuchtete Bereiche die visuelle Wahrnehmung – besonders im peripheren Sehbereich – stark eingeschränkt ist. Hindernisse und Unebenheiten werden schlecht erkannt und das Verletzungsrisiko steigt enorm. Die Pferde müssen sich wesentlich stärker konzentrieren. Daher soll auf die gleichmäßige Ausleuchtung der Böden in Reithallen und Stallungen besonders geachtet werden. Über die Forderung der Normen [31, 32] wird daher für alle Beleuchtungsklassen ein Gleichmäßigkeitsfaktor von über 0,7 empfohlen. Mithilfe einer Lichtsteuerung kann die Gleichmäßigkeit angepasst werden. Weitere Optimierungsschritte der Beleuchtung in einer Reitanlage mit einer Lichtsteuerung sind:

- Geringer Beleuchtungsstärkegradient zw. zwei unterschiedlich ausgeleuchteten Bereichen
- Separat schaltbare Beleuchtung einzelner Stallboxen

Mit diesen Maßnahmen wird der Lichtkomfort für Pferde weiter verbessert.

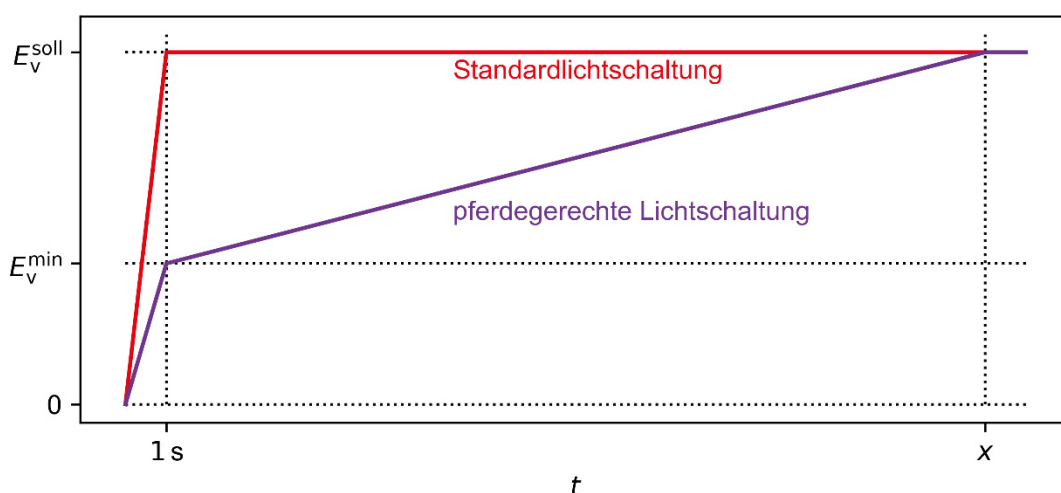


Abb. 10: Schematische Darstellung einer Standardlichteinschaltung und einer pferdegerechten Lichteinschaltung mit der sicherheitsrelevanten Mindestbeleuchtungsstärke E_v^{min} und der Sollbeleuchtungsstärke E_v^{soll} .

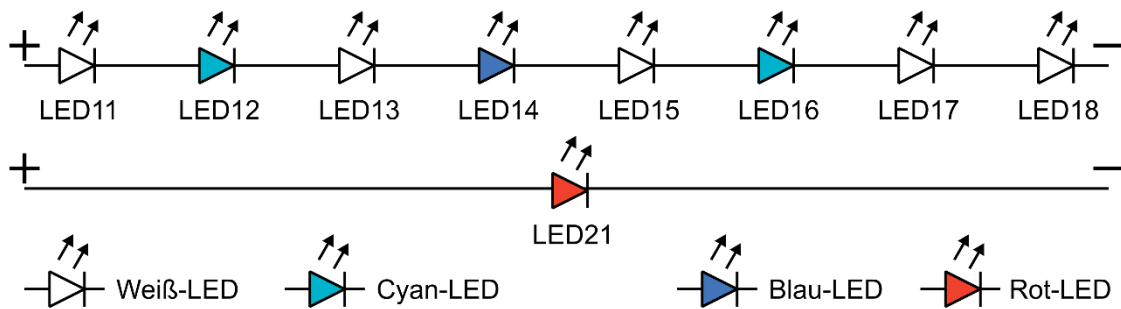


Abb. 11: Konzept der Verschaltungstopologie einer pferdegerechten Lichtquelle

Die konzeptuelle LS_H kann eine zusätzliche Funktion – den Nachtmodus - anbieten. Werden die roten LEDs durch einen separaten Kanal (siehe Abb. 11) betrieben, so emittieren sie das Rotlicht um $\lambda = 625 \text{ nm}$. Dieses Licht liegt außerhalb der angenommenen $V_H(\lambda)$ -Kurve und kann von einem Pferd nicht wahrgenommen werden. Menschen können aber sehr wohl dieses rote Licht sehen, so dass beim Betreiben von nur dem Rotlicht-Kanal die Beleuchtung für die Orientierung bei Nacht verwendet werden kann. Die Abb. 12 zeigt das Spektrum des Rotlicht-Kanals und die $V_H(\lambda)$ -Kurve.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die visuelle Wahrnehmung der Pferde wurde im Rahmen einer Literaturrecherche studiert. Anhand der gesammelten Daten wurde die Hellempfindlichkeitskurve der Pferde $V_H(\lambda)$ abgeleitet und die photometrische Messgröße für Pferde – EquiLumen – eingeführt. Unter der Berücksichtigung der Entwicklung der Allgemeinbeleuchtung und der Seheigenschaften der Pferde konnten die Anforderungen an eine Lichtquelle für pferdegerechte Beleuchtung erstellt werden. Anhand der theoretischen Berechnungen wurde eine mögliche pferdegerechte LED-Lichtquelle vorgeschlagen. Anhand der Bestimmung von Φ_{Hv} konnte festgestellt werden, dass diese pferdegerechte Lichtquelle 53 % mehr Licht als eine weiße LED mit 4000 K ($CRI > 80$) und 7 % mehr Licht als eine LED mit 5000 K ($CRI > 90$) im Sehbereich der Pferde zur Verfügung stellen kann. Durch die Schließung der spektralen Blau-Grün-Lücke können die CRI-R5- und CRI-R12-Werte im Vergleich zu den marktüblichen LEDs deutlich angehoben werden, so dass den Pferden ein kontrastreicheres Sehen ermöglicht werden könnte. Die Lichtqualität einer pferdegerechten Lichtquelle sollte sowohl für den Mensch als auch für das Pferd gesteigert werden können. Darüber hi-

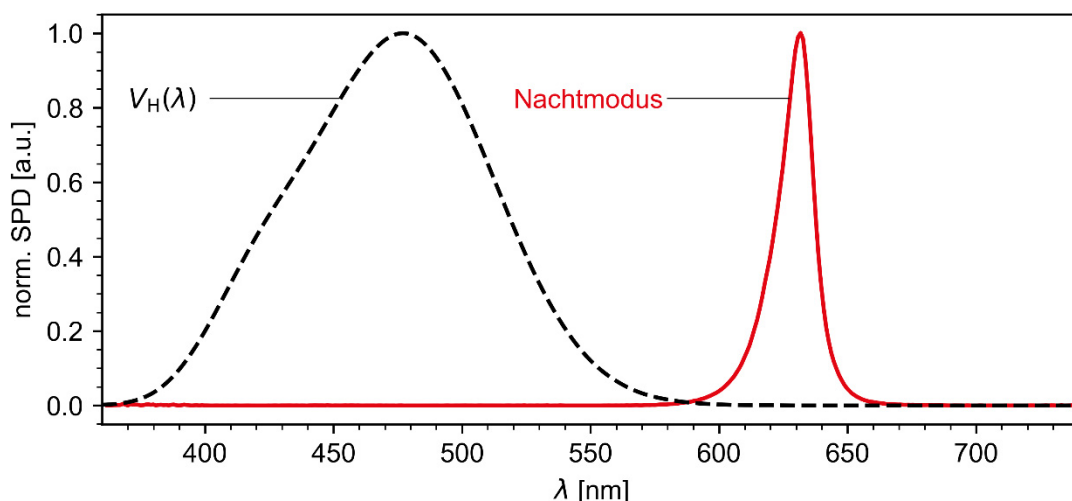


Abb. 12: Abgestrahlte Spektrum der konzeptuellen pferdegerechten Lichtquelle im Nachtmodus (rot, durchgezogen) und die $V_H(\lambda)$ -Kurve (schwarz, gestrichelt). Das rote Licht im Nachtmodus wird von Pferden nicht wahrgenommen.

naus wurden Vorgaben für die Gestaltung, Ausleuchtung und der Steuerung in der Pferdehaltung formuliert. Die wirtschaftliche Betrachtung wurde dabei aber explizit nicht bewertet.

Für die Überprüfung der vorgeschlagenen LS_H -Lichtquelle soll von der Theorie in die Praxis umgestiegen werden. Dabei sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Erfüllt ein realer Aufbau einer pferdegerechten Lichtquelle die ausgearbeiteten Vorgaben und sind diese mit den Anforderungen für den Menschen vereinbar?
2. Es sollen die Fragen der Wirtschaftlichkeit einer pferdegerechten Lichtquelle im Vergleich zu marktüblichen LEDs beantwortet werden.
3. Sind die entwickelten Gestaltungsvorgaben für Ausleuchtung und Steuerung machbar und welche tatsächliche Mehrnutzen, Sicherheit und Wohl bringen diese für die Tiere? Dies kann in Form einer Pilot-Anlage überprüft und studiert werden.
4. Kann die LS_H soweit angepasst werden, dass die LS_H -Farbtemperatur bei $CCT \approx 4000$ K liegt und die anderen technischen Vorgaben weiterhin erfüllt werden? Anhand der Behaglichkeitskurve kann dann die Beleuchtungsstärke von mind. 350 lx für eine 5000 K Lichtquelle auf 200 lx für eine 4000 K Lichtquelle reduziert werden [30].

6 Literaturverzeichnis

- [1] K.-D. Budras und S. Röck, Atlas der Anatomie des Pferdes – Lehrbuch für Tierärzte und Studierende. 5., vollständig überarbeitete Auflage, Hannover: Schlütersche Verlagsgesellschaft mbH, 2008, p. 52.
- [2] J. Carroll, C. J. Murphy, M. Neitz, J. N. V. Hoeve und J. Neitz, „Photopigment basis for dichromatic color vision in the horse,“ *Journal of Vision* 1, pp. 80-87, 2001.
- [3] G. Geisbauer, U. Griebel, A. Schmid und B. Timney, „Brightness discrimination and neutral point testing in the horse,“ *Canadian Journal of Zoology* 82, pp. 660-670, 2004.
- [4] E. B. Hanggi und J. F. Ingersoll, „Color vision in horses (*Equus caballus*): Deficiencies identified using a pseudoisochromatic plate test,“ *Journal of Comparative Psychology*, Vol. 121, No. 1, pp. 65-72, 2007.
- [5] H. Ninomiya und T. Inomata, „Functional Microvascular Anatomy of the Horse Eye: A Scanning Electron Microscopic Study of Corrosion Casts,“ *Open Journal of Veterinary Medicine* 4, pp. 91-101, 2014.
- [6] A. Kelber und O. Lind, „Limits of colour vision in dim light,“ *Ophthalmic and Physiological Optics* 30, p. 454–459, 2010.
- [7] C. A. Saslow, „Understanding the perceptual world of horses,“ *Applied Animal Behaviour Science* 78, pp. 209-224, 2002.
- [8] L. Sellnow, „Happy trails – Your complete guide to fun and safe trail riding,“ *Blood-Horse Publications*, pp. 46-47, 2004.
- [9] S. Ullmann, „Focus Pferd - Pferdegerechtes Umdenken Nr. 5. Wie Pferde sehen. Erstaunliche Einblicke,“ *Barefoot-Saddle*, 2016.
- [10] J. Murphy, C. Hall und S. Arkins, „What Horses and Humans See: A Comparative Review,“ *International Journal of Zoology*, pp. 1-14, 2009.
- [11] M. A. Pacheco und E. A. Herrera, „Social structure of feral horses in the Llanos of Venezuela,“ *Journal of Mammalogy* 78(1), pp. 15-22, 1997.
- [12] K. Krueger, B. Flauger, K. Farmer und C. Hemelrijck, „Movement initiation in groups of feral horses,“ *Behavioural Processes* 103, pp. 91-101, 2014.

- [13] L. Brubaker und M. A. R. Udell, „Cognition and learning in horses (Equus caballus): What we know and why we should ask more,“ *Behavioural Processes Vol. 126*, p. 121–131, 2016.
- [14] A. Mathur, J. Gehrmann und D. A. Atchison, „Pupil shape as viewed along the horizontal visual field,“ *Journal of Vision 13(6):3*, pp. 1-8, 2013.
- [15] H. Rönne, „Zur Theorie und Technik der Bjerrumschen Gesichtsfelduntersuchung,“ *Archiv für Augenheilkunde, Bd. 78, Heft 4*, 1915.
- [16] H. M. Traquair, *An introduction to clinical perimetry*, London: Henry Kimpton, 1938.
- [17] P. McGreevy, *Equine Behavior: A Guide for Veterinarians and Equine Scientists*, London: Saunders, An Imprint of Elsevier Limited, 2004, pp. 37-53.
- [18] S. Duke-Elder, *System of Ophthalmology - The Eye in Evolution Vol. 1*, London: Henry Kimpton Publishers, 1976, p. 689.
- [19] E. B. Hanggi, „Interocular transfer of learning in horses (Equus caballus),“ *Journal of Equine Veterinary Science Vol. 19 No. 8*, pp. 518-524, 1999.
- [20] E. B. Hanggi, „The thinking horse: cognition and perception. Reviewed,“ *Proceedings of the 51th American Association of Equine Practitioners Annual Convention 51*, pp. 246-255, 2005.
- [21] P. Pretto, M. Ogier, H. H. Bülthoff und J.-P. Bresciani, „Influence of the size of the field of view on motion perception,“ *Computer & Graphics 33*, pp. 139-146, 2009.
- [22] A. M. Komáromy, S. E. Andrew, H. L. Sapp Jr., D. E. Brooks und W. W. Dawson, „Flash electroretinography in standing horses using the DTL™ microfiber electrode,“ *American College of Veterinary Ophthalmologists 6-1*, pp. 27-33, 2003.
- [23] S. Zulauf, V. Gerber und W. Brehm, „Die Elektroretinographie mit dem RETIport®-System beim Pferd: Normalbefunde bei Hell- und Dunkeladaptation,“ *Pferdeheilkunde 24-3*, pp. 367-380, 2008.
- [24] L. S. V. Roth, A. Balkenius und A. Kelber, „Colour perception in a dichromat,“ *The Journal of Experimental Biology 210*, pp. 2795-2800, 2007.
- [25] J. Spaas, W. F. Helsen, M. Adriaenssens, S. Broeckx, L. Duchateau und J. H. Spaas, „Correlation between dichromatic colour vision and jumping performance in horses,“ *The Veterinary Journal 202*, pp. 166-171, 2014.
- [26] G. H. Jacobs, „Evolution of colour vision in mammals,“ *Philosophical Transactions of the Royal Society B Vol. 364*, p. 2957–2967, 2009.
- [27] M.-A. Leblanc, *The Mind of the Horse: An Introduction to Equine Cognition*, London: Harvard University Press, 2013, p. 231.
- [28] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *Kommunalrichtlinie - Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld*, Berlin, 2018, p. 8.
- [29] DB Netz AG, DB Station&Service AG, AK Beleuchtung, *Zusammenstellung der Anforderungen an Leuchten mit LED-Leuchtmitteln*, Berlin, 2016.
- [30] A. A. Kruithof, „Tubular Luminescence Lamps for General Illumination,“ *Philips Technical Review Vol. 6, No. 3*, pp. 65-73, 1941.
- [31] *DIN EN 12464-1:2011, Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung.*
- [32] G. Hoffmann, „Orientierungshilfen - Reitanlagen und Stallbau,“ Warendorf, FNverlag der Deutschen Reiterlichen Vereinigung GmbH, 2009, p. 119.

Influence of the light distribution of luminaires and the room surfaces' reflectance on the illumination levels, uniformity and glare in indoor lighting systems

Petrinska I., D. Ivanov, V. Georgiev

Technical University of Sofia, Bulgaria

Abstract

The increasing use of LED luminaires provides a lot of opportunities for indoor lighting. On one side the use of LED luminaires can lead to significant reduction in the electricity consumption for lighting, on the other side it can be so tuned that it allows human centric lighting. The advantages of LEDs as light sources are indisputable, but they also have some drawbacks, that should be considered. A lot of attention is currently payed to optimization of the light distribution curves of luminaires for indoor lighting. It is very important, but not the only characteristic that should be considered. The real reflective properties of the indoor surfaces also influence to great extend the quality and quantity of indoor lighting.

The current paper aims to make a detailed review of the existing LED luminaires and their efficiency for indoor lighting, based on their light distribution curve and the reflective properties of the surfaces in the room space. Except for the qualitative, also the quantitative properties of the lighting systems are considered in terms of uniformity of the illuminance and glare.

One of the designed solutions is also practically realized and experimentally tested. A comparison between designed and real values of illuminance, uniformity and glare is made.

Index Terms: Light distribution curves, reflectance coefficients, LED luminaires' efficiency

1. Introduction

Currently the implementation of LED light sources and luminaires becomes a tendency, because of their reduced energy consumption compared to the conventional sources of light. A lot of attention is payed both to the quality and quantity of the lighting systems, because most people work indoors so the striving is to achieve comfort, productivity and visual environment similar to those achieved by daylighting.

Since energy efficiency and visual comfort are both important and the LEDs as light sources themselves assure the reduction of electricity consumption, more attention



should be paid to the quality of the lighting systems [1] and the parameters that directly influence it. For achieving adequate and healthy indoor lighting environment the acquaintance with the influence of the characteristics of the interior on the distribution of light in the premises is critical [2]. Some researchers have proved that in order to be acceptable, the illumination should be considered not only as horizontal illuminance on the task area, but as a combination of horizontal and vertical illuminances, and hence ambient lighting [3]. Also investigations exist, showing that the interference between the light distribution of the luminaires and suitable reflective properties of the different surfaces in the interior are of great importance for achieving the quality of the indoor lighting [4]. According to [5], the optical properties of the interior surfaces are the main factor that influences the quality and quantity of the indoor lighting systems.

Often in the design phase of the lighting systems, the surfaces are not described with their true reflective and optical parameters, which sometimes leads to significant difference in the designed and real illuminance values, glare and uniformity of the indoor illuminance.

Except for the reflective properties of the indoor surfaces, the light distribution of the luminaire itself should also be considered. Most of the LED luminaires have Lambertian light distribution, although some producers have introduced also near to batwing light distribution curves. Both light distributions are acceptable for indoor applications, but the lighting quality evaluated by means of glare and uniformity of the illuminance appear to be different.

Another consideration about the quality of the lighting system is the color rendering. It is interesting to observe the change of the spectral distribution and color rendering index when the correlated color temperature is changed.

According to the requirements of the European Standard EN 12464-1 [6] the recommended values for the useful reflectance of the main indoor surfaces are as following: floor – 0.2 to 0.4; walls 0.5 to 0.8; ceiling: 0.7 to 0.9. Besides these values, however it is important to take in consideration the mirror component of some of the surfaces, not only to consider them diffusively reflective.

2. Experimental setup and analysis

For validation of the results, achieved by the software program used, a real premises have been modelled. First of all the geometry of the laboratory under consideration has been measured as well as the reflectance coefficients and color coordinates of the surfaces of all the objects situated in the room. The total area of the room is 78,5 m², with height of 3 m, length of 10,6 m and width of 7,4 m. The coordinates and surfaces of the existing luminaires have been considered and exactly modelled. The lighting installation consists of six LED luminaires, dimmable and with tunable correlated color temperature. Each luminaire is with electric power of 50 W and luminous flux of 6000 lm. The values of the reflectance coefficients of the indoor surfaces estimated by

means of their color coordinates, evaluated by ColorStriker Colorimeter. The test room with its floor plan are shown on Figure 1.



Figure 1. Geometry of the test room

The estimation of the optical reflectance behavior of the different interior components was made by a specific experimental setup [7].

The coefficients of reflectance and color coordinates of the room surfaces are given in table 1.

Table 1 Reflectance and color coordinates of the room surfaces

	Reflection faktor	Red	Green	Blue
Ceilings	70	229	228	221
Walls	71	238	230	207
Floors	29	165	152	135
Chairs	18	170	112	53
Student's desks	35	148	175	157
Teacher's desk	9	111	86	64
Desks	28	188	144	102
Window frames	10	0	103	104
Board	68	225	226	219
Sphere	17	115	121	111

In order to make a detailed analysis of the relationship between reflective properties of the room surfaces and the light distribution of the luminaires used, on the illuminance on the working plane and the quality of lighting by means of glare and color rendering a simulation model of the room under consideration has been made in DIALUX EVO Software [8]. The simulation model is shown on Figure 2.

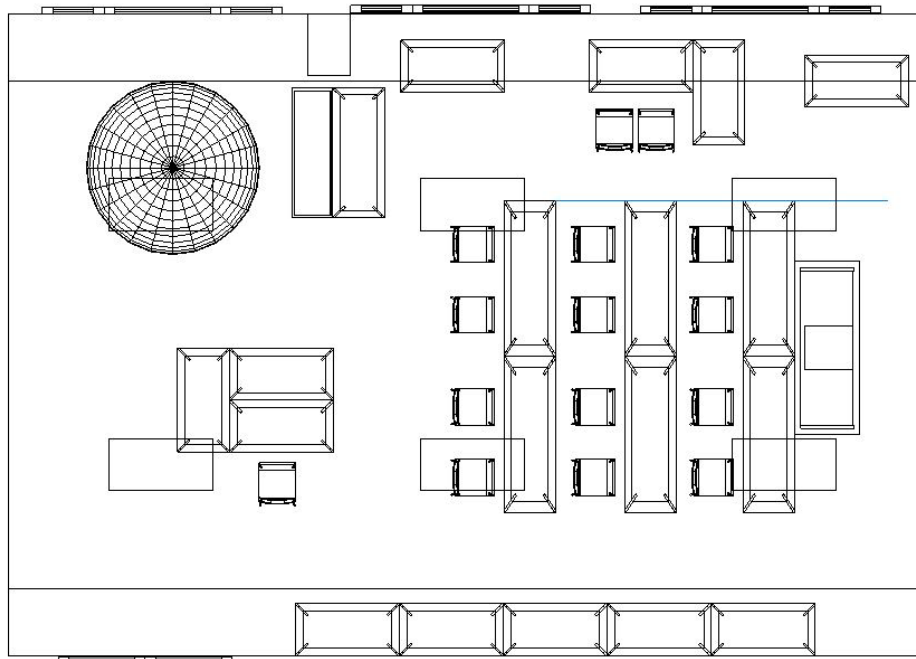


Figure 2. Simulation model of the test room

This software gives the opportunity for simulation, calculation and visualization of the lighting conditions in 3D. The parameters that are varied in the current research are first the light distribution curves of the luminaires (keeping their geometry the same) using the measured values of the reflectance coefficients and color coordinates of the room surfaces. After achieving “best” (in terms of lighting quality – minimum glare, maximum uniformity and norm illuminance) light distribution, it is kept the same and the reflective properties of the room surfaces, as well as their colors are varied until the higher level of illuminance is achieved, keeping the quality of lighting. The reflectance coefficients of the surfaces are varied as following: floor – from 0.1 to 0.7, walls – from 0.3 to 0.9 and ceiling – from 0.5 to 0.9. The reflectance range of the surfaces is according to the requirements of the European Standard [6]. The results are systemized and shown on Figure 3 and Table 2, 3.

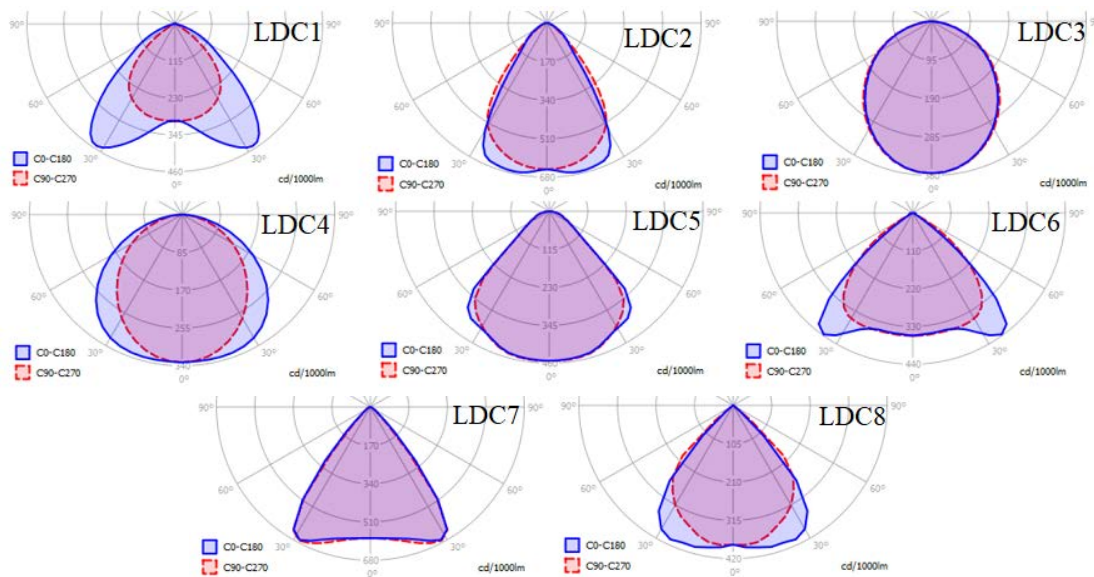


Figure 3 Light Distribution curves considered in the current investigation

It is obvious from Table 2, that the best lighting parameters are realized by means of light distribution curve (LDC) 6.

Table 2 Illuminance, uniformity and UGR, achieved for the chosen light distributions

	Eav, lx	Uo	UGR
LDC 1	385	0,5	16,3
LDC 2	418	0,22	13,6
LDC 3	368	0,41	17
LDC 4	362	0,44	16,4
LDC 5	395	0,37	14,6
LDC 6	399	0,51	16,9
LDC 7	430	0,18	15,4
LDC 8	393	0,31	13,7

Table 3 Illuminance, uniformity and UGR, achieved for the chosen light distributions

Reflectance of the ceiling = 90%					Reflectance of the ceiling = 80%					Reflectance of the ceiling = 70%					Reflectance of the ceiling = 60%					Reflectance of the ceiling = 50%				
Reflectance of the walls, %	Reflectance of the floor, %	Uo	Eav, lx	UGR	Reflectance of the walls, %	Reflectance of the floor, %	Uo	Eav, lx	UGR	Reflectance of the walls, %	Reflectance of the floor, %	Uo	Eav, lx	UGR	Reflectance of the walls, %	Reflectance of the floor, %	Uo	Eav, lx	UGR	Reflectance of the walls, %	Reflectance of the floor, %	Uo	Eav, lx	UGR
90	70	0,54	489	15,6	90	70	0,54	467	15,9	90	70	0,54	449	16,1	90	70	0,53	432	16,4	90	70	0,53	417	16,6
	60	0,54	471	15,9		60	0,53	453	16,1		60	0,53	438	16,3		60	0,52	423	16,5		60	0,52	410	16,7
	50	0,53	456	16,1		50	0,53	440	16,3		50	0,52	427	16,5		50	0,52	415	16,7		50	0,52	403	16,9
	40	0,52	442	16,3		40	0,52	429	16,5		40	0,52	417	16,6		40	0,52	406	16,8		40	0,52	397	17
	30	0,52	429	16,5		30	0,52	418	16,7		30	0,52	408	16,8		30	0,52	399	17		30	0,51	390	17,1
	20	0,52	417	16,7		20	0,51	408	16,8		20	0,51	399	17		20	0,49	392	17,1		20	0,51	385	17,3
	10	0,51	406	16,9		10	0,51	398	17		10	0,49	392	17,1		10	0,49	385	17,3		10	0,49	379	17,4
	80	0,53	474	15,8	80	70	0,53	455	16,1	80	70	0,52	439	16,3	80	70	0,52	424	16,5	80	70	0,52	411	16,7
	60	0,52	459	16,1		60	0,52	443	16,3		60	0,52	429	16,5		60	0,52	416	16,6		60	0,51	404	16,8
	50	0,52	445	16,3		50	0,52	432	16,4		50	0,51	419	16,6		50	0,51	408	16,8		50	0,51	398	17
	40	0,52	433	16,5		40	0,51	421	16,6		40	0,51	410	16,8		40	0,51	401	16,9		40	0,49	392	17,1
	30	0,51	421	16,6		30	0,51	411	16,8		30	0,51	402	16,9		30	0,49	394	17,1		30	0,49	386	17,2
	20	0,51	410	16,8		20	0,51	402	17		20	0,49	394	17,1		20	0,49	387	17,2		20	0,49	381	17,3
	10	0,51	400	17		10	0,49	393	17,1		10	0,49	387	17,2		10	0,49	381	17,3		10	0,48	376	17,5
	70	0,52	462	16	70	70	0,52	445	16,2	70	70	0,51	430	16,4	70	70	0,51	417	16,6	70	70	0,51	404	16,8
	60	0,51	449	16,2		60	0,51	434	16,4		60	0,51	421	16,6		60	0,51	409	16,8		60	0,51	398	17
	50	0,51	436	16,4		50	0,51	424	16,6		50	0,5	412	16,8		50	0,5	402	16,9		50	0,49	393	17,1
	40	0,51	425	16,6		40	0,5	414	16,8		40	0,5	404	16,9		40	0,49	395	17,2		40	0,49	387	17,2
	30	0,5	414	16,8		30	0,5	405	16,9		30	0,49	396	17		30	0,49	389	17,2		30	0,48	382	17,3
	20	0,5	404	17		20	0,48	396	17,1		20	0,48	389	17,2		20	0,48	383	17,3		20	0,48	377	17,4
	10	0,48	394	17,1		10	0,48	388	17,2		10	0,48	383	17,3		10	0,48	377	17,4		10	0,48	373	17,5
	60	0,51	451	16,2	60	70	0,51	436	16,4	60	70	0,51	423	16,6	60	70	0,51	410	16,8	60	70	0,49	399	17
	60	0,51	439	16,4		60	0,5	426	16,6		60	0,5	414	16,7		60	0,49	403	16,9		60	0,49	393	17,1
	50	0,5	428	16,6		50	0,5	417	16,7		50	0,5	406	16,9		50	0,49	397	17,2		50	0,48	388	17,2
	40	0,5	417	16,7		40	0,5	407	16,9		40	0,49	399	17		40	0,49	391	17,2		40	0,48	383	17,3
	30	0,5	407	16,9		30	0,49	399	17		30	0,48	392	17,2		30	0,48	385	17,3		30	0,48	378	17,4
	20	0,48	398	17,1		20	0,48	391	17,2		20	0,48	385	17,3		20	0,48	379	17,4		20	0,47	374	17,5
	10	0,48	390	17,2		10	0,48	384	17,3		10	0,47	379	17,4		10	0,47	374	17,5		10	0,47	369	17,6
	50	0,5	442	16,4	50	70	0,5	428	16,6	50	70	0,5	416	16,7	50	70	0,49	404	16,9	50	70	0,48	394	17,1
	60	0,49	431	16,5		60	0,49	419	16,7		60	0,49	408	16,9		60	0,48	398	17		60	0,48	389	17,2
	50	0,49	421	16,7		50	0,49	410	16,9		50	0,49	400	17		50	0,48	392	17,2		50	0,48	384	17,3
	40	0,49	410	16,9		40	0,49	402	17		40	0,48	393	17,1		40	0,48	386	17,3		40	0,48	379	17,4
	30	0,48	401	17		30	0,48	394	17,2		30	0,48	387	17,3		30	0,48	381	17,4		30	0,47	375	17,5
	20	0,48	393	17,2		20	0,48	387	17,3		20	0,48	381	17,4		20	0,47	376	17,5		20	0,47	371	17,6
	10	0,48	385	17,4		10	0,47	380	17,4		10	0,47	375	17,5		10	0,47	371	17,6		10	0,47	367	17,7
	40	0,49	433	16,5	40	70	0,49	421	16,7	40	70	0,49	409	16,9	40	70	0,48	399	17	40	70	0,48	389	17,2
	60	0,49	423	16,7		60	0,49	412	16,8		60	0,49	402	17		60	0,48	393	17,2		60	0,48	384	17,3
	50	0,49	413	16,8		50	0,48	404	17		50	0,48	395	17,1		50	0,48	387	17,3		50	0,47	380	17,4
	40	0,48	404	17		40	0,48	396	17,1		40	0,48	389	17,3		40	0,47	382	17,4		40	0,47	376	17,5
	30	0,48	396	17,2		30	0,48	389	17,3		30	0,47	383	17,4		30	0,47	377	17,5		30	0,47	372	17,6
	20	0,47	388	17,3		20	0,47	383	17,4		20	0,47	377	17,5		20	0,47	372	17,6		20	0,46	368	17,7
	10	0,47	381	17,5		10	0,47	376	17,5		10	0,47	372	17,6		10	0,46	368	17,7		10	0,46	364	17,8
	30	0,49	426	16,7	30	70	0,48	414	16,8	30	70	0,48	403	17	30	70	0,48	394	17,2	30	70	0,48	385	17,3
	60	0,49	416	16,8		60	0,48	406	17		60	0,48	397	17,1		60	0,48	388	17,3		60	0,48	381	17,4
	50	0,48	407	17		50	0,48	399	17,1		50	0,48	391	17,3		50	0,47	383	17,4		50	0,47	376	17,5
	40	0,48	399	17,1		40	0,48	391	17,3		40	0,47	385	17,4		40	0,47	378	17,5		40	0,47	372	17,6
	30	0,48	391	17,3		30	0,47	385	17,4		30	0,47	379	17,5		30	0,47	374	17,6		30	0,46	369	17,7
	20	0,47	384	17,4		20	0,47	379	17,5		20	0,47	374	17,6		20	0,46	369	17,7		20	0,46	365	17,8
	10	0,47	377	17,6		10	0,46	373	17,6		10	0,46	369	17,7		10	0,46	365	17,8		10	0,46	361	17,9

In order to validate the accuracy of the model, the illuminance is measured in the real room and then it is compared to the results, given by the software. The measurement of the illuminance is made in a grid, corresponding to the requirements of EN 12464-1 at the height of the working plane – 0.8m from the floor. The measurement has been carried out with a strictly calibrated for measurement of LED light sources Extech Color LED Light Meter LT 45. A comparison between the measured and simulated illuminance has been made and the results from it are shown on Fig. 4

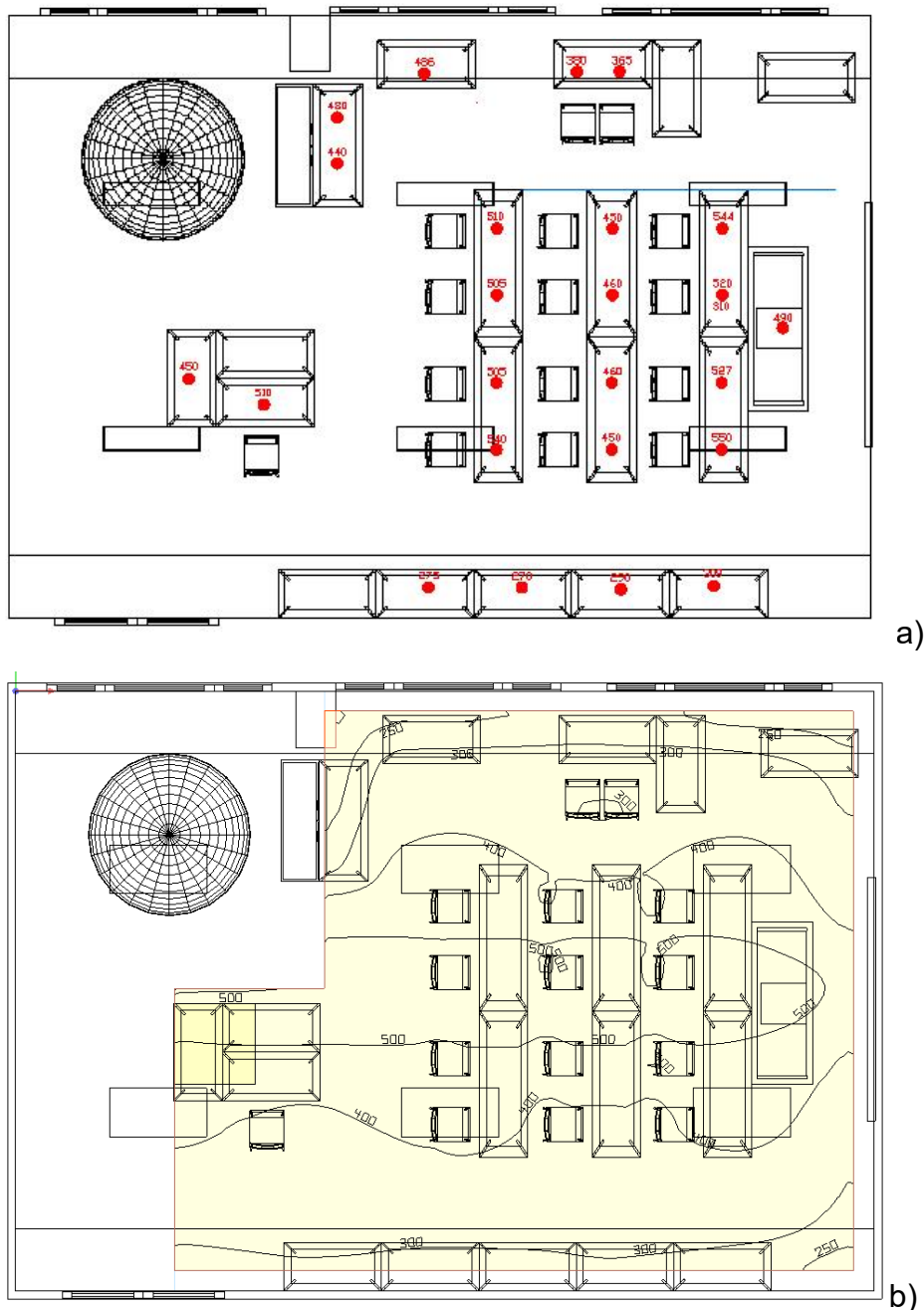


Figure 4 a) Measured values of the horizontal illuminance on the working places, b) simulated isolux curves in the test room

3. Analysis of the results

From the results obtained, as well as based on previous experience, it is obvious that the “best” light distribution (when it comes to quality of the lighting and its uniformity) is the batwing light distribution – fig. 3. The estimation of the quality of the lighting system is made according to EN 12464 – 1 – the unified glare rating and the uniformity of the illuminance on the working plane are calculated for the different light distributions considered in the current paper. These parameters also change when the reflective coefficients of the room surfaces change – Table 4. The highest the reflection

coefficients of all surfaces, the higher the illuminance on the work plane and the uniformity and also the lowest the UGR is. Care should be taken about the texture of the surfaces and their mirror reflection.

4. References

- [1] Linhart F, JL.Scartezini, Evening office lighting—visual comfort vs. energy efficiency vs. performance? *Build. Environ.* 2011: 46(5):981-989, 2011
- [2] Mangkuto RA., M. Rohmah, D. Asri, Design Optimization for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics, *Appl. Energy.* 2016:164:211-219, 2016
- [3] Loe DL., Energy efficiency in lighting—considerations and possibilities. *Lighting Res. Technol.* 2009:41(3):209-218, 2009
- [4] Reinhart CF. Effects of interior design on the daylight availability in open plan offices. In: *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings* 2002:309-322, 2002
- [5] Singh R, R. Rawal, Effect of surface reflectance on lighting efficiency in interiors. In *12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia.* 2011:2301-2308, 2011
- [6] EN 12464-1:2011, Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places, 2011
- [7] Petrinska I., Estimation of the Reflectance Properties of Real Materials Used for Buildings' Facades, *Proceedings of the Technical University-Sofia*, v.66, book 3, pp. 223-229, 2016
- [8] www.dialux.de

Photobiological Risk from the Spectral Emission of Human Centric LED Luminaires – Case Study

Nikolova K., I. Petrinska, D. Ivanov, D. Pavlov

Technical University of Sofia, Bulgaria

Abstract

People spend most of their time indoors. That is a good reason for implementation Human Centric Lighting solutions in offices. Such solutions can lead to increased productivity and motivation to employees. The spectral composition of light, the timing of the different light scenes and the duration of light exposure play important role for the non-visual effects of light that occur in humans. Moreover, research has shown that these effects may depend on the environment, specifics of the activity, and personal characteristics of people.

The use of LED Luminaires makes the implementation of Human Centric Lighting easy and possible. The LEDs as light sources, however can lead to blue light hazard risk that should be estimated. The human eye is adapted to function in a media of optical radiation that ensures not only vision, but also important physiological functions. The emission of LED luminaires is in wide spectrum, especially in the blue part, and it can be both favorable and harmful. The current paper represents an experimental research of the possibility of blue light hazard in a real human centric lighting system..

Index Terms: Photobiological safety, human centric LED luminaires

1 Introduction

It is the century of the LED lighting and since it is a young technology it has a lot of advantages, drawbacks and issues to be considered. One of the first things that not specialists think when they hear about LED lighting is that is a little bit more expensive, but much more efficient and they are sometimes absolutely unaware of problems as Temporal Lighting Artefacts or Photobiological Risk from blue light. According to the European Standard EN 62471:2009 “Photobiological safety of lamps and lamp systems” for estimation of a source of optical radiation, which emits in a large spectral range, it is necessary to estimate the spectral distribution of its radiance in points where humans are present, according to the size of the projection of the light source for the spectral range, where retinal damage is possible and the change of the radiation in



certain geometry of the lighting installations with the change of the distance to the source [1].

The conditions at which the radiometric measurement of the spectral distribution and the intensity of the light sources depend on the geometry of the lighting installation, the size of the light sources (apprised by α_{eff}) and the exposition time according to their application. The dimension α_{eff} (effective angular subtense), rad depends on the projection of the visible part of the light source on the eye of the observer or in the measurement point. This dimension is a full angle, not a half – fig. 1.

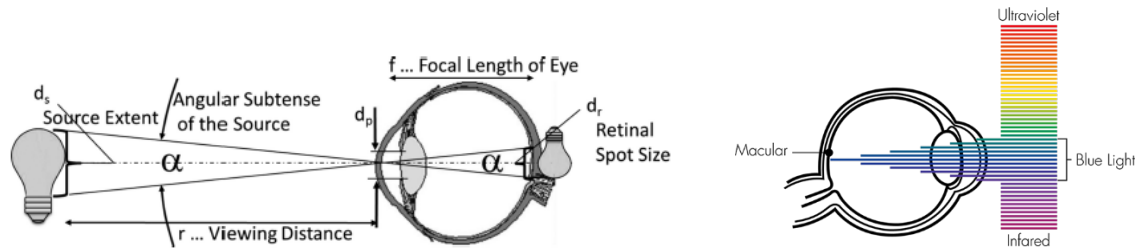


Fig.1 Determination of the effective angular subtense of a source of optical radiation [2,3]

A source, whose projection on the retina is so big that the biological influence in radial direction from the center of the image towards the surrounding biological tissue is negligible compared to the biological influence in the direction of the central axis, is considered a large source of optical radiation – fig. 2. In this case the spectral radiance of the light source L_e (W_e/sr)/ m^2 is important.

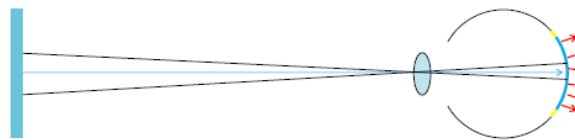


Fig.2 Projection of the light source on the retina and biological impact of a large light source.

For determination of the angular subtense of a light source and the measurement geometry, at which the intensity of the optical radiation is taken, the size of the light source should be known as well as the distance to the irradiated surface and the visual field of the observer.

The visual field is defined as a solid angle γ , sr, under which the radiance of the source is perceived by the detector of the measuring instrument – radiometer or spectrophotometer. Under sudden conditions a planar angle γ , rad can also be used.

The European standard EN 62471:2008 describes two standard measurement procedures:

1. Measurement of the irradiance and radiance of the light sources at a distance, at which the light source assures illuminance of 500 lx, but not shorter than 200 mm – used for general lighting;

2. Measurement of the irradiance and radiance of the light sources at a distance of 200mm and guaranteed visual field – for the rest of the cases.

These conditions, however concern some considerations when sudden applications are investigated and can lead to different interpretations of the experimental setup which can corrupt the measurement results. Useful information and clarification about the application of EN 62471:2008 for estimation of the blue light hazard from light sources and luminaires are given in IEC/TR 62778: 2012 [4].

2 Radiometrical Measurement of the Spectral Distribution of the Radiant Intensity of LED Lighting Products and Assessment of Their Blue Light Hazard

The measurement, described in the current paper has been made in a laboratory in the Technical University of Sofia, where the lighting system has been renovated and a human – centric lighting has been installed. The experiment has been carried out by means of spectroradiometer Stellar BLACK-Comet, which can measure radiation with wavelength from 200 nm to 1100 nm. The experiment is made in compliance with EN 62471:2008 and the recommendations in IEC/TR 62778:2012.

The lighting system under consideration consists of six ceiling mounted Human – Centric LED Luminaires with the following dimensions: $l=1.175\text{m}$, $w=0.575\text{m}$. All the luminaires have a plastic diffuser completely covering the light sources. LEDs have emissions in the blue part of the spectrum and in the current publication deals with the hazard that may arise from exposure to visible or ultraviolet wavelengths. It is expected that the ultraviolet wavelengths are attenuated by the plastic diffuser [6].

Spectral irradiance data is measured at a distance of 1.8 m from the luminaire, looking directly at it. The source has an average dimension of 0.875 m. Therefore $\alpha = 0.486$ rad. The source has a surface area of 0.676 m². Therefore $\Omega = 0.68$ sr. Therefore $\Omega_B = 0.209$ sr [1,2,6]. According the standard EN 62471 the maximum angular subtense value for all retinal hazards must not exceed 0.1 rad due to the pupil diameter physiological limitations. This means that if the luminance of this source is high, as it is expected only a part of the source size will be the effective angular subtense α_{eff} and used for determination of the blue light hazard. For achieving of this measuring conditions and $\gamma=\alpha_{\text{eff max}}=0.1$ rad a non transmitting aperture is used. Thus the dimensions of the emitting area of the luminaire are limited to $D=0.18\text{m}$, therefore $\alpha = 0.1$ rad.

Schematic representation of the experimental setup is given on Fig. 3.

Detailed radiometric data for white light sources is required only if the luminance of the source L exceeds 10^4 cd/m² [1,2]. The preliminary assessment with measurement of the source luminance at distance 1.8 m and with the subtended angle, defined by the actual average dimension of the luminaire without the use of aperture, showed luminance exceeding 10^4 cd/m².



Fig.3 Representation of the experimental set up

After generating in Sketchup the 3D model is inserted in the lighting design program Dialux EVO. An illustration of the created model after adding additional surfaces with real reflection characteristics is shown on fig. 5.

The measurements were performed for the set of the correlated color temperatures for which the human-centric lighting installation is designed. The experimental data obtained by means of the spectroradiometer represent the surface density of the radiant flux that has fallen on the photoelement of the radiometer W/m^2 , or its irradiance. The measured spectral power distribution for the set of CCTs and the blue light weighted function $B(\lambda)$ in relative unites are shown on fig. 4.

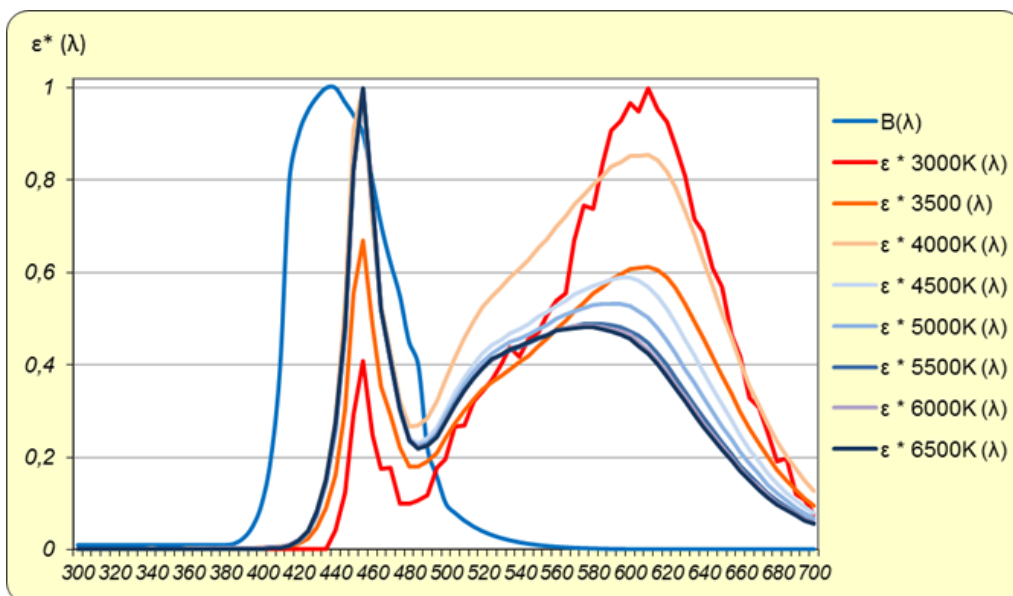


Fig.4 Measured spectral power distribution for the set of CCTs and the blue light weighted function $B(\lambda)$.

For all measurements are determined the blue light hazard efficiencies of radiation, according EN 62471:2008. The results are represented on fig. 5.

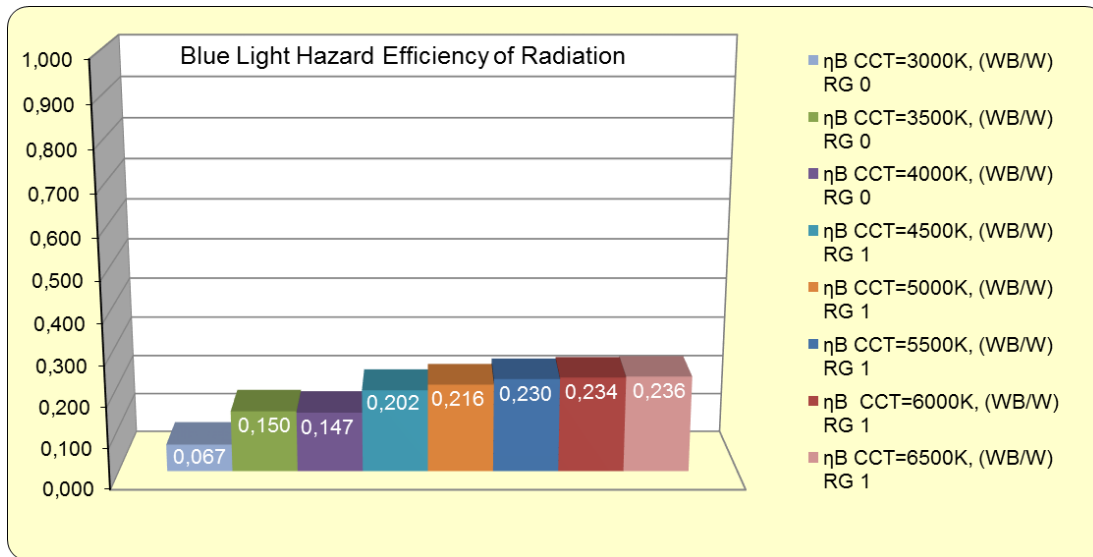


Fig.5 Blue light hazard efficiencies for the different CCTs of the luminaires

The blue light weighted effective radiance L_B , $W/(m^2 \cdot sr)$, for the different CCTs are calculated from:

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_e(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \quad (1)$$

where $L_e(\lambda)$ is the effective spectral radiance, $W_e/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$; $B(\lambda)$ is the blue light hazard weighting function and $\Delta\lambda$ is the bandwidth, nm.

The source radiance L_e is defined from the measured irradiance E_e and the angle of the measurement field of view Ω , sr:

$$L_e = \frac{E_e}{\Omega} \quad (2)$$

The data from the blue light hazard risk evaluation and the determined risk groups [1,2,4,5] are represented in table 1.

Quantity	CCT 3000K	CCT 3500K	CCT 4000K	CCT 4500K	CCT 5000K	CCT 5500K	CCT 6000K	CCT 6500K
Effective irradiance, W/m^2	16,68	98,53	129,62	119,47	123,54	127,76	132,78	159,98
Illuminance (Photopic weighted effective irradiance), lx (lm/m^2)	229,47	1259,59	1627,79	1509,99	1560,06	1606,36	1674,09	1712,26
Luminance of the source L_s , cd/m^2	29216,59	160376,55	207256,54	192258,52	198633,15	204528,07	213151,34	218011,56
Blue light weighted effective radiance L_B , $W/(m^2 \cdot sr)$	5,57	74,02	95,11	120,95	133,63	146,99	155,28	159,98
Maximum L_B for the risk group classification, $W/(m^2 \cdot sr)$	≤ 100	≤ 100	≤ 100	> 100 ≤ 10000	> 100 ≤ 10000	> 100 ≤ 10000	> 100 ≤ 10000	> 100 ≤ 10000
t_{max} , s	179430	13510	10514	8268	7484	6803	6440	6251
Risk Group	0 (EXEMPT)	0 (EXEMPT)	0 (EXEMPT)	1 (LOW RISK)	1 (LOW RISK)	1 (LOW RISK)	1 (LOW RISK)	1 (LOW RISK)

Table 1 Blue light hazard evaluation for human-centric lighting installation at different set of CCTs

3 Conclusions

The received results show that the highest CCT in which the lighting situation could be categorized as exempt risk group is 4000 K. The lighting situations with higher CCTs exceed the limitations of the exempt group and are included in risk group 1 (low risk).

The most important thing in risk assessment of retinal injuries is the lighting design geometry and the type of performed visual tasks. It is suitable to be made appropriate measurements of the lighting installations in which the luminaires are implemented. The different applications may lead to different assessment results. It is important to be taken into account the eye movements of the observers for the performed visual tasks. In situations with laboratory visual tasks a constant eye direction is not typical. Moreover a situation in which the observer is looking directly at the light emitting surface is not expected. Appropriate assessment for human-centric lighting installations could be performed with taking into account the human eye possibilities and the subtended angle for color recognition in measurement geometry with direction of the central axis of the observer's eye not perpendicular to the emitting surface. Another point of observation is that in this situation there will be more than one retinal images and their angular subtenses will differ depending on the working place and the typical axes of eye fixation direction. It would be useful as well to be taken into account the lighting distribution of the used luminaires.

4 References

- [1] EN 62471:2008, Photobiological safety of lamps and lamp systems Light and lighting - Sports lighting, 2008.
- [2] ICNIRP, ICNIRP guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation, HEALTH PHYSICS 105(1):74-96; 2013
- [3] www.bluelightexposed.com
- [4] IEC/TR 62778:2012, Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires, 2012.
- [5] IESNA/ANSI. Photobiological safety for lamps-Risk group classification and labeling, New York: Illuminating Society of North America; RP27.3; 2007.
- [6] Radiation Protection Division, Health Protection Agency, A Non-Binding Guide to the Artificial Optical Radiation Directive 2006/25/EC, 2007

Einfluss von Betriebsstrom und Umgebungstemperatur auf den Alterungszustand der elektrischen Größen von High Power LEDs

Benjamin Weigt, Prof. Dr.-Ing. Kai Homeyer

Hochschule Hannover, Fakultät 1, Fachgebiet: Industrieelektronik, Digitaltechnik und Lichttechnik

Abstract

Der Alterungszustand von LEDs ist eine wichtige Fragestellung für Hersteller und Verbraucher, da die LED zurzeit die bedeutendste Beleuchtungstechnik ist. Die LED als Gesamtsystem hat viele Alterungsmechanismen, die in den letzten Jahren auf über fünfzig gestiegen sind. Die folgende Arbeit analysiert die Änderung der elektrischen Größen in Bezug auf den Alterungszustand der LED durch den Einfluss des Betriebsstromes und Umgebungstemperatur. Die elektrischen Größen wie z.B. Fotostrom und Bahnwiderstand zeigen ihre Auswirkungen in den verschiedenen Bereichen der LED Kennlinie. Das Ziel ist den Alterungszustand elektrisch zu messen und ein elektrisches Ersatzmodell der LED-Alterung zu erstellen. Die Datenbasis bilden High Power LEDs von zwei verschiedenen Herstellern aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien, die bei jeweils drei verschiedenen Betriebsströme und Umgebungstemperaturen über 9000 h gealtert sind.

Index Terms: Degradation, High Power LEDs, Messdaten über 9000 h

1 Einleitung

Der Alterungszustand von LEDs ist eine wichtige Fragestellung für Hersteller und Verbraucher, da die LED zurzeit die wichtigste Beleuchtungstechnik in privaten Haushalten und Industrie ist. Die Anzahl der verschiedenen Alterungsmechanismen von LEDs ist in den letzten Jahren von zehn auf über fünfzig gestiegen [1]. Die Messung der einzelnen Alterungsmechanismen ist schwierig, da diese zusammenwirken und die LED nur als gesamtes System gemessen werden kann. Die Degradation wird hauptsächlich über die lichttechnische Größe Lichtstrom nach der Norm IES LM 80-15 gemessen und mit der Norm IES TM-21-11 extrapoliert, da der Lichtstrom die wichtigste Kenngröße der LED ist. Die LED ist allerdings ein nichtlineares elektrisches Bauelement und ihr Verhalten wird allgemein über die U-I-Kennlinie eines PN-Übergangs beschrieben, die sich in verschiedene Bereiche



unterteilt. Die Änderung der elektrischen Größen während der Alterung sind gegenüber der lichttechnischen Größen einfacher und präziser messbar und können Rückschlüsse auf die verschiedenen Alterungsmechanismen durch die Auswirkungen in den verschiedenen Bereichen der UI-Kennlinie wie z.B. Senkung des Fotostroms, Erhöhung des Vorwärts-Leckstromes [2], Erhöhung des Bahnwiderstandes [4] und die Verschiebung der UI-Kennlinie im Rekombinationsbereich [2][3] geben. Durch die Untersuchung der verschiedenen Bereiche der UI-Kennlinie kann das Gesamtsystem LED in Teilsysteme aufgeteilt werden und somit verschiedene Alterungsmechanismen beschreiben.

Die Messdaten eines Dauerversuchs (9000 h) [6] zeigen die genannten Alterungen in der UI-Kennlinie. Die Datenbasis beruht auf einen Dauerversuch mit 720 High Power LEDs von zwei verschiedenen Herstellern mit zwei verschiedenen Halbleitermaterialien GaN LED Typ A und SiC LED Typ B, die jeweils bei drei verschiedenen Betriebsströmen (350 mA, 700 mA und 1000 mA) und Umgebungstemperaturen (55 °C, 85 °C und 95 °C) gealtert wurden.

Die folgende Arbeit zeigt den Einfluss von Betriebsstrom und Umgebungstemperatur sowie die Abhängigkeit des verwendeten Halbleitermaterials auf die Degradation und die damit verbundene Verschiebung der UI-Kennlinie in den einzelnen Bereichen. Das Ziel ist die elektrische Messung des Alterungszustandes und ein elektrisches Ersatzschaltbild der LED zu modellieren, welches das Verhalten der Alterung aus den verschiedenen Bereichen als Gesamtsystem beschreibt. Der erste Teil der Arbeit beschreibt allgemein die Bereiche der Kennlinie, darauf folgen die Messergebnisse für über 9000 h mit anschließender Diskussion.

2 UI-Kennlinie

Die UI-Kennlinie der LED beschreibt den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung am PN-Übergang als Exponentialfunktion. Die UI-Kennlinie besteht aus zwei Hauptbereichen, dem Durchlass- und dem Sperrbereich. Der Durchlassbereich unterteilt sich mit steigender Spannung in die drei Bereiche Rekombinations- (I), Diffusions- (II) und Hochstrombereich (III) mit verschiedener Steigung [5]. Der Betriebspunkt der LED liegt normalerweise im Hochstrombereich. Die folgende Abbildung 1 zeigt die Kennlinien einer roten und einer grünen LED, die extern beleuchtet und abgedunkelt gemessen sind.

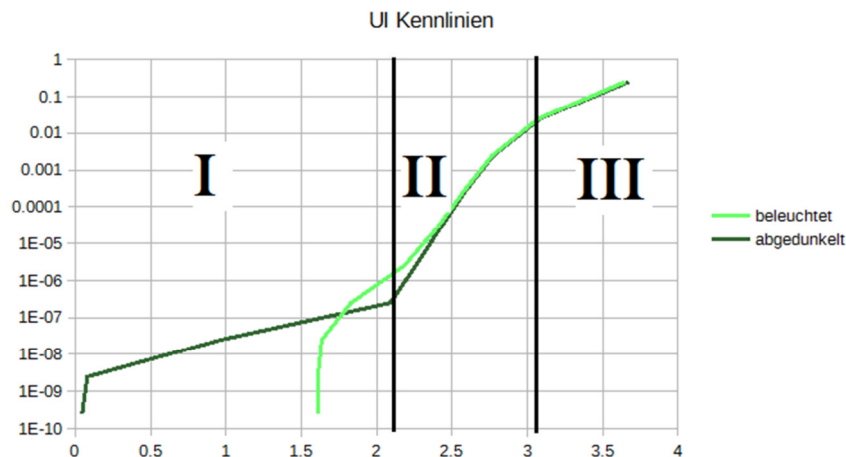


Abbildung 1: Beleuchtete und unbeleuchtete Kennlinie mit Rekombinations- (I), Diffusions- (II) und Hochstrombereich (III)

Der Verlauf der Kennlinie ändert sich bei Beleuchtung gegenüber dem Verlauf der abgedunkelten LED, da die Kennlinie abknickt und folgend durch den 4. Quadranten im generatorischen Bereich verläuft. In diesem Bereich erzeugt die LED durch die Beleuchtung einen Fotostrom. Der Sperrbereich wird nicht betrachtet, da keine Informationen über die Schutzbeschaltung der LEDs vorliegen.

3 Messergebnisse

3.1 UI-Kennlinie in Abhängigkeit der Alterung

Die UI-Kennlinie zeigt alle elektrischen Größen der LED und verschiebt sich während der Alterung. Die folgenden Messungen zeigen die UI-Kennlinie der LED halblogarithmisch für verschiedene Zeitpunkte des Alterungsverlaufs (0h–10634h) und die zwei verschiedenen LED Typen A und B.

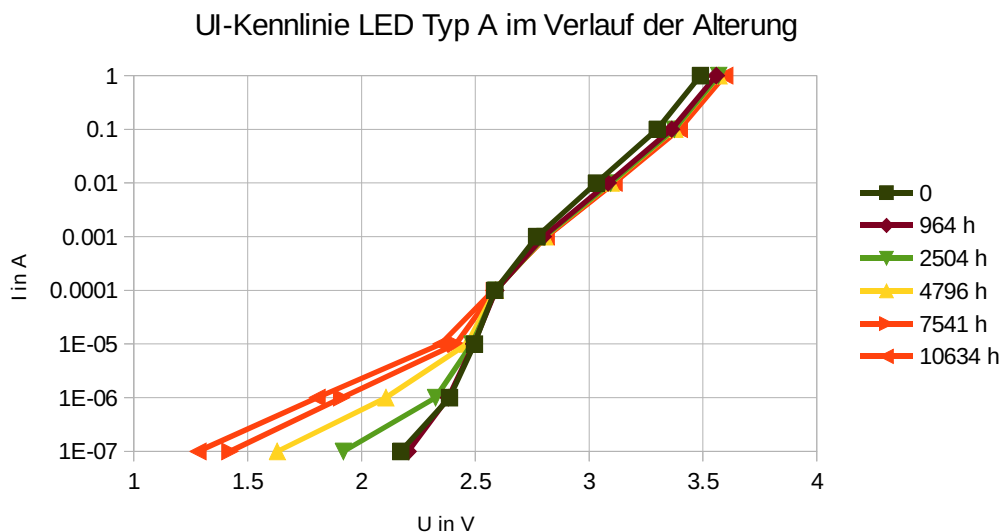


Abbildung 2: Verschiebung der UI-Kennlinie LED Typ A

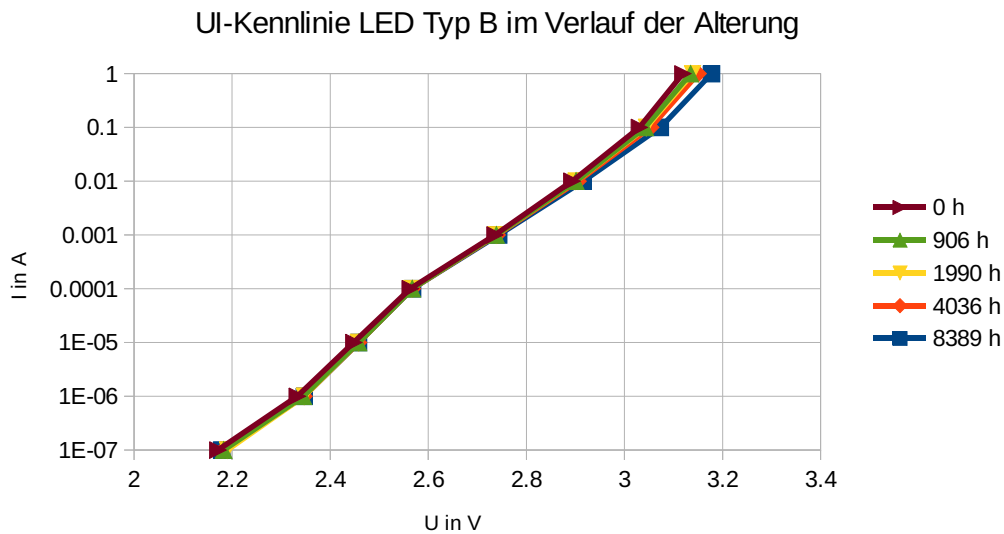


Abbildung 3: Verschiebung der UI-Kennlinie LED Typ B

Die Kennlinie von LED Typ A verschiebt sich stark im Rekombinationsbereich aufgrund der Erhöhung von Leckströmen [2]. Bei der Kennlinie von LED Typ B ist diese Verschiebung nicht zu erkennen, deshalb wird in den weiteren Betrachtungen nur der LED Typ A untersucht. Der LED Typ A unterteilt sich in die zwei weiteren Typen A1 und A2. Im Hochstrombereich verschieben sich Typ A und Typ B durch die Änderung des Bahnwiderstandes [4] der Halbleitermaterialien.

3.2 Einfluss Stromstärke und Temperatur auf den Rekombinationsbereich

Das vorherige Kapitel zeigt eine starke Verschiebung der UI-Kennlinie im Rekombinationsbereich von LED Typ A, darum wird dieser LED Typ A in dem Bereich durch den Einfluss von Betriebsstrom und Umgebungstemperatur genauer betrachtet. Der LED Typ A unterteilt sich in die zwei weiteren Typen A1 und A2. Die folgende Abbildung zeigt die Veränderung der Diodenspannung durch die Alterung, gemessen bei einem Diodenstrom $I_F=100\text{nA}$, für die drei verschiedene Betriebsströme (350 mA, 700 mA und 1000 mA) bei einer konstanten Umgebungstemperatur von $T=95^\circ\text{C}$.

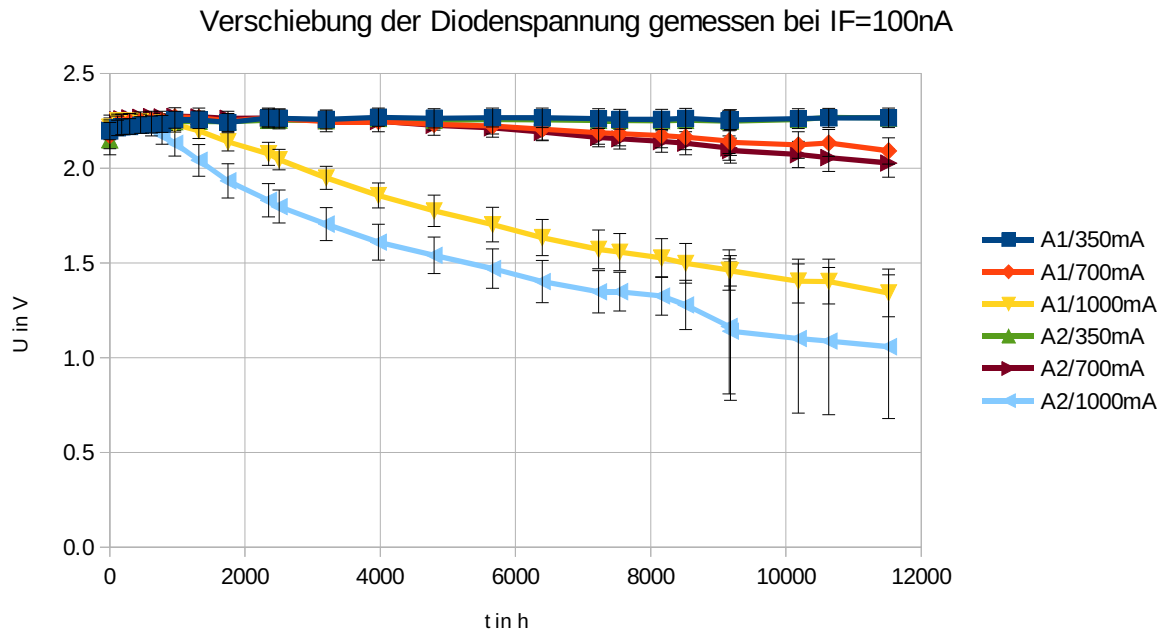


Abbildung 4: Verschiebung der Diodenspannung bei konstanter Umgebungstemperatur (95°C)

Das folgende Diagramm zeigt die Veränderung der Diodenspannung durch die Alterung, gemessen bei einem Diodenstrom $I_F=100\text{nA}$, für die drei verschiedenen Umgebungstemperaturen (55°C , 85°C und 95°C) bei einem konstanten Betriebsstrom von $I_{FB}=1000\text{mA}$.

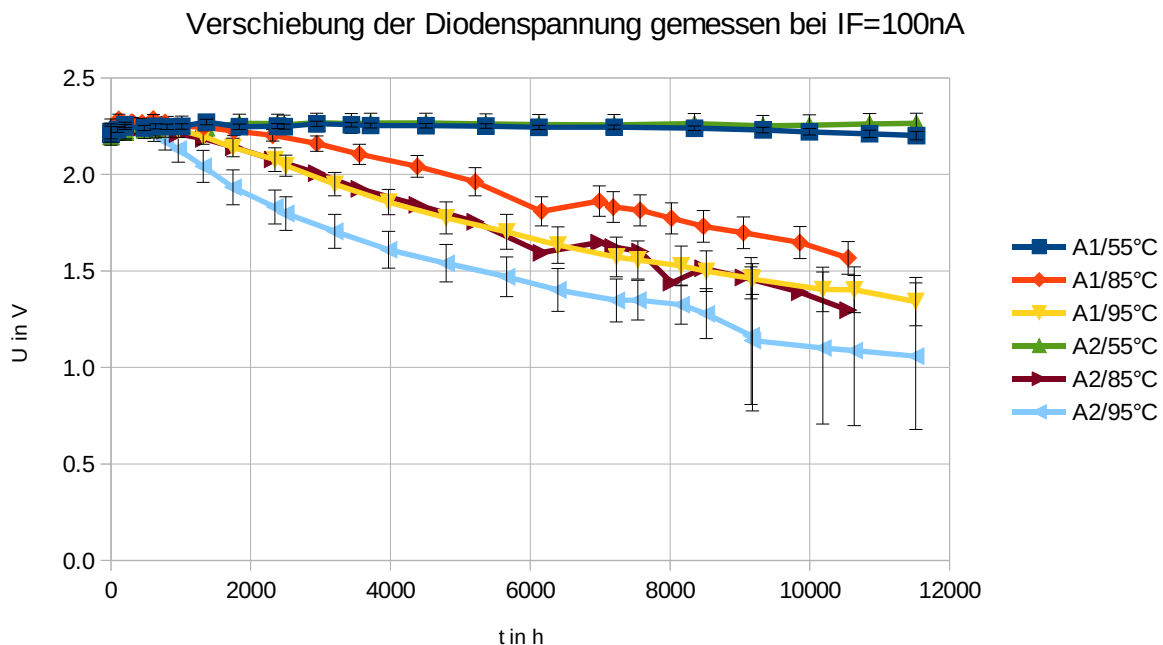


Abbildung 5: Verschiebung der Diodenspannung bei konstantem Betriebsstrom (1000mA)

Die Messungen zeigen eine stärkere Alterung im Rekombinationsbereich (I) bei höheren Betriebsströmen und höheren Umgebungstemperaturen.

3.3 Fotostrom in Abhängigkeit der Alterung

Der Fotostrom ist eine weitere elektrische Größe, die während der Alterung untersucht werden kann. Die folgende Abbildung zeigt die Messung der Kennlinie, während sie mit einer konstanten Lichtquelle beleuchtet wird, für LED Typ A bei den drei verschiedene Betriebsströmen (350 mA, 700 mA und 1000 mA) und einer konstanten Umgebungstemperatur von $T=95^\circ\text{C}$.

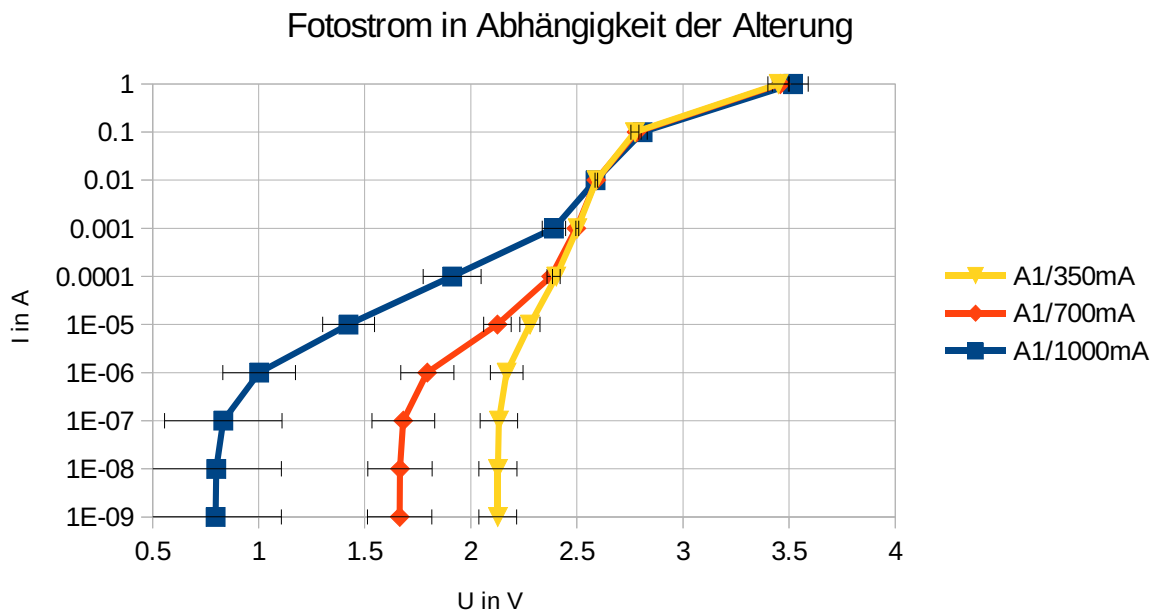


Abbildung 6: Verschiebung der beleuchteten UI-Kennlinie bei konstanter Temperatur

Die Messdaten zeigen einen unterschiedlichen Verlauf der UI-Kennlinie durch den Einfluss der Stromstärke bei konstanter Umgebungstemperatur auf die Alterung der LED. Es kann an dieser Stelle kein Zusammenhang auf einzelne Teilsysteme der LED wie z.B. Alterung des Chips oder Alterung der Linse hergestellt werden.

3.4 Vergleich zwischen Degradation des Lichtstroms und der Diodenspannung während der Alterung bei $I_F=100\text{nA}$ im Rekombinationsbereich

Bei einem höheren Betriebsstrom und einer höheren Umgebungstemperatur ähnelt der Verlauf der Degradation des Lichtstromes dem Verlauf der Änderung der Diodenspannung bei $I_F=100\text{nA}$ im Rekombinationsbereich (I), was sich anhand der beiden Verläufe der stärksten Alterung bei $T=95^\circ\text{C}$ und $I_{FB}=1000\text{mA}$ gut darstellen lässt.

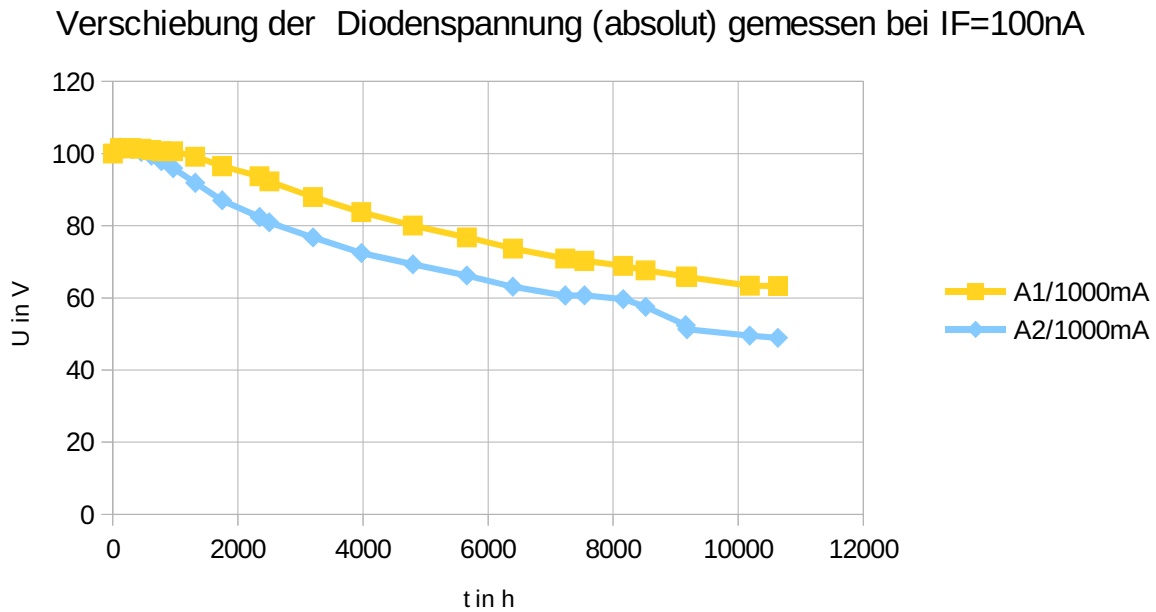
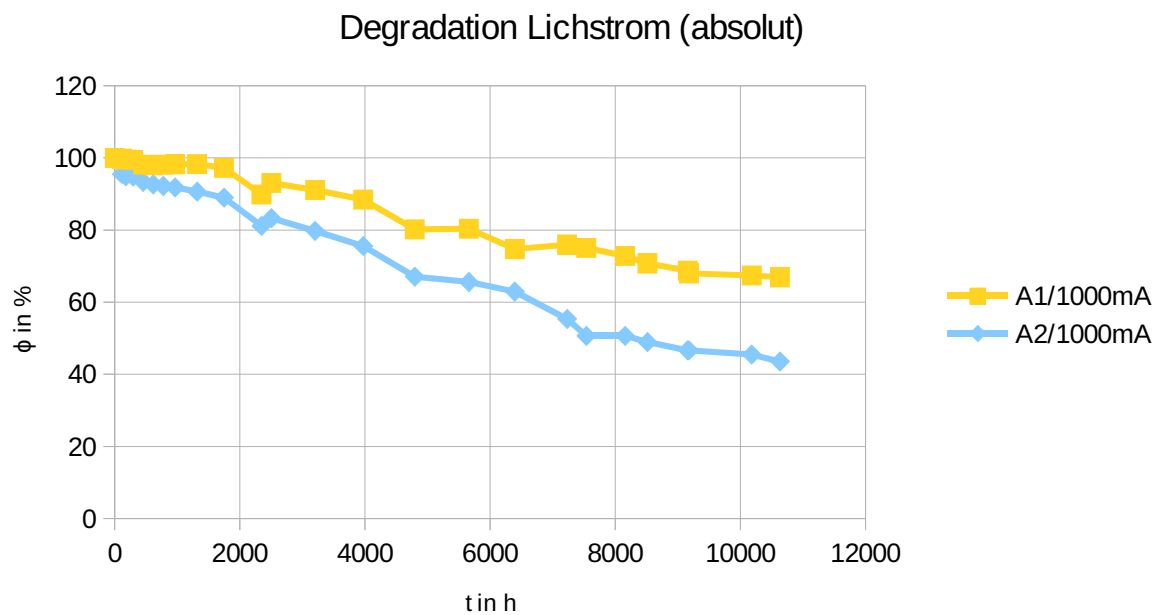
Abbildung 7: Verschiebung Diodenspannung (absolut) gemessen bei $I_F=100\text{nA}$ 

Abbildung 8: Degradation Lichtstrom (absolut)

Um einen Vergleich zu erhalten, werden die absolut Werte des Lichtstromes (Abbildung 8) und der Diodenspannung (Abbildung 7) übereinander aufgetragen und eine lineare Regression gebildet, die in der folgenden Abbildung 9 dargestellt ist.

Lineare Regression Lichtstrom und Diodenspannung im Verlauf der Alterung

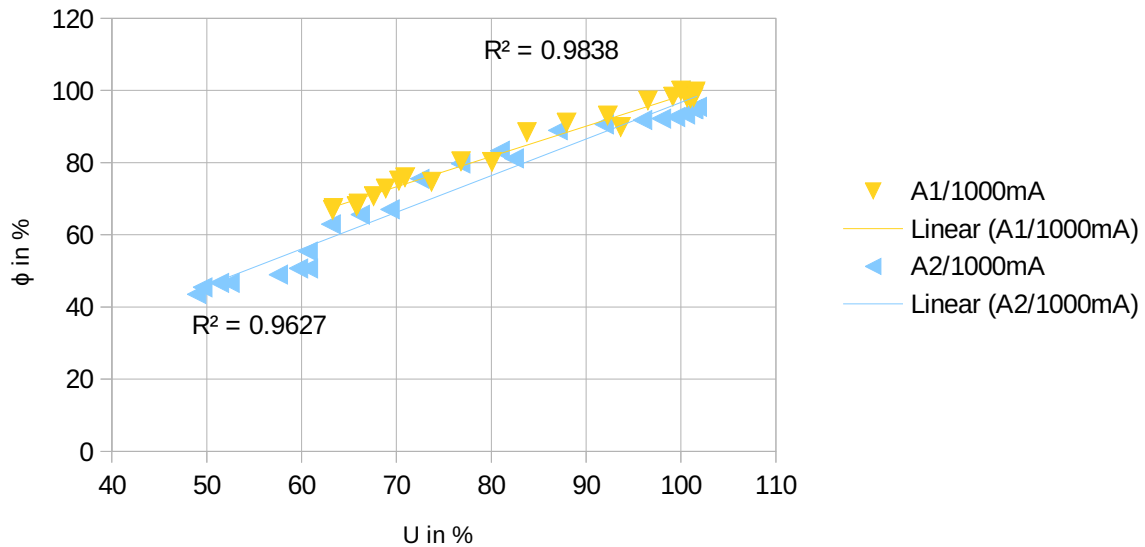


Abbildung 9: Lineare Regression zwischen Lichtstrom und Diodenspannung gemessen bei 100nA

Die absoluten Werte des Lichtstromes und der Diodenspannung zeigen eine sehr gute Korrelation.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die elektrischen Größen der LED ändern sich während des Betriebes über lange Zeiträume, wie die Messergebnisse durch die Verschiebung der Kennlinien zeigen.

Im Hochstrombereich (III) verschieben sich die UI-Kennlinien beider LED Typen A und B Richtung einer höheren Spannung, in Folge der Steigung des Bahnwiderstandes durch den Betrieb. Der Grad der Erhöhung ist von der Höhe des Betriebsstromes und der Höhe der Umgebungstemperatur abhängig.

Im Diffusionsbereich (II) der Kennlinie findet bei beiden LED Typen A und B keine Verschiebung während der Alterung statt.

Der Rekombinationsbereich (I) verschiebt sich bei GaN LED Typ A1 und A2 stark im Vergleich zum SiC LED Typ B, deshalb wird nur die Alterung des Rekombinationsbereiches von LED Typ A untersucht. Die Messungen zeigen einen Einfluss des Betriebsstromes und der Umgebungstemperatur auf den Grad der Verschiebung des Rekombinationsbereiches der UI-Kennlinie. Bei höheren Betriebsströmen und Umgebungstemperaturen verschiebt sich die Kennlinie im Rekombinationsbereich stärker als bei geringeren Betriebsstrom und Umgebungstemperatur. Außerdem zeigen die Messdaten eine lineare Regression mit hohem Gütegrad zwischen der Degradation des Lichtstromes und der Änderung der Diodenspannung im Rekombinationsbereich, allerdings nur wenn die LED stark degradiert.

Die Messdaten zeigen, dass durch einen Diodenstrom im Rekombinationsbereich eine starke Degradation elektrisch messbar ist. Dadurch kann ein elektrisches Modell für die Alterung erstellt werden, welches z.B. ab einen bestimmten Schwellwert bzw. einer Altersgrenze die LED als defekt meldet.

5 References

- [1] T. Vos, P. den Breeijan und W. D. van Driel. "Quality and Reliability in Solid-State-Lighting: Qua Vadis?", In: Solid State Lighting Reliability Part 2. by Willem Dirk van Driel, Xuejun Fan and Guo Qi Zhang. Bd. 3. Solid State Lighting Technology and Application Series. Cham and s.l.: Springer International Publishing, 978-3319581743, 2018.
- [2] M. Buffolo, C. De Santi, M. Meneghini , D. Rigon, G. Meneghess and E. Zanoni, "Long-term degradation mechanisms of mid-power LEDs for lighting applications", *Microelectronics Reliability* 55 (2015) 1754–1758, 2015,
- [3] S. W. Lee, D. C. Oh, H. Goto, J. S. Ha, H. J. Lee, T. Hanada, M. W. Cho, T. Yao, S. K. Hong, H. Y. Lee, S. R. Cho, J. W. Choi, J. H. Choi, J. H. Jang, J. E. Shin, and J. S. Lee "Origin of forward leakage current in GaN-based light-emitting devices", *Appl. Phys. Lett.* 89, 132117, American Institute of Physics, 2006
- [4] K. Homeyer: „Alterungsuntersuchungen an Hochleistungs-LEDs: Verfahren, Beobachtungen, Messergebnisse“; LICHT 2014, 21. Gemeinschaftstagung, Den Haag, 21.9.–24.09.2014, Tagungsband / Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V.; Lichttechnische Gesellschaft Österreichs; Schweizer Licht Gesellschaft; Nederlandse Stichting Voor Verlichtingskunde (NSVV) (Hrsg.), S. 346-353, PPN: 797732705, 2014
- [5] U. Tietze, Ch. Schenk, „Halbleiter Schaltungstechnik“, Springer, 12. Auflage, pp.16-19, 3-540-42849-6, 2002
- [6] PQL Messdaten Hochschule Hannover

DOI: [10.22032/dbt.39604](https://doi.org/10.22032/dbt.39604)

Rückwärtsschnitt zur geometrischen Kalibrierung einer kamerabasierten Goniometermesstechnik für hochauflösende Lichtstärkeverteilungen

Jan Feßler*; Markus Katona; Klaus Trampert; Cornelius Neumann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)

Engesserstraße 13, Geb.: 30.34, 76131 Karlsruhe

*: jan.fessler@kit.edu, +49 721 608 47383, lti.kit.edu

Zusammenfassung

Für die Bestimmung von hochaufgelösten Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) mittels kamerabasierter Goniometermesstechnik ist eine geometrische Kalibrierung notwendig. Diese stellt den räumlichen Zusammenhang zwischen den einzelnen Komponenten des Messsystems bestehend aus Kamera, Goniometer und einem weißen Schirm her.

Zur Bestimmung der geometrischen Kalibrierung wird im Folgenden mithilfe eines photogrammetrischen Verfahrens die Pose einer Kamera im Raum geschätzt. Hierfür werden geometrisch bekannte Objektpunkte sowie deren Bildpunkte in der Abbildung durch eine Messkamera, welche durch das Lochkameramodell beschrieben wird. Des Weiteren werden die intrinsischen Parameter der Kamera benötigt. Die Berechnung beruht auf den Kollinearitätsgleichungen, welche einen mathematischen Zusammenhang zwischen Punktepaaren und der Kamerapose, zusammengesetzt aus Translation und Rotation, herstellen.

Bei der folgenden Validierung des Kalibrieransatzes nimmt eine Kamera die Position der Lichtquelle ein, um so Aussagen über die Anwendbarkeit des Ansatzes treffen zu können.

1 Einleitung

Der Einsatz spezialisierter Leuchten findet immer weitere Verbreitung. Zur Überprüfung der gewünschten Lichtfunktion werden diese Leuchten mithilfe von Goniophotometersystemen hinsichtlich ihres Abstrahlverhaltens vermessen. Die Lichtstärke I gibt die richtungsabhängige Intensitätsverteilung der Lichtquelle wieder. Voraussetzung dafür ist eine Punktlichtquelle. Daher muss in großer Entfernung gemessen werden, um diese Bedingung zu erfüllen. Je nach gewünschter Auflösung, also Anzahl der einzelnen Messpunkte, dauert eine Messung bis zu mehreren Stunden.

© 2019 by the authors. – Licensee Technische Universität Imenau, 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/), (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

In einem anderen Ansatz zur Bestimmung einer LVK ersetzt ein Schirm das Photometer, welches als einpixeliges Messgerät die Messpunkte nur seriell abarbeiten kann [1]. Hier wird der Schirm durch das zu vermessende Objekt (engl. *device-under-test* DUT) beleuchtet und gleichzeitig von einer Leuchtdichtkamera betrachtet. Dadurch erfasst jeder Pixel der Kamera einen Teil des Schirms, welcher einer Raumrichtung bezogen auf das DUT entspricht. Dies vervielfacht die Anzahl der Messpunkte pro Einstellung und verkürzt so deutlich die Dauer bei gleichzeitig höherer Auflösung. Mithilfe eines Goniometers kann auch hier die durch Mehrfachaufnahmen und einem anschließenden *image merging*-Prozess die Vollraum-LVK zusammengesetzt werden. Allerdings führt die Bestimmung der Lichtstärke über die Schirmfläche ohne eine präzise Zuordnung zwischen Kamerapixel und Raumwinkel zu einer geometrischen Unsicherheit, wodurch das Zusammenfügen von Teilsegmenten der LVK zu sichtbaren Sprüngen an den Rändern der Aufnahmen führt [2, pp. 154-155].

In diesem Beitrag wird ein Teil der geometrischen Kalibrierung eines solchen Messraums vorgestellt. Dafür wird eine aus der Photogrammetrie bekannte Lösungsstrategie auf das kamerabasierte Goniometermesssystem angewandt. Die eingesetzte Methode ist als räumlicher Rückwärtsschnitt bekannt und berechnet die Position und Lage, kurz Pose, einer Kamera im Raum über die Korrespondenz von bekannten Objektpunkten und deren Abbildung in der dazugehörigen Aufnahme. Die Kamera wird hierbei durch eine Lochkamera modelliert. Für die geometrische Kalibrierung wird das System zunächst in die Teilsysteme Schirm zu Kamera und Schirm zu DUT aufgespalten. Das Teilsystem Schirm zu Kamera dient als erster Test für den Algorithmus in der spezifischen Anwendung und als Grundlage für Zuordnung der Raumwinkel der Kamera auf dem Schirm, während das zweite Teilsystem zwischen Schirm und DUT bzw. Goniometerdrehzentrum für eine präzisere Berechnung der Lichtstärke benötigt wird.

Im Nachfolgenden erfolgt zuerst eine Erläuterung der Kollinearitätsgleichungen und des Rückwärtsschnitts. Anschließend wird das entsprechende Goniometersystem am LTI vorgestellt und der implementierte photogrammetrische Algorithmus angewandt, um die Zuordnung von Winkelbereichen auf dem Schirm zu Kamerapixel zu finden. Des Weiteren wird durch die Montage einer zweiten Kamera an der Position des Messobjekts die Methode validiert. Hierfür wird das Goniometer entlang der Achsen verfahren und zu der jeweiligen Schrittweite eine Pose bestimmt. In weiterführenden Untersuchungen soll ebenfalls eine Kamera auf dem Goniometer bewegt werden um so die Lage zwischen Goniometerdrehzentrum und Schirm bestimmen zu können.

2 Photogrammetrische Grundlagen

Zur Bestimmung der Kamerapose werden geometrische Informationen aus Realpunkten mit deren Abbildungen verknüpft. Diese Verknüpfung geschieht unter der Annahme von Kollinearität.

Hierfür werden zuerst die Orientierungen von Kamerasystemen erläutert. Darauf folgen allgemeine Definitionen über die Relationen von Koordinatensystemen für die folgenden kollinearen Abbildungen. Abschließend wird der Rückwärtsschnitt zur Bestimmung der äußeren Kameraorientierung, auch Kamerapose genannt erklärt.

2.1 Orientierungen der Kamera

Zum besseren mathematischen Umgang werden die verschiedenen Kameraparameter in äußerer und innerer Orientierung unterschieden, die zum einen die globale Lage und zum anderen die intrinsische Charakterisierung der Kamera beschreibt.

2.1.1 Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung entspricht der Kamerapose. Diese wird durch drei Positionsvariablen X , Y und Z und drei Rotationen ω , φ und κ bestimmt. Die Darstellung der äußeren Orientierung erfolgt in der Regel durch einen Vektor der zuerst die Translation und anschließend die Rotation enthält.

2.1.2 Innere Orientierung

Die innere Orientierung gibt Aufschluss über die optisch relevanten Parameter der Kamera. Diese umfassen die Kamerakonstante c bzw. die Brennweite f und die Lage des Bildhauptpunktes der Kamera, beschrieben durch die Bildkoordinaten x_0 und y_0 .

2.2 Abbildungen

Die benötigten geometrischen Informationen werden über Koordinaten realer Punkte von markanten Objekten der Berechnung zugeführt. Im Folgenden werden diese Koordinaten als Objektkoordinaten $[X, Y, Z]$ bezeichnet. Gleichzeitig erfolgt die Lokalisierung derselben Punkte in der Aufnahme, den Bildkoordinaten $[x, y]$. Dadurch ergeben sich eindeutige Zusammenhänge zwischen Abbildung und Objekt. Ein mögliches Gesamtsystem ist in Abbildung 2.1: Abbildungssystem mit untergeordnetem Koordinatensystem in Rot. \vec{X}_0 entspricht dem Translationsvektor und f der Brennweite. gezeigt. Hierbei entspricht das untergeordnete System der Kamera. Dieses kann beliebig im übergeordneten Koordinatensystem gedreht und verschoben sein. Bezogen auf eine Kamera entspricht dies der Kamerapose, welche sich aus einer Translation und einer Blickrichtung (Rotation) ergibt. Grundlage hierfür ist die Zentralprojektion, bei welcher alle Strahlen einen gemeinsamen Schnittpunkt, das Projektionszentrum genannt, haben [3, p. 244]. Dieses Projektionszentrum ist in Abbildung 2.1: Abbildungssystem mit untergeordnetem Koordinatensystem in Rot. \vec{X}_0 entspricht dem Translationsvektor und f der Brennweite. durch den Ursprung des roten Unterkoordinatensystem dargestellt.

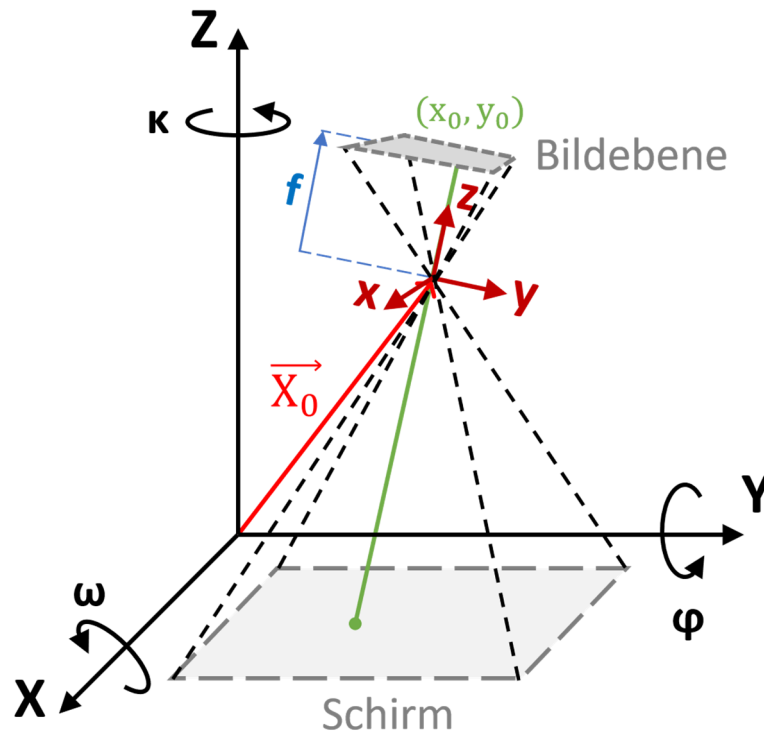


Abbildung 2.1: Abbildungssystem mit untergeordnetem Koordinatensystem in Rot. \vec{X}_0 entspricht dem Translationsvektor und f der Brennweite. x_0 und y_0 stellen Bildkoordinaten dar.

Grundlegend für die Abbildung durch die Zentralprojektion ist der Strahlensatz, der die Koordinaten von Punkten entlang eines Strahls beschreibt. Im zweidimensionalen lässt sich dieser Zusammenhang über die Koordinaten a und b mit

$$\left| \frac{a_1}{a_2} \right| = \left| \frac{b_1}{b_2} \right| \quad (2.1)$$

beschreiben. Dies ermöglicht die Formulierung von geometrischen Zusammenhängen, zwischen einem Punkt in einer Aufnahme und einem Punkt im reellen Raum.

2.3 Transformation von Koordinatensystemen

Die Transformationen zwischen zwei Koordinatensystemen wird durch eine Translation und eine Rotation beschrieben. Dies ermöglicht die Darstellung derselben Punkte in unterschiedlichen Koordinatensystemen.

Die räumliche Drehung wird durch eine Rotationsmatrix beschrieben. Diese besteht aus einer Multiplikation der drei Einzelrotationen ω um die X-Achse, φ um die Y-Achse und κ um die Z-Achse. Die Einzelrotationen ergeben sich wie folgt [3, p. 219]:

$$R_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix}, R_\varphi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix}, R_\kappa = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \sin(\kappa) & 0 \\ -\sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Die Drehreihenfolge ω , φ , κ entspricht der entgegengesetzten Leserichtung und damit:

$$\mathbf{R}_{Ges} = \mathbf{R}_{\kappa} \cdot \mathbf{R}_{\varphi} \cdot \mathbf{R}_{\omega} \quad (2.3)$$

Für die Überführung in ein anderes Koordinatensystem wird zusätzlich eine Translation \vec{X}_0 benötigt. Ein zusätzlicher Maßstabsfaktor m_B beschreibt die Streckung des Bildes welche durch die Abbildung zwischen Bild und Objekt entsteht. Daraus folgt die Gesamtgleichung:

$$\vec{X}_{neu} = \vec{X}_0 + m_B \cdot \mathbf{R} \cdot \vec{X}_{alt} \quad (2.4)$$

Ist eine bekannte Kamera gegeben, so können mithilfe des gegebenen Mittelpixels $[x_0, y_0]$ und Pose der Kamera die Objektpunkte in Bildpunkte umgerechnet werden. Der Vergrößerungsfaktor ergibt sich über die Brennweite der Kamera, da $f \approx -z$ [4, p. 144].

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{m_B} \cdot \mathbf{R}^T \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Für die Rotationsmatrix gilt $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$.

2.4 Kollinearitätsgleichungen

Die Kollinearitätsgleichungen beschreiben die Berechnung von Bildpunkten aus Objektpunkten und umgekehrt. Aufgrund der grundlegenden Beschreibung von Abbildungen sind aus diesen Gleichungen verschiedene Methoden zur Berechnung von Posen, weiteren Punktkorrespondenzen und Mehrbildverfahren entstanden.

Um die Kollinearitätsgleichungen zu erhalten, werden die beiden ersten Zeilen aus Gleichung (2.5) durch die Dritte geteilt. Dadurch entfällt der Maßstabsfaktor m_B [4, p. 240]. Umgeformt nach den Bildkoordinaten ergeben sich die Kollinearitätsgleichungen:

$$x = x_0 + z \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.6)$$

$$y = y_0 + z \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.7)$$

Auf diesen Gleichungen basiert der verwendete Rückwärtsschnitt. Sie sind die Grundgleichungen der Photogrammetrie, da auf ihnen ebenfalls der Vorwärtsschnitt und die Bündeltriangulation beruhen [4, p. 244].

Sie stellen außerdem den einfachsten Zusammenhang linearer Abbildungen im geometrischen Sinn dar, in welchem sie durch die Positionen von Projektionszentrum und Objektpunkten die direkte Bestimmung von Bildkoordinaten ermöglichen.

2.5 Rückwärtsschnitt zur Posenfindung

Im Allgemeinen berechnet der Rückwärtsschnitt bei Eingabe einer hinreichenden Anzahl an Punkten eine Pose mit minimaler Abweichung der Bildkoordinaten, welche aus der Pose bestimmt wurden, zu den gegebenen Bildpunkten. Diese liegen zwischen drei, wenn die innere Orientierung bekannt ist, und fünf Punkten, falls die innere Orientierung mitgeschätzt werden soll.

Für die Berechnung des Rückwärtsschnitts werden die Kollinearitätsgleichungen über eine Taylorentwicklung linearisiert und mithilfe eines Least-Squares-Schätzers ein Poseninkremental berechnet, welches auf eine Initialpose beaufschlagt wird, um so eine verbesserte Pose zu berechnen. Dieses Vorgehen wiederholt sich bis ein vorgegebenes Konvergenzkriterium erfüllt ist.

Der Least-Square-Schätzer minimiert den Bildpunktfehler anhand des Poseninkrementals auf Basis der folgenden Gleichungen [4, p. 243]:

$$vx = \left(\frac{\partial x}{\partial X_0}\right) dX_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial Y_0}\right) dY_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial Z_0}\right) dZ_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial \omega_0}\right) d\omega_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi_0}\right) d\varphi_0 + \left(\frac{\partial x}{\partial \kappa_0}\right) d\kappa_0 - (x - x_K) \quad (2.8)$$

$$vy = \left(\frac{\partial y}{\partial X_0}\right) dX_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_0}\right) dY_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial Z_0}\right) dZ_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial \omega_0}\right) d\omega_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial \varphi_0}\right) d\varphi_0 + \left(\frac{\partial y}{\partial \kappa_0}\right) d\kappa_0 - (y - y_K) \quad (2.9)$$

Die verwendete Realisierung des Rückwärtsschnitts entspricht der von Bashar Alsadik bereitgestellten Funktion im *MathWorks file exchange* [5].

3 Vorstellung des Messsystems

Das System des LTI besteht aus einem 5-Achsen-Goniometer, einem weißen Schirm, sowie einer Leuchtdichtemesskamera LMK 5-1 Color, welche am Goniometerkorpus montiert ist. Eine zugehörige 2D Skizze ist in Abbildung 3.1 zu sehen.

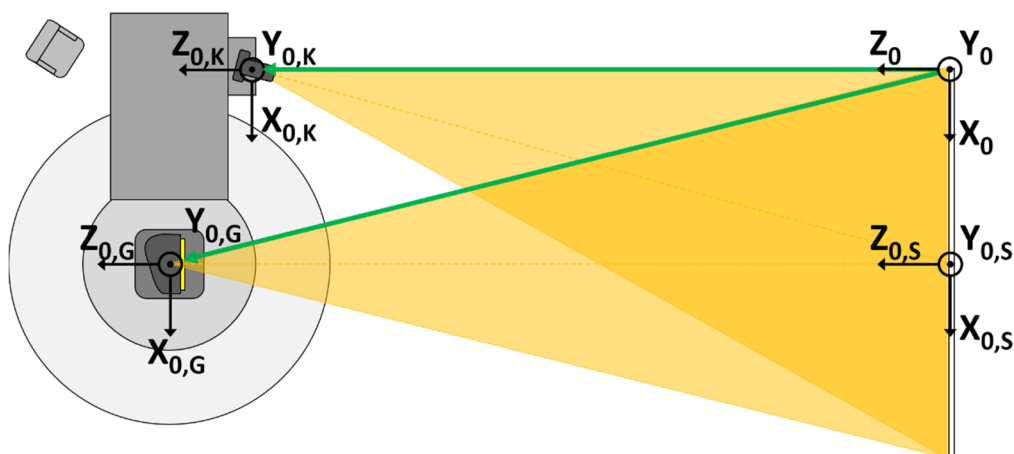


Abbildung 3.1: Skizze des Gesamtsystems mit den zugehörigen Koordinatensystemen

Die abgebildeten Koordinatensysteme sind dem jeweiligen Element zugeordnet. Der globale Ursprung ist dabei an der oberen linken Ecke des Schirms verortet und mit dem Index „0“ gekennzeichnet. Die weiteren Indizes sind „0,S“ für Schirm in der Schirmmitte, „0,G“ für Goniometer im Drehzentrum des Goniometers und „0,K“ für Kamera im Projektionszentrum der Kamera. Die grünen Pfeile stellen die zu bestimmenden Posen dar.

Die Objektpunkte werden durch Marker am Schirm verkörpert. Diese bestehen für die ersten geometrischen Kalibrierungsversuche aus Papier und sind händisch montiert und vermessen. Die Mittelpunkte der Kreise sind auf die Ecken bzw. Kanten des Schirms ausgerichtet. Mittels Kreisdetektion werden die zugehörigen Bildpunkte gefunden. Der Schirm misst 3 m x 1,8 m und liegt in der Z=0 Ebene.

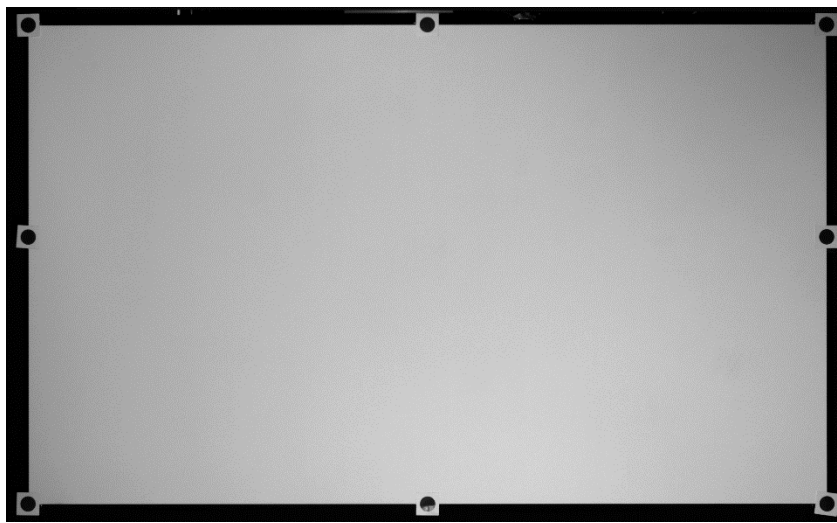


Abbildung 3.2: Aufnahme des Schirms mit montierten Markern

3.1 Stand der Technik

In diesem Unterkapitel werden Arbeiten beleuchtet, die relevante Informationen zum aktuellen Stand der Technik des Gesamtsystems liefern.

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH stellte zusammen mit LMT Lichtmesstechnik GmbH auf der Licht 2016 den Bildverarbeitungsraum (BV-Raum) vor [1]. Dieses ermöglicht die Aufnahme von Bildern eines Schirmes zur Berechnung von Lichtstärkeverteilungskurven. Bestandteile des Messraums sind ein Schirm, eine Leuchtdichtkamera, ein Photometer zum Stützen der Aufnahmen und ein Goniometer für den automobilen Bereich. Mehrbildaufnahmen mit Bildfusion sind ebenfalls möglich. Als Vorteile werden schnelle LVK-Messungen, Monitoring der gesamten Lichtverteilung, Photometerstützung sensibler Messpunkte, hohe Auflösung, hohe Kontraste, weitere Informationen wie Hell-Dunkel-Grenzen-Analyse und Homogenitätsinformationen angegeben. Geometrisch kalibriert wird das kamerabasierte Messsystem im Gegensatz zu dem hier dargestellten Verfahren mithilfe eines Winkelnormals.

Sayanca et. al. zeigten 2018 die Bedingungen und die Mathematik für die indirekte Messung von LVK mittels Messschirm und Leuchtdichtekamera [6]. Durch Raumfeldblenden konnte das Streulicht auf 1,5% relativ zu den Photometerwerten gesenkt werden. Des Weiteren werden Abweichungen zu Photometermessung bis zu einem minimalen Wert von 0,8% bei einer Winkelauflösung von 0,01° angegeben.

Sayanca bestimmte 2018 im Rahmen seiner Dissertation speziell für das in dieser Thesis verwendete Messsystem die Pose der Kamera mittels eines auf Homographie basierenden Ansatzes aus einer frei zugänglichen Matlab-Toolbox [2].

4 Messergebnisse

Zuerst erfolgt die Berechnung der statischen, am Goniometer verbauten, LMK 5-1 Color, welche auch im Messbetrieb verwendet wird. Diese wird dann mit der von Sayanca bestimmten Pose verglichen [2].

4.1 Posenbestimmung der Messkamera

Die Pose von Sayanca wird als Referenz herangezogen, da keine absoluten Daten für die Pose der Kamera und der Position des Drehzentrums vorhanden sind [2, p. 80]. Nach der Überführung in das in diesem Beitrag verwendete Koordinatensystem ergibt sich folgende Pose:

$$\vec{X}_{Sayanca} = [350 \text{ mm}, -380 \text{ mm}, 9750 \text{ mm}, -1.66^\circ, -6.8^\circ, -0.37^\circ] \quad (4.1)$$

Verglichen mit den durch den Rückwärtsschnitt berechneten Werten lässt sich eine erhebliche Differenz feststellen:

$$\vec{X}_{Rückwärts} = [103.63 \text{ mm}, -728.19 \text{ mm}, 9626.19 \text{ mm}, -0.82^\circ, -7.24^\circ, -0.397^\circ] \quad (4.2)$$

Der betragsmäßig größte Unterschied ist in der Höhe zu finden. Der Rückwärtsschnitt bestimmt hier nahezu den doppelten Betrag. Im Gegensatz dazu entspricht die Verschiebung entlang der X-Achse nur ungefähr einem Drittel der Pose von Sayanca. Die Betrachtung der Winkel hingegen entspricht den jeweiligen Ergebnissen. Die φ -Drehung des Rückwärtsschnitts muss größer sein, da sich die Kamera laut dieser Berechnung weiter entfernt vom Schirmzentrum befindet. Gleiches gilt für die Drehung um ω . Grund hierfür ist der ungefähr selbe Zielpunkt der Kamerabetrachtung.

Eine weitere Möglichkeit eine Aussage über die Validität der Pose treffen zu können ist der Rückprojektionsfehler. Hierbei werden die aufgenommenen Bildpunkte mithilfe der bestimmten Pose mathematisch auf den Schirm projiziert und deren Abweichung zu den reellen Punkten bestimmt. Die Fehler sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

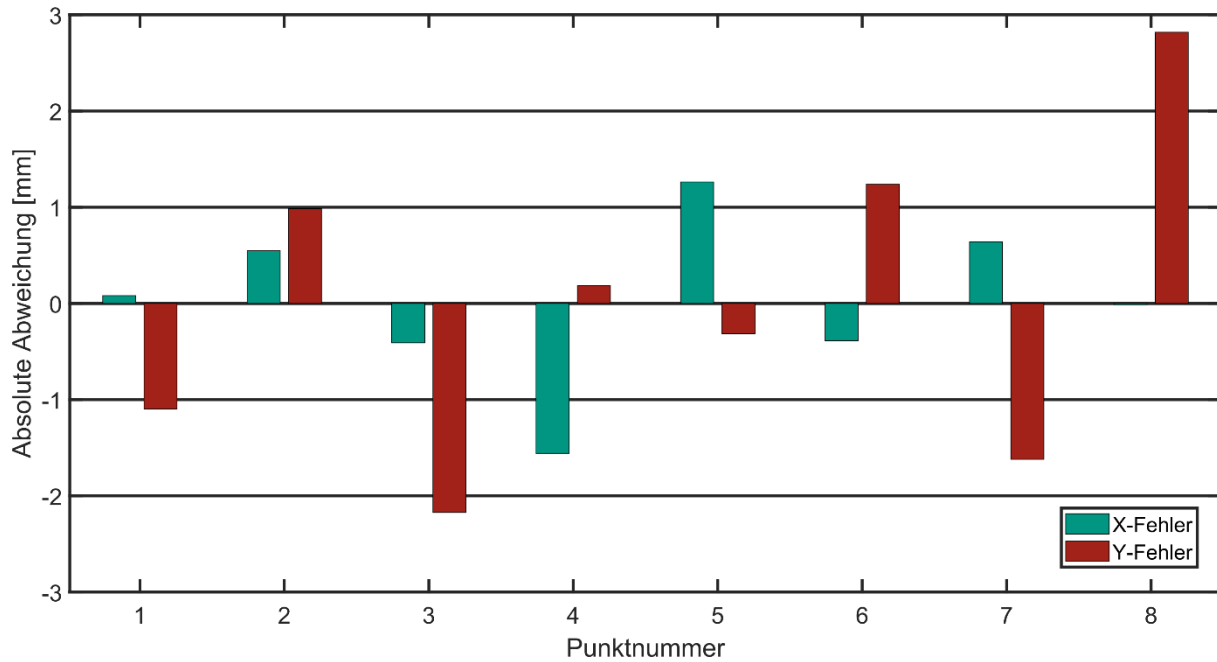


Abbildung 4.1: Rückprojektionsfehler. Die Punktnummer ist Zeilenweise aufsteigend von links oben nach rechts unten

Der Fehler in X-Richtung fällt hierbei deutlich geringer aus als in Y-Richtung. Dies könnte mit der Auflösung in der jeweiligen Richtung zusammenhängen, da die Kamera im vertikalen deutlich mehr, als nur den Schirm aufnimmt. Damit entfällt weniger „effektive Auflösung“ der Kamera auf den Schirm. Ein systematischer Einfluss auf den Projektionsfehler ist nicht zu erkennen. Die Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers (MQF) ergibt in $X = 0,28$ mm und $Y = 0,55$ mm. Die Pose von Sayanca führt zu einem MQF von $X = 65,89$ mm und $Y = 71,57$ mm. Dies weist auf eine notwendig gute Bestimmung der Kamerapose in diesem Anwendungsfall hin.

4.2 Überprüfung des Algorithmus Mithilfe von Messfahrten

Im Folgenden wird die Präzision des Algorithmus mithilfe von Messfahrten des Goniometers überprüft. Diese sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Dazu wird eine LMK 5-5 Kamera an der Stelle des DUT montiert und die Achsen schrittweise verfahren. Für jeden Schritt wird die Pose der Kamera berechnet. Somit ergibt sich eine Methode zur Überprüfung des Algorithmus, da die Ergebnisse mit der Schrittweite des Goniometers verglichen werden können. Des Weiteren ermöglichen die Messreihen Aussagen zur Präzision der Achsbewegungen. Die Lage der Kamera ist für diesen Teil nicht relevant, da über die Positionen der Pose die Achsbewegung bestimmt werden soll.

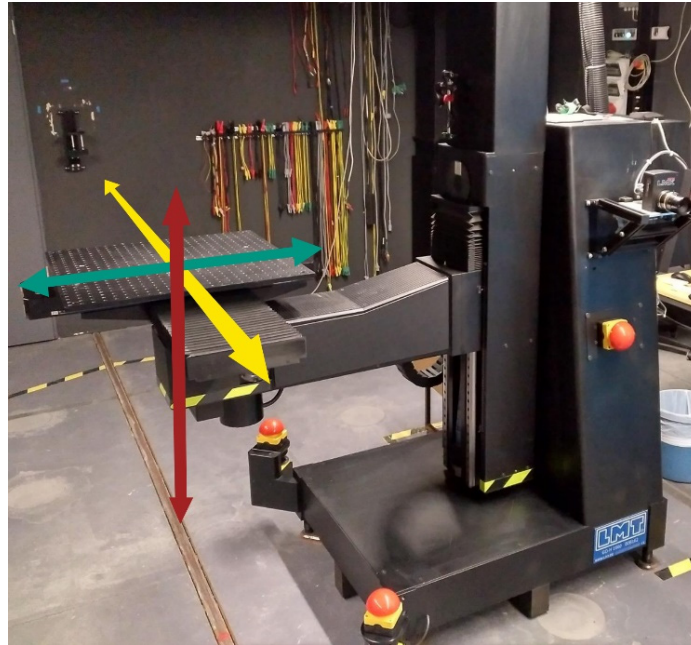


Abbildung 4.2: Überprüfte Achsen. X-Achse (grün), Y-Achse (rot) und Z-Achse (gelb)

Die möglichen untersuchbaren Kamerapositionen in der jeweiligen Achse werden durch das Blickfeld der Kamera festgelegt, sodass an jeder Position alle Messpunkte in der Aufnahme vorhanden sind.

Tabelle 1: Schrittweite der einzelnen Messfahrten

Achse											
$X_{Y,Z=0}$	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100
$Y_{X,Z=0}$	-500	-450	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0
$Z_{X,Y=0}$	-200	-160	-120	-80	-40	0	40	80	120	160	200

Anschließend folgt die Bestimmung einer Regressionsgeraden durch die bestimmten Positionen. Daran schließt sich die Berechnung der Differenz zwischen berechnetem Punkt und dem Punkt mit der Schrittweite entlang der Geraden. Die jeweiligen Fehler sind in den Abbildungen 6-8 dargestellt. Entlang der X-Achse dominiert der X-Fehler. Gleiches gilt für die Y-Achse. Generell folgen die Fehler in X und Y Richtung keiner Systematik. Dem können physikalische Gegebenheiten zu Grunde liegen, wie beispielsweise die Auflösung der Kamera oder die Präzision der Marker am Schirm. Einzig der Z-Fehler entlang der Z-Achse weist ein lineares Verhalten um den Nullpunkt auf. Dies legt nahe, dass entweder ein Proportionalitätsfehler in der Entfernungsbestimmung vorliegt oder der Positionsgeber des Goniometers fehlerhaft ist. Die Steigung des Z-Fehlers entlang der Z-Achse beträgt 35,9 mm/m. Dies würde unter der Annahme wahrer Posenschätzungen 1,44mm pro Messschritt entsprechen.

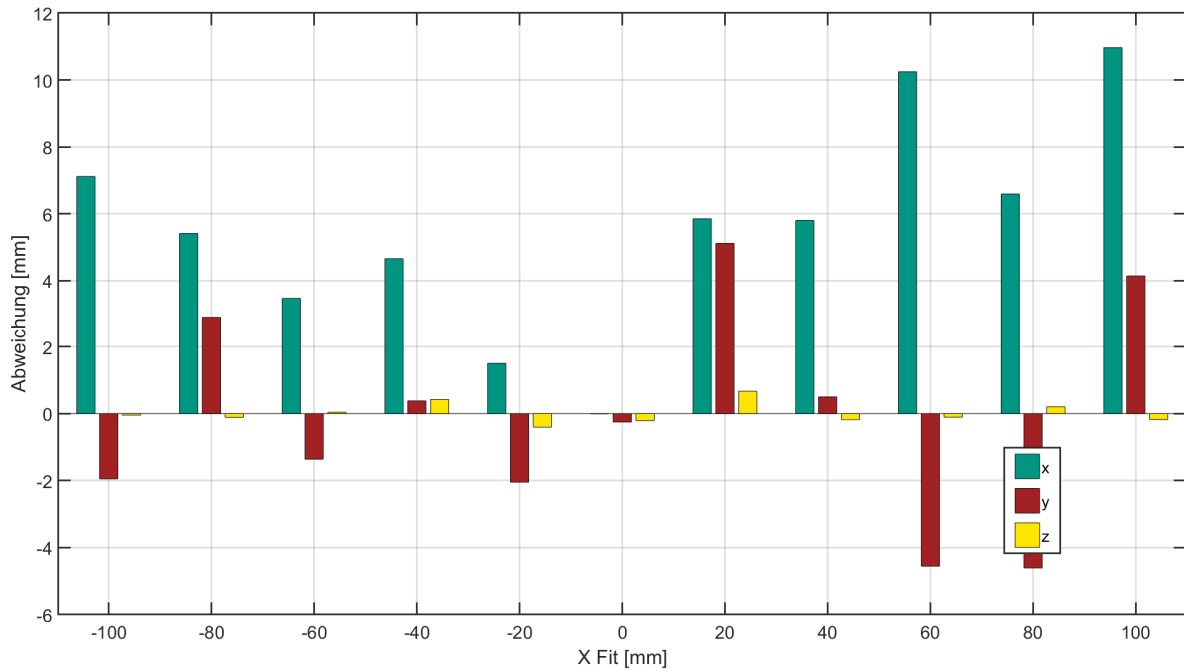


Abbildung 4.3: Abweichung der Posenpositionen in jeder Raumrichtung zur Regressionsgeraden für die X-Achse.

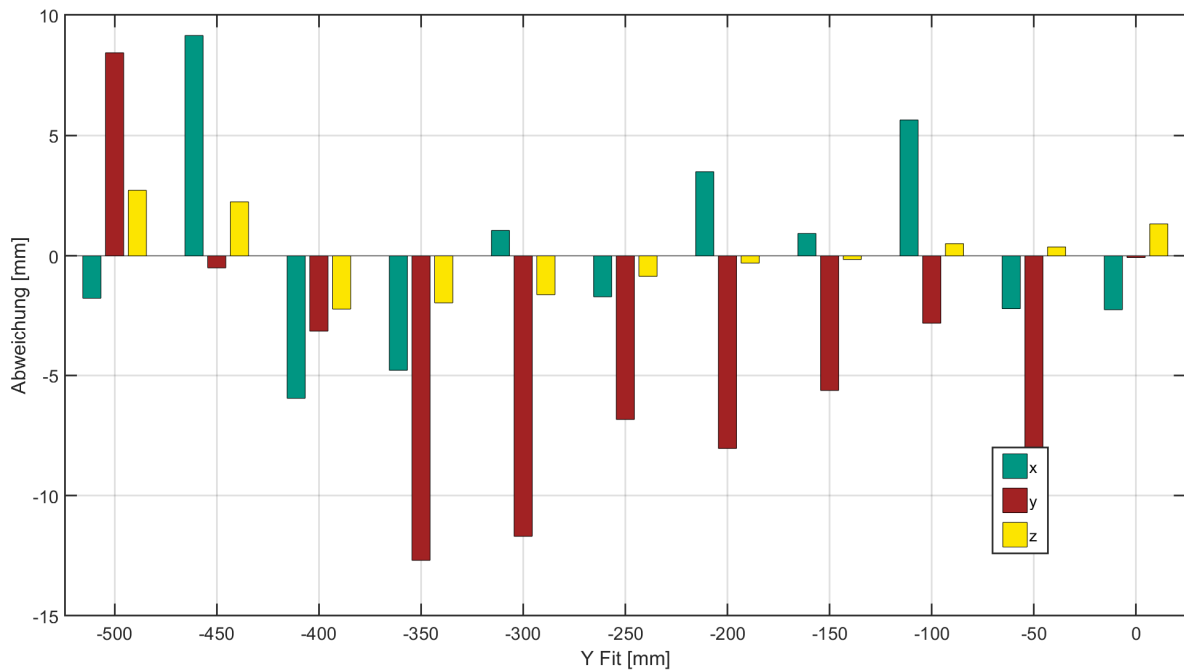


Abbildung 4.4: Abweichung der Posenpositionen in jeder Raumrichtung zur Regressionsgeraden für die Y-Achse.

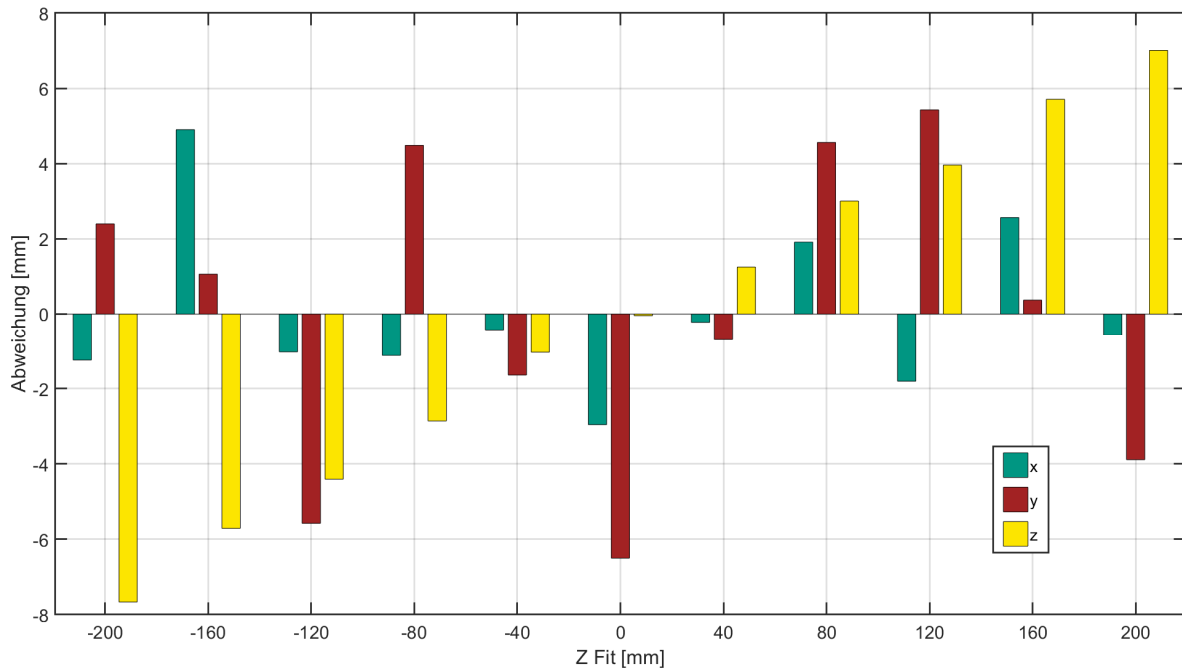


Abbildung 4.5: Abweichung der Posenpositionen in jeder Raumrichtung zur Regressionsgeraden für die Z-Achse.

4.3 Zusammenführung der Achsen

Die Anfahrgenauigkeit des Goniometers ist mit kleiner 0,5 mm angegeben [7]. Bei der Betrachtung der zusammengeführten Achsen wird deutlich, dass die Posenbestimmung des Rückwärtsschnitts keine hinreichende Genauigkeit bietet. Dies zeigen die Nullpunkte der Messfahrten, welche sich jeweils deutlich unterscheiden. Die entsprechenden Werte sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Vergleich der Nullpunkte der verschiedenen Messfahrten.

Achse	X_0 [mm]	Y_0 [mm]	Z_0 [mm]
X	1418,69	-774,15	10309,29
Y	1413,96	-762,55	10309,66
Z	1422,31	-779,85	10309,76

Die Unterschiede für die Validierung in X- und Y-Richtung sind hierbei nicht vernachlässigbar. Die Abweichung der Positionsbestimmung liegt weit über der angenommenen Positionierungsvarianz laut Datenblatt [7]. Leidglich die Positionierungsgenauigkeit in Z-Richtung liegt mit einer Spanne von lediglich 0,49 mm innerhalb der Positionierungsgenauigkeit. Die Gesamtdarstellung der Messfahrten ist in Abbildung 4.6 gezeigt.

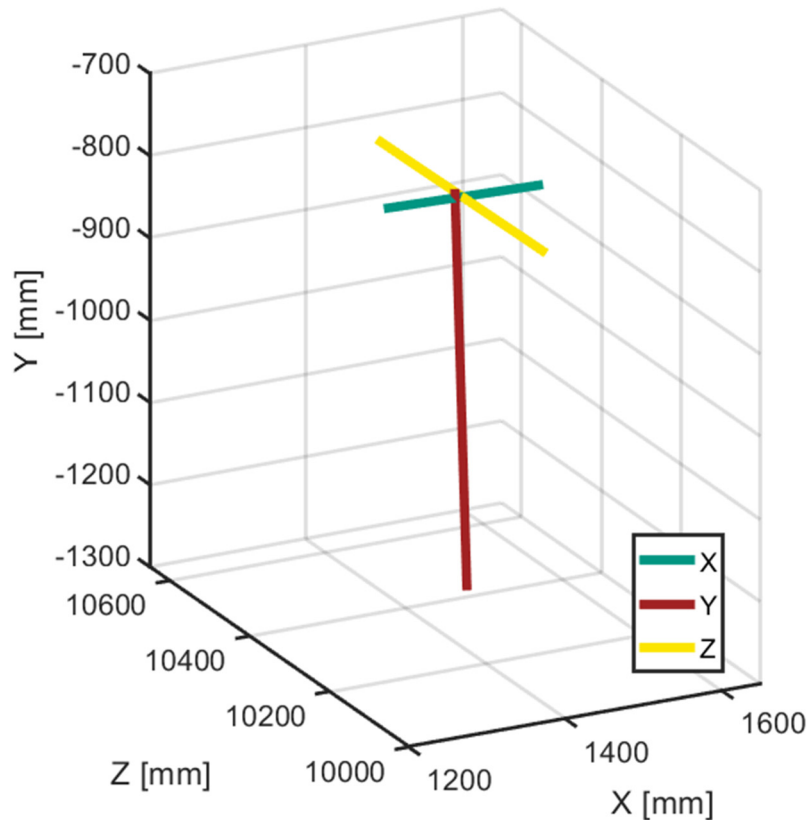


Abbildung 4.6: Resultierende Achskreuz

5 Fazit

Mit bekannten Objektpunkten ist es möglich, mithilfe deren Abbildungen, eine Kamerapose durch den Rückwärtsschnitt zu schätzen. Da keine absoluten Daten mit hinreichend kleiner Unsicherheit für das Messsystem vorhanden sind, wurden alternative Methoden zur Validierung getestet. Der Rückprojektionsfehler der fest montierten Messkamera bestätigt die Validität der geschätzten Pose innerhalb der gegebenen Toleranzen.

Die Messfahrten entlang der Achsen zeigen jedoch eine unzureichende Präzision in der geschätzten Einzelpose pro Messschritt. Die Abweichungen zu den einzelnen Regressionsgeraden zeigen Abweichungen weit über den Anfahrge nauigkeit des verwendeten Goniometers. Die benötigte Präzision wird auch in der Entfernungsbestimmung nicht erreicht.

Es werden weitere Optimierungen für diesen Kalibrierprozess benötigt. Die größte Ungenauigkeit bringen die eingesetzten Marker in das System. Diese wurden händisch an den Ecken und Kanten des Schirms ausgerichtet und grob vermessen. Im nächsten Schritt sollen laservermessene Marker verwendet werden, um so präzise Eingabewerte zu akquirieren. Des Weiteren ist der Einfluss der Kamerakalibrierung zu untersuchen, da diese nicht explizit auf geometrische Anwendungszwecke ausgelegt ist. Durch weitere Arbeiten am Messsystem konnte eine hohe Sensitivität gegenüber

der Kamerakalibrierung festgestellt werden. Die Methode des Rückwärtsschnitts kann etwa durch Hinzunahme der Ableitung zweiter Ordnung und damit potenteren Schätzverfahren weiter verbessert werden. Auch die Verwendung komplexerer Berechnungsmethoden, wie dem Bündelblockausgleich sind zu Berücksichtigen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] C. Schwanengel, F. Schmidt, T. Reiners und C. Diem, „Das Beste aus zwei Welten - Kombination von Goniophotometrie und digitaler Bildverarbeitung,“ 2016. [Online]. Available: https://www.technoteam.de/apool/tnt/content/e6009/e7542/e7797/pb_download7802/Licht2016_TTBV_LMT_final_ger.pdf.
- [2] I. L. Sayanca, Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern bei kamerabasierter Farbverteilungsmessung, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2018.
- [3] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew, G. Musiol und H. Mühlig, Taschenbuch der Mathematik, Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel, 2013.
- [4] T. Luhmann, Nahbereichsphotogrammetrie, Berlin: Wichmann, 2010.
- [5] B. Alsadik, „"space photo resection" MathWorks File Exchange (28.06.2019),“ 22 02 2013. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40467-space-photo-resection>.
- [6] I. L. Sayanca, K. Trampert und C. Neuman, „Indirect light intensity distribution measurement using image merging,“ *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI*, pp. 307-315, 2018.
- [7] LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin, „Goniometer LMT GO-H 1660 Datenblatt,“ 2003. [Online]. Available: http://www.lmt-berlin.de/ds/Datenblatt_LMT_GO-H_1660_B409_EN_screen.pdf.

Systemanalyse eines bildgebenden LVK Messsystems mittels Monte Carlo Simulation

Markus Katona*, Klaus Trampert, Cornelius Neumann
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland
Mailadresse*: markus.katona@kit.edu

Christian Schwanengel
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau, Deutschland

Zusammenfassung

Die Lichtstärkeverteilungskurve einer Lichtquelle (LVK) wird klassischerweise mit einem Goniophotometer gemessen. Dafür wird die LVK der Lichtquelle in großer Entfernung mit einem Photometer abgetastet. Durch die punktuelle Abtastung des Winkelraums ist die Messauflösung direkt mit dem Zeitbedarf gekoppelt. Als Alternative hierzu hat sich die LVK Messung mit bildgebenden Empfängern entwickelt, bei der ein großer Ausschnitt der LVK mit nur einer Messung aufgenommen wird. In Kombination mit einem Goniometer ist es durch Mehrfachaufnahmen möglich die vollständige LVK der Lichtquelle zu bestimmen. So kann bei deutlich geringerem Zeitbedarf die LVK mit sehr hoher Winkelauflösung erfasst werden.

Für eine Sensitivitätsanalyse ist eine photometrische wie auch geometrische Modellierung des Systems notwendig. Dieser Beitrag behandelt die Aufstellung der geometrischen Systembeschreibung der bildgebenden LVK-Messtechnik mithilfe kinematischer Transformationen. Durch die Methode der Monte-Carlo-Simulation kann der Einfluss der Unsicherheitsparameter der geometrischen Eingangsgrößen auf das Gesamtergebnis einer Messung analysiert und in Form einer Winkel- und Distanzunsicherheit ausgegeben werden. Diese können als Grundlage für eine spätere Messunsicherheitsbetrachtung des Gesamtsystems verstanden werden.

Index Terms: Goniophotometer, Fernfeld, Leuchtdichtemesskamera, geometrische Systembeschreibung, Kinematik

1 Einleitung und Grundlagen

Die Lichtstärke I beschreibt den Teillichtstrom $d\Phi$ der in einen infinitesimalen Raumwinkelbereich $d\Omega$ emittiert wird.

$$I(\varphi, \vartheta) = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad [cd] \quad (1.1)$$



Sie ist eine abstandsunabhängige Größe und gibt als Funktion über zwei Raumwinkel (φ, ϑ) die Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) an. Voraussetzung hierfür ist die Annahme einer Punktlichtquelle [1]. Da keine reale Lichtquelle eine Punktlichtquelle ist, ist die Lichtstärke eine rein theoretisch definierte Größe und für reale Lichtquellen nur in unendlich großem Abstand eindeutig bestimmt. Um Sie dennoch messtechnisch zu erfassen, wird eine Mindestmessentfernung vorausgesetzt, ab der sich der Detektor im Fernfeld befindet und somit die Ausdehnung der Lichtquelle vernachlässigt werden kann. Diese Entfernung wird als photometrische Grenzentfernung bezeichnet und ist abhängig von der Ausdehnung, wie auch vom Abstrahlverhalten der Lichtquelle [2,3]. Ist die Annahme einer Punktlichtquelle gerechtfertigt, kann mit dem photometrischen Entfernungsgesetz über den Messabstand r die Lichtstärke berechnet werden [1]:

$$I = \frac{E \cdot r^2}{\cos(\alpha)\Omega_0} \quad (1.2)$$

E ist die vom Detektor erfasste Beleuchtungsstärke, und α die Ausrichtung des Detektors zur Lichtquelle. Um Messergebnisse vergleichbar zu halten, ist die zu verwendende Messentfernung in vielen Normen eindeutig festgelegt.

Um den vollständigen Winkelraum zu erfassen wird zur Aufnahme einer Verteilungskurve ein Goniometer verwendet.

1.1 Direkte und indirekte LVK- Messmethode am Beispiel des KFZ-Goniophotometer

Die LVK-Messung lässt sich grundsätzlich in eine direkte- und indirekte LVK Messmethode unterscheiden. Bei der direkten Messmethode wird das direkt auf einen Detektor einfallende Licht erfasst, während bei der indirekten Messmethode eine diffus reflektierende Oberfläche von der Lichtquelle bestrahlt und gleichzeitig von einem Detektor erfasst wird. Während bei der direkten LVK Messtechnik ein Photometerkopf verwendet wird, kann für die indirekte LVK Messtechnik eine orts aufgelöste Kamera verwendet werden. Durch die Wahl einer großen diffus reflektierenden Oberfläche ergibt sich somit die simultane Messung vieler Stützstellen der LVK mit nur einem einzigen Kamerabildeinzug. Die beiden Messmethoden sind bereits in der Literatur beschrieben [4,5,6], daher soll im Folgenden nur kurz auf die beiden Messsysteme eingegangen werden. Dies geschieht anhand des zur Verfügung stehenden Messsystems (vgl. Abbildung 1).

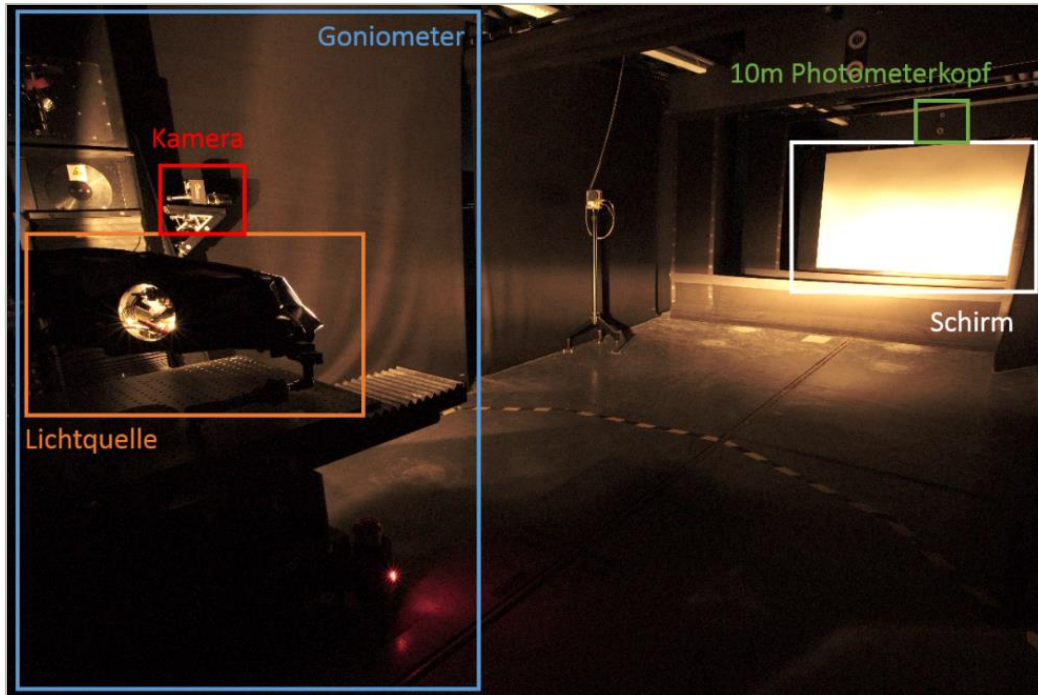


Abbildung 1: Messraum im LTI mit direkter- und indirekter LVK Messmethode

Der in Abbildung 1 gezeigte Messraum im Lichttechnischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie besteht aus dem LMT G-OH1660 Typ-A Goniometer von der Firma LMT das mit einem Photometer in 5 m, 10 m und 25 m Entfernung ausgestattet ist. Das Goniometer besitzt einen Lineartisch zur Ausrichtung der Lichtquelle sowie zwei Achsen (H- und V-Achse) um die Lichtquelle in jede Raumrichtung rotieren zu können. Diese Komponenten werden zur direkten LVK-Messtechnik verwendet. Zusätzlich wurde der Messraum mit einer LMK5-Color Kamera der Firma TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, einem weiß, lambertsch reflektierenden Schirm in 10 m Entfernung sowie einem Blendensystem ausgestattet. Beide Messmethoden wurden von den Firmen hinsichtlich des aktuellen Standes der Technik kalibriert und können zur LVK Messung verwendet werden. Mit beiden Messmethoden kann eine vollständige LVK aufgenommen werden.

1.2 Geometrische Beziehungen der Messsysteme

Für die Sensitivitätsanalyse eines Messsystems ist nach GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) die Aufstellung eines mathematischen Modells notwendig. Anschließend kann anhand der einzelnen Sensitivitäten der Eingangsgrößen eine Aussage über deren Einfluss auf die Gesamtunsicherheit getroffen werden. Da sich die Lichtstärke entsprechend ihrer Definition in ihren geometrischen Fluss G , sowie ihre transportierte photometrische Komponente aufteilen lässt ist es sinnvoll diese beiden Komponenten separat voneinander zu betrachten. In diesem Beitrag soll nur die geometrische Systembeschreibung betrachtet werden.

1.3 Kinematik in der Robotik

Die Kinematik ist die Lehre der Bewegungen. In der Robotik stellt sie für ein gegebenes Bewegungssystem den Zusammenhang zwischen den einstellbaren beweglichen Teilen und der Position des Roboters her. Es kann jedes Bewegungssystem mathematisch aus einer Kette von festen und freien Translationen t und Rotationen R beschrieben werden, die in Transformationen T zusammengefasst werden. Eine Transformation T_i beschreibt die Überführung eines Koordinatensystems X_i in das Koordinatensystem X_{i+1}

$$X_{i+1} = T_i * X_i \quad (1.3)$$

Die Transformationsvorschrift aus homogenen Koordinaten setzt sich dabei wie folgt zusammen:

$$T_i = \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R(\theta_x, \theta_y, \theta_z) & t(x, y, z) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Wobei für R die Rotationsreihenfolge $x \rightarrow y \rightarrow z$ gewählt wurde:

$$R(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = R_{rot,z}(\theta_z)R_{rot,y}(\theta_y)R_{rot,x}(\theta_x) \quad (1.5)$$

θ_x , θ_y und θ_z sind die positiv definierten Rotationswinkel um die Achsen x, y und z der Koordinatensysteme. Daraus ergibt sich die Transformationsmatrix für ein Systemglied mit den Koeffizienten r_{ij} der Rotationsmatrix zu:

$$T_i = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Die Gesamttransformationskette ist multiplikativ, d.h. um bei n hintereinander geschalteten Transformationen das Koordinatensystem X_0 in das Koordinatensystem X_n zu überführen kann folgende Vorschrift verwendet werden:

$$T_{ges} = T_{n-1 \rightarrow n} * \dots * T_{1 \rightarrow 2} * T_{0 \rightarrow 1} \quad (1.7)$$

Abbildung 2 zeigt eine kinematische Kette.

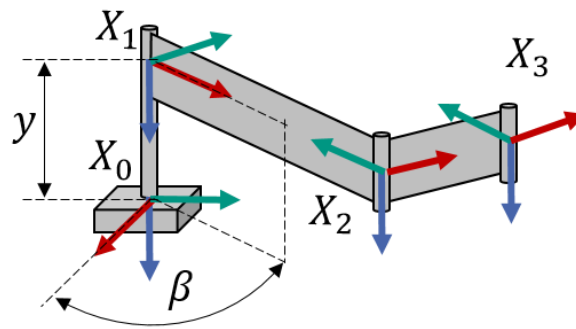


Abbildung 2: Transformationskette eines Roboterarms

Eine besondere Form der Beschreibung der einzelnen Koordinatensysteme, die häufig in der Robotik verwendet wird, stellt die Denavit-Hartenberg-Transformation dar. Ihr liegen die folgenden Eigenschaften zugrunde:

- Die z_{i-1} -Achse ist die Rotationsachse des n -ten Gelenks.
- Die x_i -Achse ist das Kreuzprodukt von z_{i-1} und z_i .
- Mit der y_i -Achse ergibt sich ein rechtshändiges Koordinatensystem.

Da bei dieser Systemaufstellung kein Roboterarm nachgebaut werden muss, die Drehkoordinatensysteme ineinander liegen und viele der Koordinaten ortsfest sind, reicht die Definition freier Koordinatensysteme, die sich entsprechend der Transformationen $T_i(\theta_x, \theta_y, \theta_z, x, y, z)$ ineinander überführen lassen.

2 Systembeschreibung des bildgebenden LVK-Messsystems

Für die geometrische Systembeschreibung des bildgebenden LVK-Messsystems wird der Bildgeber, d.h. die Kamera, nicht mitbetrachtet. Dies hat den Hintergrund, dass der Schirm als Detektorebene aufgefasst werden kann und immer ortsfest verbleibt. Zur späteren Systemanalyse wird dann eine Lasermatrix simuliert, die auf das Goniometer aufgebracht wird und ein 9 Punktemuster auf den Schirm wirft. Auch bei einer simulierten HV-Drehung des Goniometers wird ein Punktemuster verwendet, das entsprechend Abbildung 4 jeweils einen zentralen Laserpunkt mit seiner 8er Nachbarschaft auf dem Schirm darstellt. Eine weitere Annahme, die dem System zugrunde gelegt wird, ist ein ebener Schirm. Dadurch setzt sich entsprechend Abbildung 3 das System aus den folgenden Koordinatensystemen zusammen: Dem Weltkoordinatensystem X_W , dem Schirmkoordinatensystem X_S , dem Koordinatensystem der Goniometer V-Achse X_V , dem Koordinatensystem der Goniometer H-Achse X_H und dem Koordinatensystem des Lasers X_L .

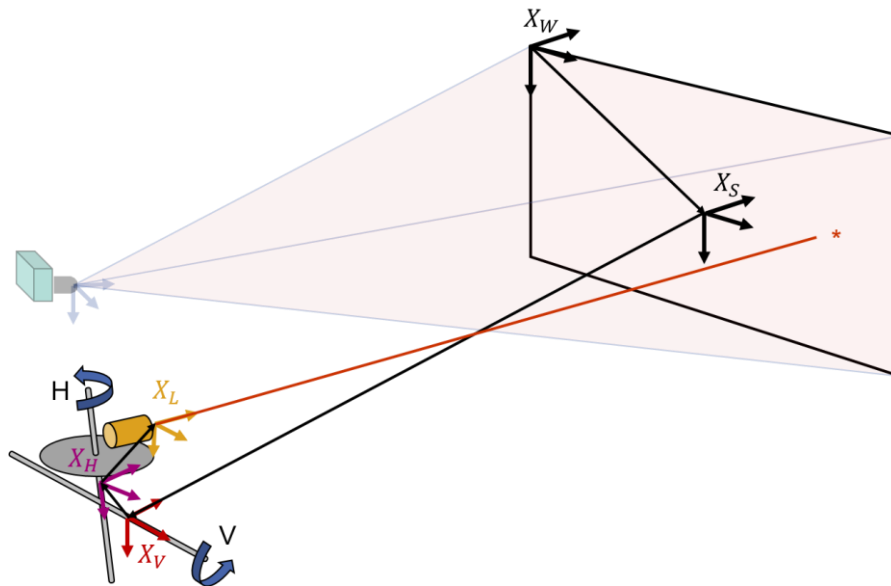


Abbildung 3: Für die geometrische Kalibrierung wichtige Systemkomponenten und ihre Koordinatensysteme.

Um die Pose des Koordinatensystems des Lasers entsprechend seiner Unsicherheitsparameter und entsprechend der horizontalen und vertikalen Drehung des Goniometers im Raum zu bestimmen wird folgende Transformationsvorschrift verwendet

$$T_{ges} = T_{Schirm} * T_{V,pose} * T_{V,aktion} * T_{H,pose} * T_{H,aktion} * T_{Laser} \quad (2.1)$$

Sie setzt sich aus den in Tabelle 1 dargestellten Transformationen zusammen. Während Laser-, Schirm- und Weltkoordinatensystem den in Abbildung 3 dargestellten Koordinatensystemen entsprechen, teilen sich die Koordinatensysteme der Goniometer Achsen in einen „Aktion“ und einen „Pose“-Teil auf. Der „Pose“-Teil entspricht der Lage des Koordinatensystems für die Drehwinkel $H, V = 0^\circ$, wohingegen der „Aktion“-Teil der durchgeführten Rotation um diese Achse entspricht. Des Weiteren wurden die Transformationen auf relevante Freiheitsgrade reduziert. Die „Aktionen“ der H- bzw. V-Achse wurde auf die Rotation um eine Achse beschränkt. Für die Schiefelage der beiden Achsen zueinander ($T_{H,pose}$) ist nur die Rotation um eine Achse relevant, da die anderen beiden Rotationen bereits von anderen Freiheitsgraden abgedeckt werden. Genauso ist es ausreichend für $T_{V,pose}$ und T_{Schirm} einen Freiheitsgrad jeweils nur zu einer Transformation zuzuordnen. Eine Unterscheidung der beiden Parameter ist nur der Übersichtlichkeit halber erfolgt.

Tabelle 1: Einzel- und gesamt Transformationen der Systemaufstellung

#	Notation	Transformation	Freiheits- grade	Art	$X_i \rightarrow X_{i+1}$
	T_{ges}	Gesamte Transformationskette			$X_L \rightarrow X_W$
1	T_{Laser}	Pose des Objektkoordinatensystems gegenüber H-Achse	$R(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ $t(x, y, z)$	Fest	$X_L \rightarrow X_{H,0}$
2	$T_{H,Aktion}$	„Aktion“, Drehwinkel H-Achse	$R(\theta_y)$	Aktion	$X_{H,0} \rightarrow X_{H,Aktion}$
3	$T_{H,Pose}$	Schiefungen und Offset von H- zu V-Achse	$R(\theta_z)$ $t(x, y, z)$	Fest	$X_{H,Aktion} \rightarrow X_{V,0}$
4	$T_{V,Aktion}$	„Aktion“, Drehwinkel V-Achse	$R(\theta_x)$	Aktion	$X_{V,0} \rightarrow X_{V,Aktion}$
5	$T_{V,Pose}$	Lage und Orientierung der V-Achse zum Schirm (incl. Messabstand)	$R(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ $t(z)$	Fest	$X_{V,Aktion}$
6	T_{Schirm}	Relative Lage der Optischen Achse in der Schirmebene	$t(x, y)$	Fest	$X_S \rightarrow X_W$

2.1 Geometrische Systemanalyse mittels Simulation eines Lasers und der Monte-Carlo-Methode

Die Systemanalyse findet auf Basis der Monte-Carlo-Simulation statt. Dafür werden je nach Kalibriermethode bzw. je nach zu analysierenden Systemparametern Unsicherheiten in Form einer Standardabweichung σ der Simulation übergeben. Mit der Annahme von Normalverteilten Unsicherheitsparametern werden durch die Monte-Carlo-Simulation N Parametersätze erzeugt und im Anschluss ein 3x3 Laserpunktemuster auf dem Schirm berechnet. Die Streuung der Laserpunkte kann dann als zweidimensionale Normalverteilte Ergebnisgröße in Form einer Standardabweichung bestimmt werden. Dafür werden entsprechend Abbildung 4 die Standardabweichungen entlang der Hauptdiagonalen der Laserpunkteverteilung über eine Singulärwertzerlegung der Kovarianzmatrix bestimmt. Diese schließen mit der Laserposition des Idealsystems (System ohne unsicherheitsbehafteter Größen) einen Öffnungswinkel ein und werden als Bewertungsparameter ausgegeben. Des Weiteren wird eine Standardabweichung des Abstandsverhältnisses von den Berechnungen mit unsicherheitsbehafteten Größen zum Idealsystem angegeben.

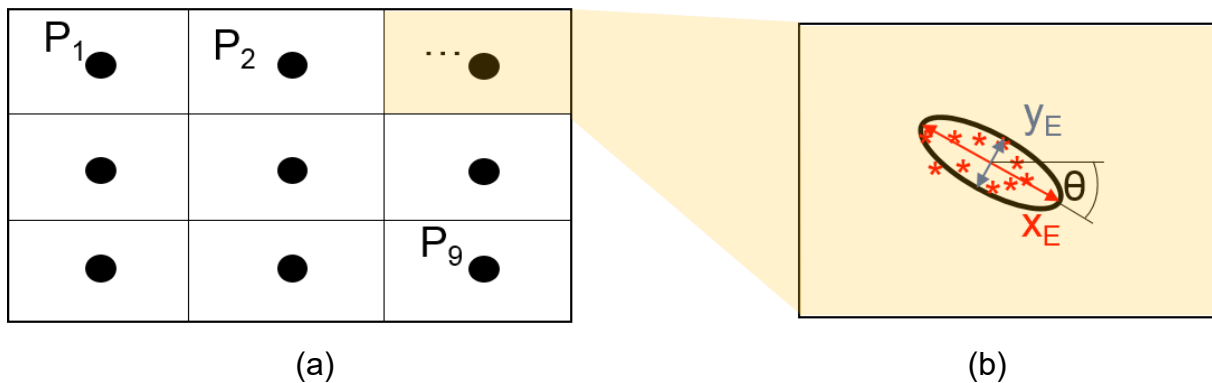


Abbildung 4: (a) Verteilung der simulierten Laserpunkte auf dem Schirm. (b) Simulationsergebnis und Bewertungsmethode der Lasersimulationen für einen Bewertungspunkt.

2.2 Geometrische Kalibriermethoden

Das System kann geometrisch auf zwei verschiedene Arten kalibriert werden, die jeweils in der geometrischen Systemanalyse unterschiedlich betrachtet werden müssen. Die erste Kalibriermethode funktioniert über eine vollständige geometrische Analyse der Systemparameter. Dafür müssen die geometrischen Beziehungen zwischen Schirm, Kamera und Goniometer erfasst werden. Dies kann über Messmethoden wie Lasertrackermessungen durchgeführt werden, die zwar hoch präzise allerdings sehr zeit- und kostenaufwändig sind. Außerdem können photogrammetrische Methoden, wie in [5] beschrieben, angewandt werden. Diese erfordern aber einerseits ein hohes Maß an Kenntnissen der softwaretechnischen Umsetzung von Bündelblockausgleichs- und Kamerakalibriermethoden. Andererseits ist die Unsicherheitsbestimmung kamerabasierter Messsysteme, wie sie an dieser Stelle zum Einsatz kommt, schwierig. Darüber hinaus muss, wenn die Annahme eines ebenen Schirms nicht gerechtfertigt ist, die Geometrie des Schirms mitbestimmt werden. Dies ist ebenfalls eine Herausforderung, da der Schirm keinerlei Strukturen aufweist bzw. diese nur am Rand angebracht werden können. Ein Vorteil dieser Methode ist die geometrische Kenntnis des Gesamtsystems. Dadurch können beispielsweise ein nicht korrekt im Drehzentrum des Goniometers platzierter Lichtschwerpunkt herausgerechnet oder andere Korrekturen durchgeführt werden.

Die zweite Kalibriermethode wird über ein Winkelnormal durchgeführt, das im Drehzentrum des Goniometers platziert wird und ein Winkelmuster auf den Schirm wirft. So werden den einzelnen Kamerapixel feste Winkelwerte zugeordnet. Hierbei liegt die geometrische Unsicherheit in der Unsicherheit des Winkelnormals, sowie die Positionierung des Winkelnormals auf dem Goniometer. Eine anschließende Korrektur des Lichtschwerpunktes ist hier nicht möglich. Durch die Systemaufstellung wird es möglich diese beiden Kalibriermethoden zu untersuchen und hinsichtlich ihrer Effektivität zu bewerten.

3 Validierung

Für die Validierung des Systemmodells werden einzelne Systemparameter entsprechend ihrer Unsicherheiten verändert während die übrigen Systemparameter festgehalten werden. Betrachtet werden dabei Systemparameter, die ein erwartetes Systemverhalten auf dem Schirm wiedergeben. Dabei wird einerseits eine visuelle Beurteilung der Ergebnisse vorgenommen, andererseits werden die Standardabweichungen der Eingangs- und Ausgangsparameter verglichen. Als Beispiel sind die Hysterese, d.h. Stellgenauigkeit der H-Achse, sowie der Messabstand aufgeführt. Abbildung 5 und Abbildung 6 geben visuell das erwartete Systemverhalten wieder. Tabelle 2 zeigt eine Übereinstimmung der Eingangs- und Ausgangssensitivitäten. Damit kann davon ausgegangen werden, dass das System funktioniert und auch überlagerte Sensitivitätsanalysen getestet werden können.

Tabelle 2: Beispielhafte Simulationsergebnisse für die Validierung des Systemmodells.

#	Trans-formation	t/R	σ Eingabe- parameter	$\sigma \left(1 - \frac{d}{d_0}\right)$	σ größte Ellipsen- achse [°]	σ kleinste Ellipsen- achse [°]
1	$T_{H,Aktion}$	R	0,0043°	0,00001	0,00428	0,00000
8	$T_{V,Pose}$	t	2 mm	0,00020	0,00100	0,00000

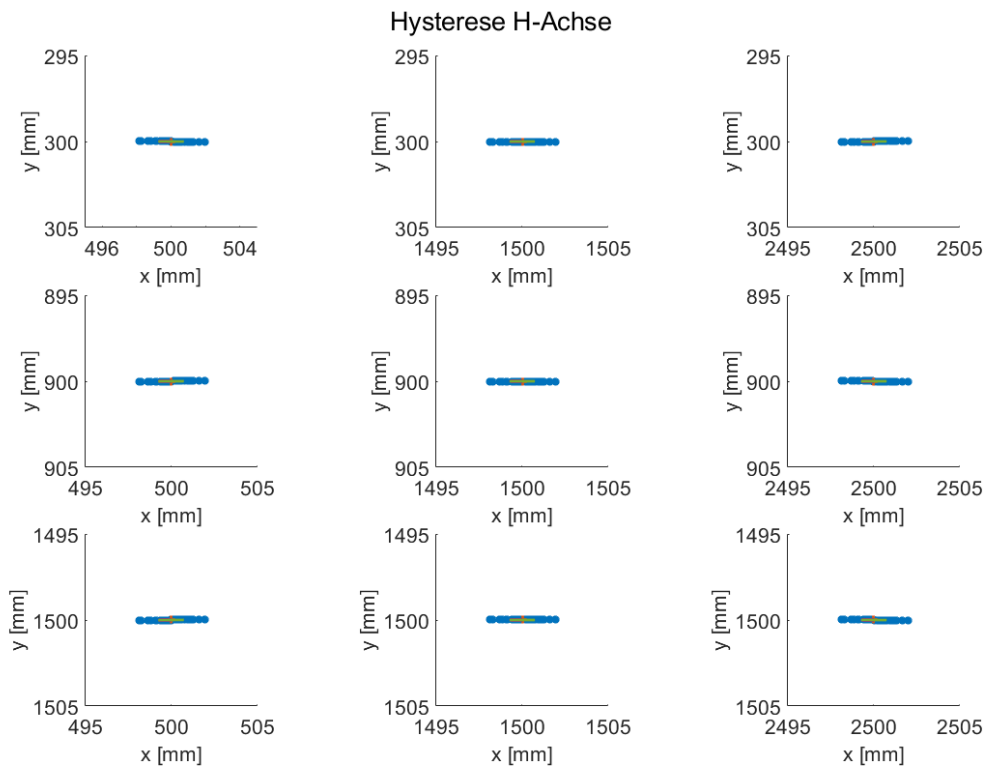


Abbildung 5: Validierungsergebnisse der Hysterese der H-Achse.

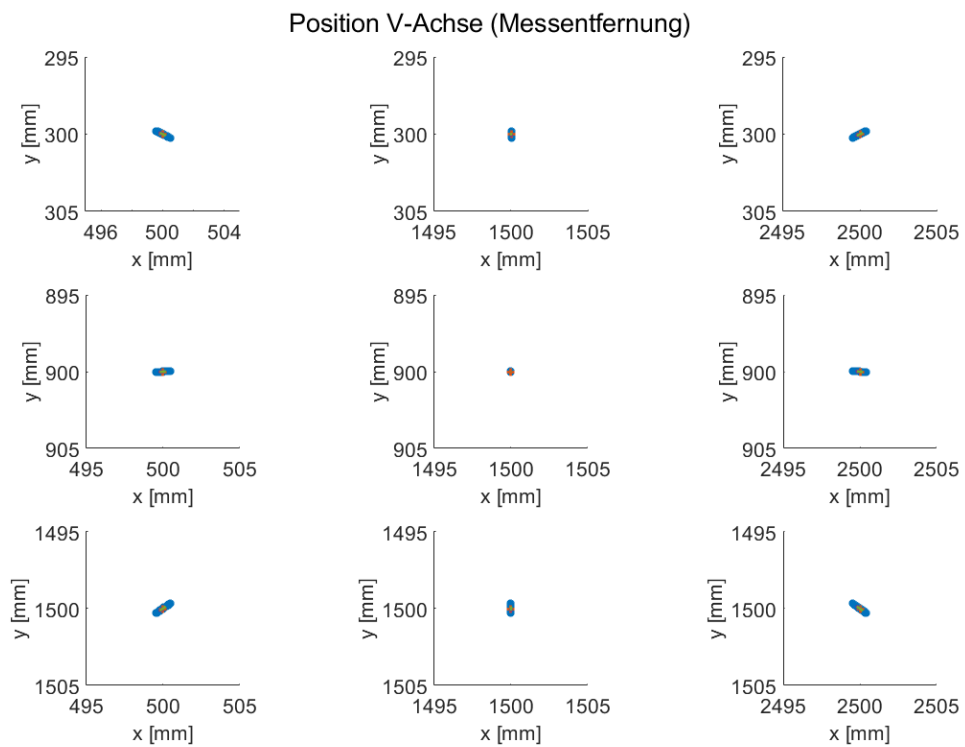


Abbildung 6: Validierungsergebnisse der Messentfernung.

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der ersten Untersuchung dargestellt. Hierbei wird das Gesamtsystem bewertet und die einzelnen Parameter simuliert, nicht jedoch eine Unterscheidung zwischen den Kalibriermethoden getroffen. Genauso wenig ist diese Untersuchung dazu geeignet Aussagen über eine Messung treffen zu können. Dazu müssen weitere Simulationen durchgeführt werden, die im Abschnitt Ausblick aufgeführt sind.

4.1 Parameterbestimmung

Für jeden Freiheitsgrad muss ein Wert sowie eine Sensitivität angegeben werden. Diese Sensitivitäten wurden entweder aus Literaturwerten übernommen oder versucht mit händischen Methoden zu bestimmen. Für die Laserposition sowie die Laserorientierung (T_{Laser}) wurde geschätzt wie genau sich ein Objekt im Goniometerdrehzentrum platzieren lässt. Natürlich muss davon ausgegangen werden, dass eine Quelle mit undefiniertem Lichtschwerpunkt wie es beispielsweise bei Leuchten mit Optiken der Fall ist [3,7], deutlich unpräziser platziert werden können als ein Geometrienormal. Die Hysterese der H- bzw. V-Achse ($T_{H,\text{Aktion}}$, $T_{V,\text{Aktion}}$) wurde bewertet, indem mit einem Laser dieselben Punkte aus unterschiedlichen Richtungen angefahren wurden. Natürlich muss hier auch die absolute Präzision des Goniometers mitberücksichtigt werden. Tests für eine solche Parameterbestimmung stehen noch aus. Die Achslage sowie die Orientierung der Achsen zueinander muss ebenfalls noch überprüft werden. Hierzu werden Methoden verwendet, bei denen kameragestützt Kreise und Kugeln auf dem Goniometer beobachtet werden, während das Goniometer um die eigenen Achsen bewegt wird. Die Distanz zum Schirm kann per Laserentfernungsmessgerät bestimmt werden. Diese Messgeräte haben eine gängige Toleranz von 1 mm.

Weiterhin sind photogrammetrische Methoden denkbar um die Systemparameter zu bestimmen. Eine Sinnhaftigkeit dieser Methoden soll in nachfolgenden Untersuchungen noch überprüft werden. Außerdem soll Raum und Goniometer mit einem Lasertracker vermessen werden um Referenzwerte für die Untersuchungen der Geometrie des Systems zu erhalten.

4.2 Systemanalyse

Tabelle 3 listet die verwendeten Systemparameter inklusive ihrer Sensitivitätsparameter auf und stellt sie mit den ermittelten Unsicherheiten in Beziehung. Dafür wurde jede Größe unabhängig simuliert. Die oberste Zeile der Tabelle gibt die Gesamtunsicherheit wieder, so kann der Betrag jeder einzelnen Variable zur Unsicherheit des Gesamtsystems abgeschätzt werden. Natürlich ist hier zu beachten, dass einige Sensitivitäten nur geschätzt wurden. Dadurch ist auch das Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße ein bewertungstechnisch interessanter Wert. Abbildung 7 zeigt die Fehlerellipsen der 3x3 Laserpunktmatrix für

die Gesamtunsicherheit. In Abbildung 8 sind die Anordnung der Laserpunkte bezogen auf den Schirm, sowie die Legende der Ergebnisabbildungen zu sehen.

Zu erkennen ist, dass die Rotationsunsicherheiten wie Laserorientierung (T_{Laser}), Hysterese ($T_{H,Aktion}$, $T_{V,Aktion}$), Verdrehung des Goniometers gegenüber dem Schirm ($T_{V,Pose}$) oder die Unsicherheit der Lasermatrix ($T_{Lasermatrix}$) einen 1:1 Einfluss auf die Ausgangsgröße haben. Genauso ist dieser 1:1 Einfluss im Abstandsverhältnis für Translationsunsicherheiten in z-Richtung wiederzufinden. Als betragsmäßig am Einflussreichsten ist für den aktuell angenommenen Parametersatz die Laserpositionierung und Orientierung sowie der Messabstand.

Tabelle 3: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt als Standardabweichungen σ .

#	Transformation	t/R	[x,y,z] in [mm] bzw. [$\theta_x, \theta_y, \theta_z$] in [°]	σ Eingabe- parameter [mm] oder [°]	σ $\left(1 - \frac{d}{d_0}\right)$	σ größte Ellipsen- achse [°]	σ kleinste Ellipsen- achse [°]
1	T_{ges}				0,00023	0,01441	0,01429
2	T_{Laser}	t	[0 0 0] mm	[1 1 1] mm	0,00010	0,00576	0,00571
3	T_{Laser}	R	[0 0 0] °	[0,01 0,01 0] °	0,00002	0,01004	0,01000
4	$T_{H,Aktion}$	R	[0 0 0] °	[0 0,0043 0] °	0,00001	0,00428	0,00000
5	$T_{H,Pose}$	t	[0 0 0] mm	[0,1 0,1 0,1] mm	0,00001	0,00058	0,00057
6	$T_{H,Pose}$	R	[0 0 0] °	[0 0 1/200] °	0,00000	0,00044	0,00000
7	$T_{V,Aktion}$	R	[0 0 0] °	[0,0036 0 0] °	0,00000	0,00360	0,00000
8	$T_{V,Pose}$	t	[0 0 10000] mm	[0 0 2] mm	0,00020	0,00100	0,00000
9	$T_{V,Pose}$	R	[0 0 0] °	[1/200 1/200 0] °	0,00001	0,00505	0,00497
10	T_{Schirm}	t	[1500 800] mm	[1 1 0] mm	0,00000	0,00580	0,00573
11	$T_{Lasermatrix}$	φ, ϑ	3x3-Matrix	[1/2000 1/2000 0]°	0,00000	0,00051	0,00050

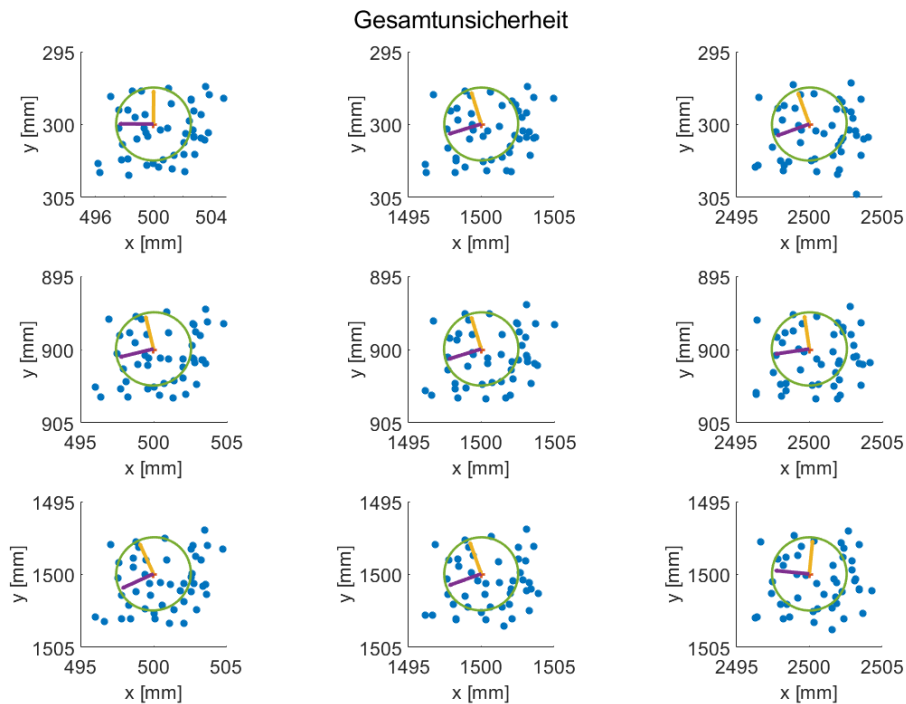


Abbildung 7: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse.

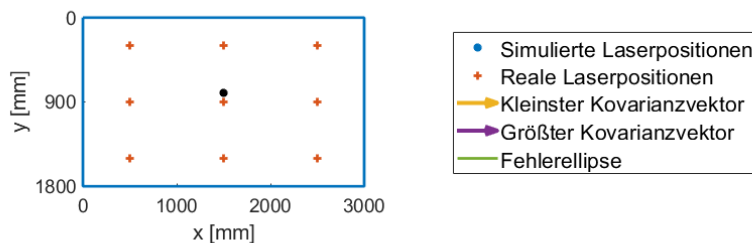


Abbildung 8: Darstellung der Laserpunkte auf dem Schirm und der Legende für die visuelle Ergebnisanalyse.

4.3 Grenzen des Systems

Ein Modell entspricht auf Grund getroffener Annahmen nie der Realität. Für das aktuelle Modell wurde angenommen, dass der Schirm eine ebene Fläche ist. Dies erleichtert die Simulation deutlich. Außerdem lässt sich die Schirmunebenheit auch über eine Unsicherheit der Messentfernung beschreiben. Eine weitere sehr einflussreiche Größe, die besonders die photometrische Betrachtungsweise betrifft, ist die photometrische Grenzentfernung. Diese ist für sehr engbündelnde Strahler laut [2] und [3] in 10 m Entfernung noch nicht erreicht. Über die Verwendung von \cos^n -strahlenden Punktlichtquellen im Simulationsmodell kann dieser Einfluss

näherungsweise mitsimuliert werden. Weiterhin wird ein Taumeln der H,V-Achsen als vernachlässigbar angenommen und findet, wie auch der Einfluss der Gravitation, keine Berücksichtigung.

5 Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Systemmodell für eine bildgebende LVK Messtechnik vorgestellt, das zur Sensitivitätsanalyse verwendet werden kann. In einer ersten Analyse hat sich deutlich gezeigt, dass sich so der Einfluss der einzelnen Sensitivitätsparameter auf das Gesamtergebnis rekonstruieren lässt und anhand ermittelter Unsicherheitsparametern eine Unsicherheit der geometrischen Systemkomponenten angegeben werden kann. In einem nachfolgenden Schritt ist daher die Bestimmung aller Sensitivitätsparameter mittels händischer Methoden, photogrammetrischer Methoden und mittels Lasertracker bestmöglich durchzuführen. Darauf aufbauend können dann, die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Kalibriermethoden verglichen und Messungen simuliert werden. Des Weiteren soll der Vorteil der photogrammetrischen Kalibriermethode überprüft werden, ob hier ein Herausrechnen des tatsächlichen Lichtschwerpunktes möglich ist.

Außerdem muss das Systemmodell um die photometrische Systemkomponente erweitert werden. Diese berücksichtigt die photometrische Grenzentfernung, das Abstrahlverhalten der Lichtquelle wie auch das Reflexionsverhalten des Schirms. Weiter sollen Methoden entwickelt werden, die den Einfluss des Raumstreulichts, wie auch des Kamerastruereichts bestimmen und verkleinern können.

6 References

- [1] O. Reeb, Grundlagen der Photometrie, Verlag G. Braun Karlsruhe, 1962.
- [2] V. Jacobs et al., Analyses of Errors Associated with Photometric Distance in Goniophotometry, 2015.
- [3] M. Katona, I. Rotscholl, K. Trampert, C. Neumann, Determination of errors associated with the far field assumption in light distribution measurements using near field data, AMCTM 2017, Glasgow.
- [4] Dipl.-Ing. C. Schwanengel, Das Beste aus zwei Welten – Kombination von Goniophotometrie und digitaler Bildverarbeitung, LICHT 2016.
- [5] M. Katona, J. Fessler, L. Sayanca, K. Trampert, C. Neumann, C. Schwanengel - Geometrische Kalibrierungsmethode einer kamerabasierten Goniometermesstechnik für hochaufgelöste Lichtstärkeverteilungen im Fernfeld. Davos, LICHT 2018.
- [6] I. L. Sayanca, K. Trampert and C. Neumann, Indirect Light Intensity Distribution Measurement using ImageMerging, AMCTM2017, Glasgow.
- [7] Simon Wendel, S. Lück, C. Neumann. Constructing multiple focal points using rayfiles. Lux junior, Ilmenau 2011.

Analyse von Digitalkameras im Infrarotbereich für die 3D-Rekonstruktion von Personen

Marina Leontopoulos

Technische Universität Berlin

Abstract

Einer der wichtigsten Aspekte bei Virtual Reality-Inhalten ist die Immersion. Gerade bei Darstellungen von Personen ist der menschliche VR-Betrachter in der Lage kleinste Ungereimtheiten ausfindig zu machen. Im Gegensatz zum *Computer Graphics*-Ansatz wird beim volumetrischen Video keine Figur per Computer generiert, die einen echten Menschen nachbilden soll. Stattdessen wird eine reale Person in *Volumetric Video Studios* mit 32 Kameras gleichzeitig aufgenommen und anschließend zu mehreren 3D-Modellen rekonstruiert. Diese 3D-Modelle lassen sich danach in eine VR-Umgebung einfügen und als begehbarer Film betrachten.

Um die Qualität der Rekonstruktionen weiter zu verbessern, wurde untersucht, inwiefern sich infrarote und rote Strahlung nutzen lassen, um auf glatter Haut Muster zu erzeugen. Zudem wurde ein Messkörper entwickelt und aufgebaut, der einem menschlichen Kopf in seiner Form, Struktur sowie seinen spektralen Reflexionseigenschaften nachempfunden ist.

1 Einleitung

Es existieren zwei *Volumetric Video Studios*, die aus der Forschung des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Instituts entstanden sind. Bei ihnen handelt es sich um Rotunden aus diffus hinterleuchtetem Material von fünf bis sechs Metern Durchmesser, auf deren Zentren 32 Videokameras gerichtet sind. Aus den aufgenommenen 25 Bildern pro Sekunde in 5K werden anschließend für jeden Zeitabschnitt aus den 32 Kameraperspektiven automatisch Pixelkorrespondenzen ermittelt, aus denen schließlich 3D-Modelle einer Person erzeugt werden. Auf diesem Weg entsteht eine 3D-Modellsequenz, die in einer beliebigen virtuellen Umgebung eingebettet als volumetrisches Video abgespielt werden kann.

Problemstellung

Dadurch, dass die Anzahl der verwendeten Kameras im Vergleich zu 3D-Scan-Studios deutlich geringer sein muss, um die anfallenden Datenströme der Videos verarbeiten zu können (ca. 1 TB/min), ist der erreichbare Detailreichtum eingeschränkt. Für den Zuschauer macht sich dies bei genauem Hinsehen u.a. durch fehlende scharfe Kanten am Übergang zwischen Mund und Nase bemerkbar. Auch



die Rekonstruktion von glatter Haut stellt eine Herausforderung dar, weil es bei strukturlosen Oberflächen kaum möglich ist, Pixelkorrespondenzen zu erkennen.

Methodik

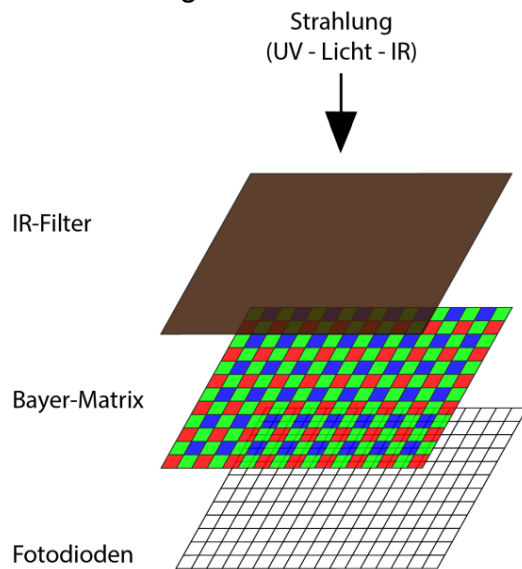
In dieser Arbeit wurden daher Verfahren untersucht, die die Rekonstruktionsqualität von Gesichtern verbessern. Dabei soll anders als in zahlreichen Untersuchungen, die sich mit der Optimierung der Algorithmen von 3D-Rekonstruktionsverfahren beschäftigen, ein neuer Weg gezeigt werden, der sich ausschließlich mit Anpassungen des Quellmaterials befasst, bevor es überhaupt für die Rekonstruktion eingesetzt wird. Die Eigenschaften von Kamerasensoren in Bezug auf ihre Interpretation von Strahlung wurden hierfür als Grundlage gewählt, wobei besonderes Augenmerk auf den Infrarotbereich gelegt wurde. Die Informationen aus den Bereichen roter und infraroter Strahlung wurden genutzt, um auf glatter Haut tiefere Strukturen hervorzuheben.

Konkret wurden dafür

- 1) die Sensoren von drei Kameras unterschiedlicher Kategorien spektral vermessen und darauf aufbauend die Farbörter bestimmt, in die infrarote Strahlung im sRGB-Farbraum abgebildet wird. Diese wurden in infrarotbehaftetem Bildmaterial detektiert und ihre Helligkeit reduziert, wodurch Muster auf der Haut sichtbar wurden.
- 2) ein Messkörper für die Validierung verschiedener Beleuchtungssituationen im Studio hergestellt, der anstelle eines Menschen aufgenommen und rekonstruiert werden kann. Für die Gestaltung der Oberfläche wurden die spektralen Reflexionseigenschaften von menschlicher Haut betrachtet und mehrere Lederproben auf ihre Ähnlichkeit hin untersucht.

2 Vermessung der Kamerasensoren

Bei einer Digitalkamera dienen Fotodioden als Empfänger von Licht. Dabei wird pro



Diode ein Pixel im späteren Bild gewonnen. Da diese Empfänger von sich aus lediglich Schwarzweißbilder erzeugen können, werden Kamerasensoren mit einer sog. Bayer-Matrix versehen – einer Matrix auf roten, grünen und blauen Filtern (siehe Abbildung 1). Folglich entstehen dabei drei Bilder, die jeweils in ihrer Auflösung deutlich unterhalb der gesamten Sensor-Auflösung liegen. Auch unterscheiden sich die einzelnen Pixel leicht von ihrer Position. Um ein Farbbild zu erzeugen, muss daher aus den drei Teilbildern ein Gesamtbild geschätzt werden. Diesen Vorgang nennt man

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Bayer-Sensors

auch *debayering*. Die Bayerfilter sind allerdings durchlässig für infrarote Strahlung, weshalb ein zusätzlicher Infrarotsperfilter

eingesetzt werden muss, um die Farbinterpretation der Kamera nicht zu verfälschen.

Am empfindlichsten sind Digitalkameras zwischen ca. 400 nm und 1000 nm (ohne Infrarotsperfilter) bzw. 400 nm und 700 nm (mit Infrarotsperfilter). Die Gewichtung der Kanalhelligkeiten hängt dabei von der spektralen Empfindlichkeit des Sensors sowie der Umsetzung des Sensormaterials in ein Bild in einem konkreten Farbraum ab. Als Farbraum wurde der im Workflow des Volumetric Video Studios eingesetzte sRGB-Farbraum gewählt.

Während sich gängige Messverfahren für die Qualität von Kamerasensoren stets am menschlichen Auge als Referenz orientieren, interessiert hier lediglich, wie Wellenlängen in Farbörter umgesetzt werden.

Die Sensoren wurden hierzu schmalbandig gefilterter Strahlung ausgesetzt und dabei Bilder aufgenommen.

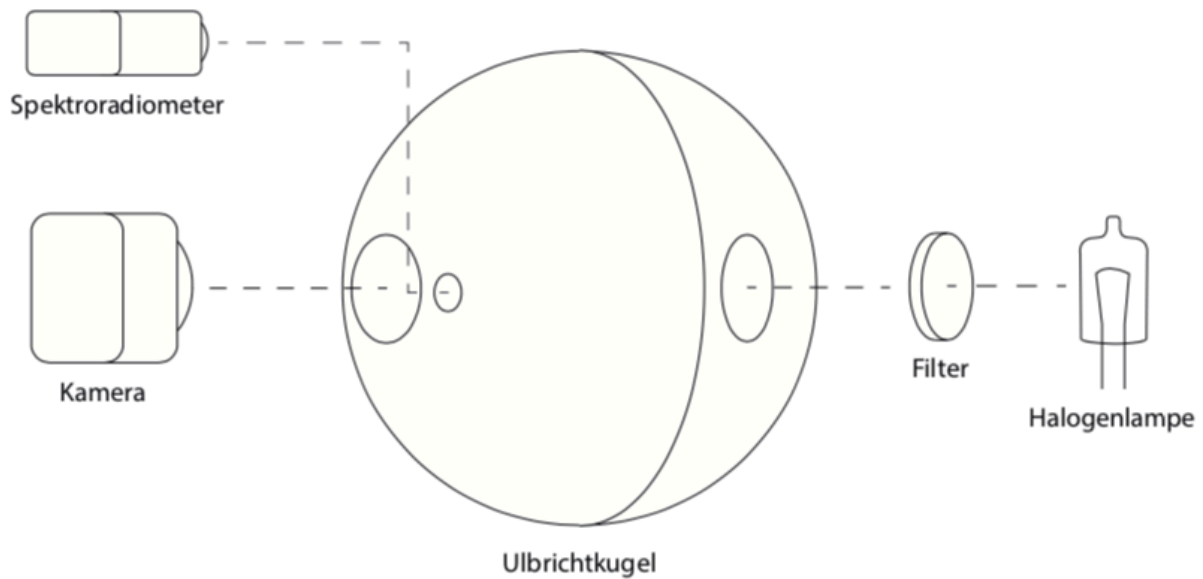


Abbildung 2: Blockdiagramm des Messaufbaus

Der Messaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Dabei wurde ein Temperaturstrahler als Lichtquelle eingesetzt, dessen Spektrum durch wechselbare Interferenzfilter im Bereich von 350 nm bis 1100 nm angepasst wurde, was dem messbaren Bereich des verwendeten Spektroradiometers entspricht.

Bei den drei vermessenen Kameras handelt es sich um folgende Modelle:

- Ximea CB200CG-CM (Industriekamera ohne Infrarotsperfilter)
- Panasonic AU-EVA1 (Cinecam mit entfernbarem Infrarotsperfilter)
- Canon EOS 5D Mk III (DSLR)

Bei Ersterer handelt es sich um das Modell, das in den *Volumetric Video Studios* zum Einsatz kommt.

Die aufgenommenen Bilder von jeder der drei Kameras wurden entsprechend ihrer Eigenheiten vorverarbeitet und in 8-Bit TIFF-Einzelbilder im sRGB-Farbraum konvertiert sowie anschließend in Normfarbwerte umgerechnet. Dadurch konnte der Zusammenhang zwischen den Wellenlängen einer Lichtquelle und ihren korrespondierenden Farbörtern im Bildmaterial hergestellt werden.

Folgende Messwerte (Abbildung 3 bis Abbildung 5) konnten dabei ermittelt und in die CIE-Normfarbtafel eingefügt werden. Dabei unterscheiden sich die drei vermessenen Kameras deutlich in Bezug auf ihre Interpretation von monochromatischem Licht im sRGB-Farbraum.

Auswertung

Damit der sRGB-Farbraum vollständig genutzt werden kann, muss monochromatisches Licht (schwarze Kreise) stets auf dem Rand des aufgespannten Dreiecks abgebildet werden. Ist dies nicht der Fall, wie bei Abbildung 3 für die im *Volumetric Video Studio* verwendete Ximea CB200CG-CM zu erkennen, weist der

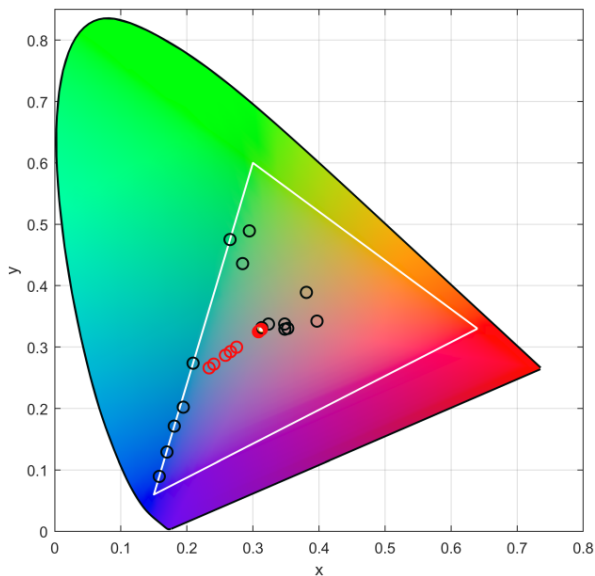


Abbildung 3: Ximea CB200CG-CM
Messpunkte innerhalb der CIE-
Normfarbtafel

Sensor keine ausreichende Kanaltrennung auf. Infrarote Strahlung hingegen ist kein Teil des sichtbaren Lichts und wird von Kamerasensoren i.d.R. als Farbmischung interpretiert, da alle Filter der Bayer-Matrix infrarotdurchlässig sind. Ein Infrarotsperrfilter sperrt allerdings bereits im sichtbaren Bereich, weshalb Kameras ohne Filter generell eine schlechtere Kanaltrennung aufweisen, wie auch beim Vergleich von Abbildung 4 links und rechts zu sehen.

Bei der Panasonic AU-EVA1 lässt sich der Einfluss des Infrarotsperrfilters näher betrachten.

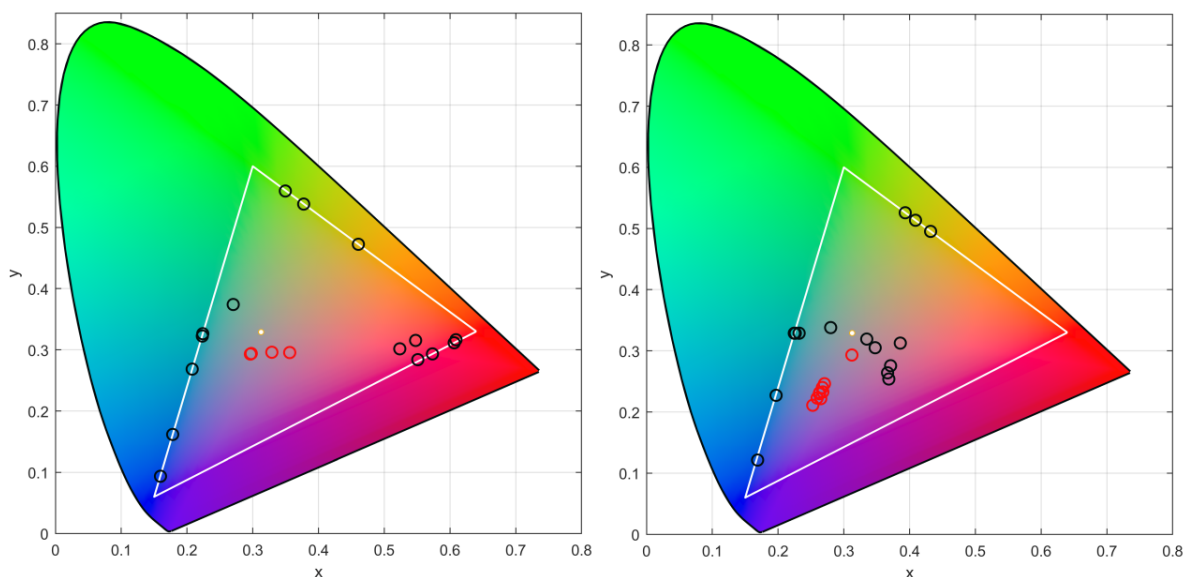
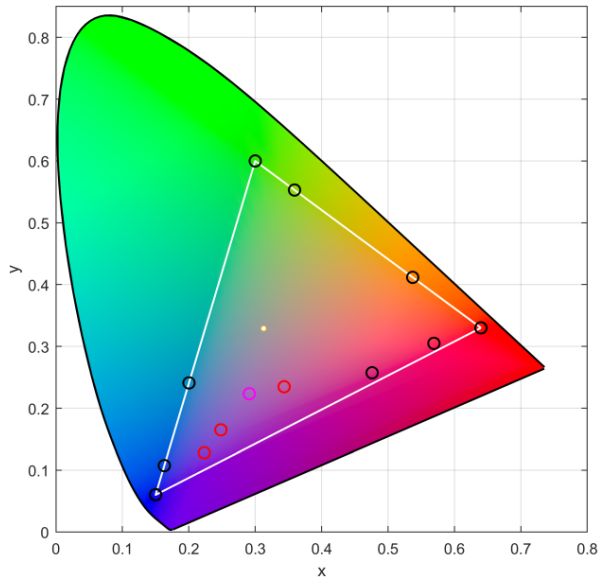


Abbildung 4: Panasonic AU-EVA1 Messpunkte innerhalb der CIE-Normfarbtafel
(links mit Infrarotsperfilter, rechts ohne Infrarotsperfilter)

Während sich bei aktivem Sperrfilter die Kanaltrennung bis auf geringe Abweichungen wie gewünscht verhält (Abbildung 4 links), sind ohne den Filter keine Rottöne mehr darstellbar (Abbildung 4 rechts).



Die beste Kanaltrennung unter den vermessenen Kameras wie die Canon 5D Mk III auf. Die in Abbildung 5 eingezeichneten roten Kreise zeigen die Farbörter von Infrarotstrahlung. Der rosa Kreis beschreibt die Interpretation der Kamera von einer Wellenlänge von ca. 700 nm, die sich zwar im sichtbaren Bereich befindet, vom eingebauten Infrarotsperfilter allerdings herausgefiltert wird, da er ab ca. 675 nm greift (vgl. hierzu Abbildung 6).

Abbildung 5: Canon 5D Mk III Messpunkte innerhalb der CIE-Normfarbtafel

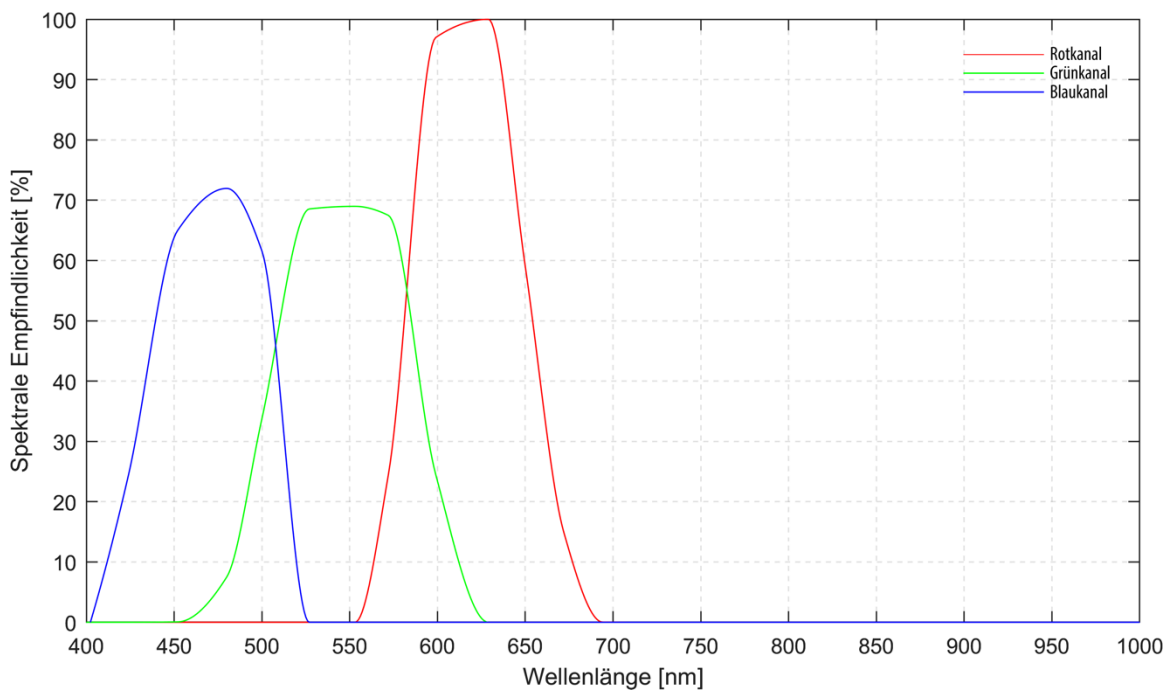
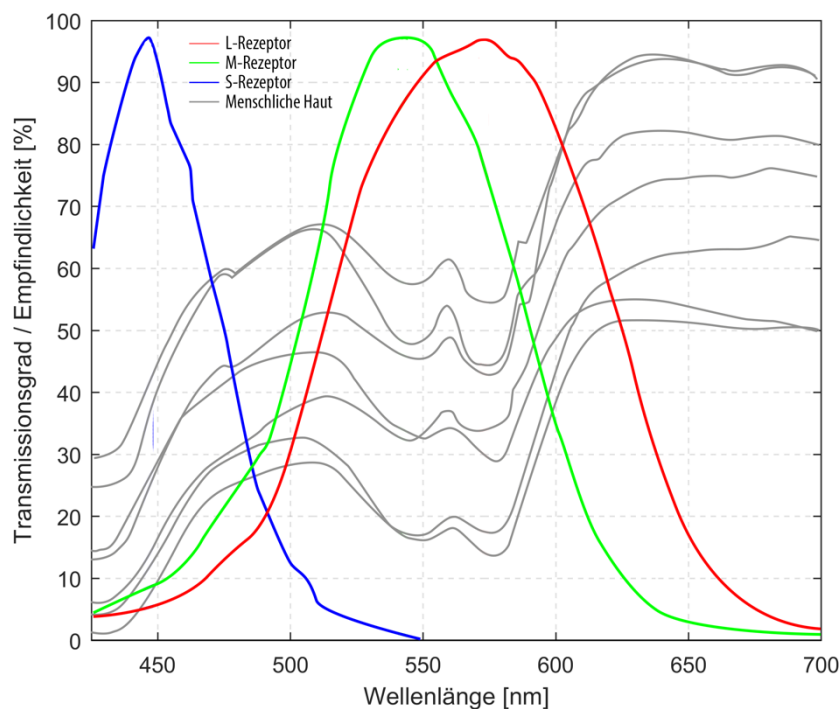


Abbildung 6: Spektrale Empfindlichkeit der Canon 5D Mk III

3 Konstruktion und Einsatz des Messkörpers

Eine Person ist nicht in der Lage vollständig still zu bleiben. Für den Vergleich zweier Aufnahmen zur 3D-Rekonstruktion ist eine vollkommen unbewegte Person allerdings unabdingbar. Daher wurde ein Messkörper angefertigt, der einem menschlichen Kopf nachempfunden ist. Dabei war neben der Erscheinungsform vor allem wichtig, dass sich die Oberfläche des Messkörpers bzgl. ihrer Struktur und ihrer spektralen



Reflexionseigenschaften ähnlich wie menschliche Haut verhält.

Die gewünschten spektralen Reflexionseigenschaften sind durch die Messungen von [1] bekannt und wurden nach [2] mit den spektralen Empfindlichkeitskurven der Zapfen des menschlichen Auges (nach [3]) in Verbindung gebracht (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7: Spektrale Reflexionseigenschaften von menschlicher Haut und Zapfenempfindlichkeit des Auges (zusammengefasst und skaliert) nach [2]

Das Material, das am geeignetsten erschien, um menschliche Haut nachzuahmen, ist Leder. Aus diesem Grund wurden verschiedene Lederproben mit lebendiger menschlicher Haut verglichen und dabei festgestellt, dass mit Make-up geschminktes Schafsleder sowohl ähnliche spektrale Reflexionseigenschaften (siehe Abbildung 8), als auch Strukturen aufweist.

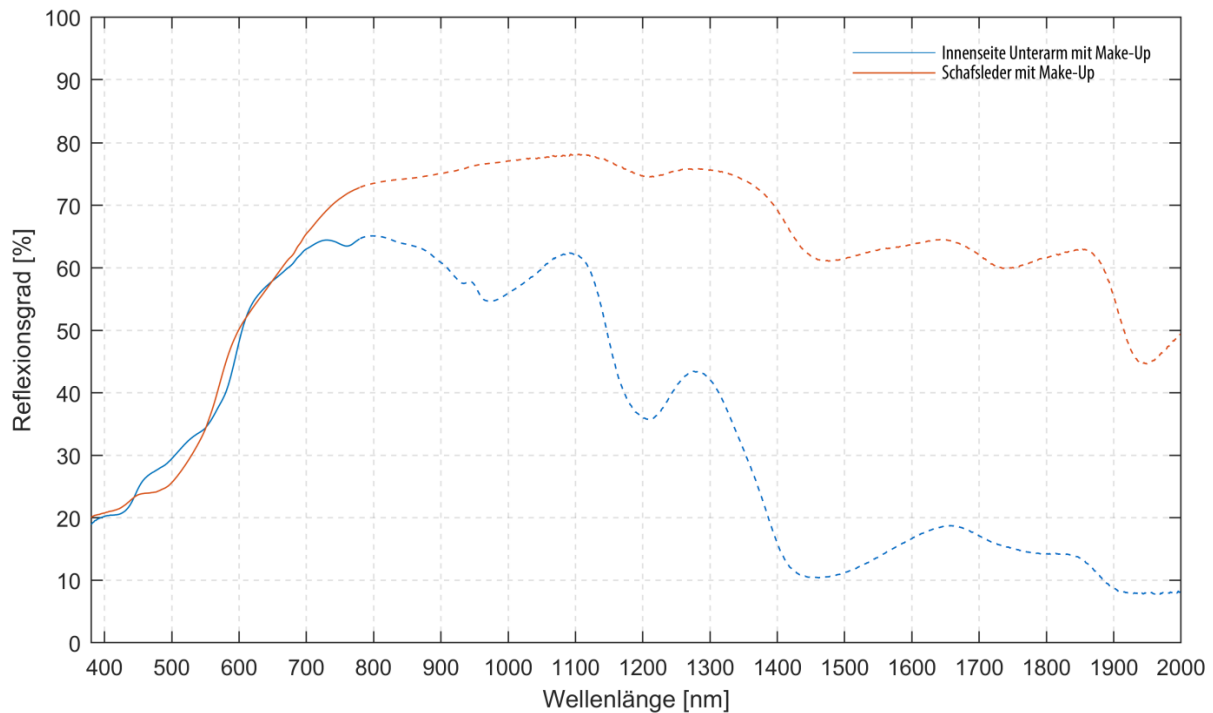


Abbildung 8: Vergleich der spektralen Reflexionseigenschaften von menschlicher Haut

Herstellung

Der Messkörper selbst wurde mithilfe von 3D-Modellierungs-Software gestaltet und mit einem 3D-Drucker in Lebensgröße aus PLA gefertigt (siehe Abbildung 9).

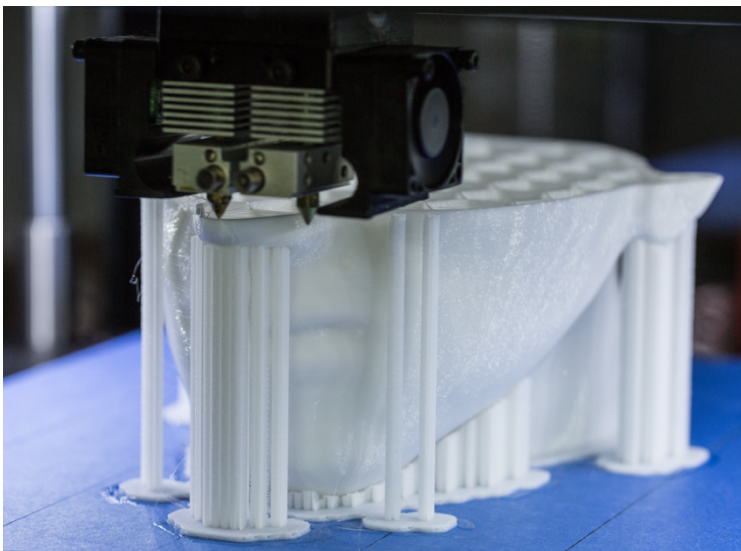


Abbildung 9: 3D-Druck des Messkörpers

Anschließend wurde der Plastikträger mit Schafsfleder überzogen und geschminkt. Der fertige Messkörper ist in Abbildung 10 dargestellt.



Abbildung 10: Fertiger Messkörper mit Make-up und Behaarung

Testaufnahmen und Nachbearbeitung



Abbildung 11: Abschwächung des Infraroteinflusses (links), Abschwächung des Rotkanals (rechts)

Mit dem fertigen Messkörper wurden bei zwei verschiedenen Beleuchtungssituationen (Halogen und LED) Aufnahmen gemacht. In Abbildung 11 sind zwei bearbeitete Aufnahmen von der Ximea CB200CG gegenübergestellt.

- 1) Im Bild auf der linken Seite wurde der Rekonstruktionskörper mittels Halogenscheinwerfer beleuchtet. Anschließend wurden diejenigen Farben in ihrer Helligkeit reduziert, die mit infraroten Wellenlängen korrespondieren.
- 2) Das rechte Bild zeigt den Messkörper unter LED-Beleuchtung ohne Infrarotanteil, nachdem der Rotkanal aus der Aufnahme entfernt wurde. Diese Möglichkeit wurde insbesondere untersucht, da bei den *Volumetric Video Studios* LED-Leuchten eingesetzt werden, die frei von Infrarotstrahlung sind. Wenn auch deutlich schwächer, lassen sich hier ebenfalls Muster auf der Haut erkennen.

Demnach sollte idealerweise bei vorhandenem Infrarotanteil bei der Beleuchtung Variante 1) bevorzugt werden, wenn die Qualität des Gittermodells selbst am wichtigsten ist. Durch die Einschränkung der darstellbaren Farben eignen sich derart aufgenommene Bilder allerdings kaum zur Gewinnung von Texturen. Demgegenüber stellt Variante 2) einen Kompromiss dar, wenn das Bildmaterial ebenfalls Texturen liefern soll bzw. keine infrarote Strahlung ausgenommen werden kann.

4 Anwendung im *Volumetric Video Studio*

Die in den *Volumetric Video Studios* eingesetzte Beleuchtung ist frei von Infrarotstrahlung. Aus diesem Grund wurde die Entfernung des Rotkanals von Bildern für die 3D-Rekonstruktion mit vorhandenem Material durchgeführt.



Abbildung 12: Maria RGB

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen Franziska Brandmeier als Maria aus „Ein Ganzes Leben / 100 Jahre UFA“.

Während bei Abbildung 12 Rot-, Grün- und Blaukanal in gleichen Anteilen gewichtet wurden, um das Schwarzweißbild zu erzeugen, besteht Abbildung 13 lediglich aus den Informationen des Blau- und Grünkanals. Auch hier ist ähnlich wie bei Abbildung 11 (rechts) mehr Musterung auf der glatten Haut zu erkennen.



*Abbildung 13: Maria ohne
Rotkanal*

Beide Datensätze wurden zur 3D-Rekonstruktion herangezogen und bezüglich ihres Detailgrads miteinander verglichen.



*Abbildung 14: 3D-Rekonstruktion von Maria – links gleichgewichtete RGB-Kanäle,
rechts entfernter Rotkanal*

In Abbildung 14 (links) ist der Übergang zwischen Mund und Nase weniger scharf als in Abbildung 14 (rechts). Auch die Nasenspitze konnte durch die Entfernung des Rotkanals etwas detaillierter rekonstruiert werden. Die glatte Haut der Wangen ist

durch diese Maßnahme zwar etwas rauschbehafteter, aber dafür konnte die Falte zwischen Mund und Wange definierter rekonstruiert werden.

5 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass infrarote Strahlung von Digitalkameras im sRGB-Farbraum abgebildet wird. Mithilfe der Kenntnis der genauen Farbörter lässt sich Bildmaterial für die 3D-Rekonstruktion von Personen gezielt nachbearbeiten, um Muster auf der Haut zu erzeugen, die sonst nicht sichtbar sind.

Auch ohne den Einfluss von Infrarotstrahlung lässt sich der Detailreichtum einer 3D-Rekonstruktion von Personen erhöhen, indem die zu rekonstruierenden Schwarzweißbilder ohne Rotkanal erzeugt werden.

6 References

- [1] Elli Angelopoulou, "The Reflectance Spectrum of Human Skin," Technical Report, University of Pennsylvania Department of Computer und Information Science Technical, 1999.
- [2] Alexis van Hurkman, Color Correction Handbook: Professional Techniques for Video and Cinema. Digital Video & Audio Editing Courses. Pearson Education, 2013.
- [3] Andrew Stockman, Donald I. A. MacLeod und Nancy E. Johnson, "Spectral sensitivities of the human cones," J. Opt. Soc. Am. A 10.12 (Dez. 1993), S. 2491–2521.

Entwicklung eines Farbkalibrierungssystems für ein Mehrkameranasytem zur 3D Rekonstruktion von Personen

Silke Müller

Technische Universität Berlin

Abstract

In diesem Paper werden drei Varianten zur Farbkalibrierung eines Mehrkameranasytems für die 3D-Rekonstruktion von Personen vorgestellt, um eine Generierung von fehlerfreien Texturen zu ermöglichen. Besonderer Fokus wird dabei auf die Anforderungen zum Einsatz eines konventionellen Referenzcharts in der Umgebung eines volumetrischen Videostudios gelegt. Im Rahmen der Masterarbeit konnte gezeigt werden, wie wichtig es ist, dass neben der farbmetrischen und lichttechnischen Stabilität der Leuchten eine identische Beleuchtung der Charts für alle Kameras gewährleistet wird. Als Alternative werden in Kürze zwei aktive, d.h. selbstleuchtende Kalibrierobjekte vorgestellt. Die erste Variante verwendet die RGB-Module der verbauten Studioleuchten, das zweite sieht den Aufbau einer LED-Leuchte mit RGBA-Emitter vor.

1. Einführung

2017 wurde am Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut mit dem Volumetric Video Studio das erste volumetrische Videostudio des europäischen Festlands aufgebaut.



Abbildung 1: Blick in das Volumetric Video Studio

© 2019 by the authors. – Licensee Technische Universität Imenau, Deutschland.



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

Mit 32 über 360° verteilten Kameras (siehe Abb. 1) kann der Bewegungsablauf eines Schauspielers aufgenommen werden und in einem späteren Schritt in eine Sequenz von 3D-Modellen umgewandelt werden.

Üblicherweise wird diese Sequenz in eine computergenerierte Umgebung eingefügt und mit der Aufnahmebildrate von 25 Bildern pro Sekunde abgespielt. Mit Hilfe einer Virtual-Reality-Brille kann der Zuschauer dann in einem begehbaren Film den Schauspieler von allen Seiten betrachten.

Bei einem Mehrkammersystem zur 3D-Rekonstruktion von Personen ist die Farbkalibrierung eine wichtige Grundlage, um naturgetreue Texturen zu generieren. Sind die Kameras nicht gut aufeinander abgestimmt, kommt es bei der Fusion der Bildausschnitte der einzelnen Kameras zu Flecken auf der Textur. Um dies zu verhindern, wurden bisher bei jedem Dreh Kalibrierungsaufnahmen von einem Referenzchart mit Testfarben erstellt und die Bilder der Kameras per Auge verglichen und mit einem Farbbearbeitungsprogramm angepasst. Dieser Prozess ist jedoch sowohl zeitaufwendig als auch in seinen Resultaten nicht zufriedenstellend.

Ziel der Masterarbeit war demnach der Entwurf eines Farbkalibrierungsverfahrens, das eine möglichst einfache und akkurate Angleichung der Kameras ermöglicht. Dabei wurden sowohl Wahl und Entwicklung eines Kalibrierobjektes sowie dessen Verwendung unter den speziellen Gegebenheiten des Volumetric Video Studios berücksichtigt.

Forschungsbeiträge zu Mehrkammersystemen sind mehrheitlich im Bereich Computer Vision zu finden und legen dabei auch bei der Farbkalibrierung einen starken Fokus auf Bildverarbeitungsalgorithmen (z.B. [1]). Weder die Handhabung eines konventionellen Kalibrierungsobjektes noch die lichttechnischen Bedingungen im Aufnahmestudio wurden bisher detailliert behandelt.

2. Vorstellung der Kalibrierungsverfahren

Neben der Eignung zur exakten Farbabpassung der Kameras galten noch eine Reihe von anderen Anforderungen an das Kalibrierobjekt. Da ihr Einsatz nicht nur im Heinrich-Hertz-Institut geplant ist, sondern auch in weiteren Aufbauten wie dem im Filmstudio Babelsberg, sollte es möglich portabel und flexibel sein. Für alle Kalibrierobjekte ist es zudem wichtig, dass sie den im Rekonstruktionsverfahren eingesetzten Farbraum sRGB ausfüllen. Von größter Wichtigkeit sind auch die

gleichmäßige Beleuchtung der passiven Kalibrierobjekte sowie eine homogene leuchtende Fläche bei den selbstleuchtenden Varianten. Nur so kann sichergestellt werden, dass alle Kameras die gleichen Referenzfarben aufnehmen.

2.1 Passives Referenzchart

Das in der Praxis gängigste Farbkalibrierungsverfahren besteht darin, Abweichungen anhand eines Referenzcharts zu korrigieren. Der erste Fokus der Arbeit lag auf der Untersuchung der lichttechnischen Bedingungen für die Verwendung des Charts sowie den Anforderungen zum Einsatz innerhalb des Mehrkamerasystems.

Durch den zeitlichen Versatz zwischen Personen- und Kalibrierungsaufnahmen sind konstante lichttechnische und farbmetrische Eigenschaften der im Volumetric Video Studio verbauten Leuchten sehr wichtig. Da diese bei LED-Leuchten u.a. mit der Erwärmung verknüpft sind, hat die Autorin das Verhalten der Leuchten über einen Zeitraum von 90 Minuten nach Einschalten der Leuchten mit Hilfe von Spektroradiometermessungen (JETI specbos 1201) und durch Auswertung der Kamerabilder untersucht. Wie in Abb. 2 zu sehen ist, dauert es ca. 15 Minuten bis die Abweichung der Beleuchtungsstärke beim konstanten Endwert unter 1 % liegt. Die Abweichung der Farbörter ist hingegen vernachlässigbar.

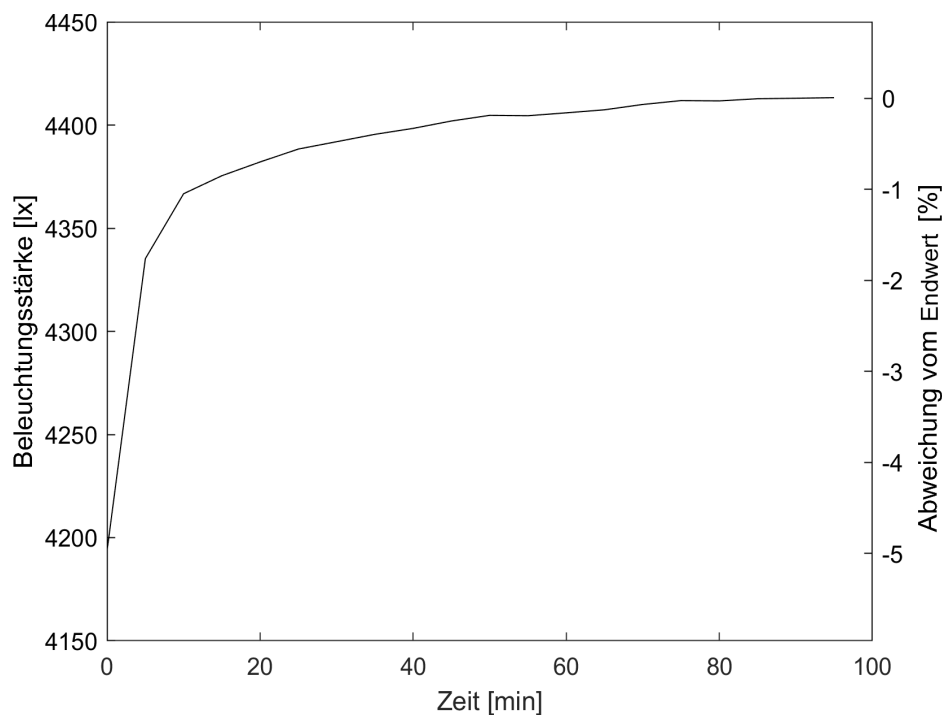


Abbildung 2: Langzeitmessung der Beleuchtungsstärke in der Mitte des Raumes

Im Zuge dieser Untersuchungen wurde auch der Farbwiedergabeindex der Leuchten überprüft und die Eignung dieser mit einem exzellenten Farbwiedergabeindex von 97,8 bestätigt.

Expliziter Bezug zur Verwendung des Charts in einem Mehrkameranystem wurde durch die Untersuchungen zur Ausrichtung des Referenzcharts genommen. Deckt das Mehrkameranystem einen so großen Winkel des Raumes ab, dass das Chart gedreht werden muss, so muss sichergestellt werden, dass die Beleuchtungsstärke auf diesem aus allen Blickwinkeln gleich ist.

Aus diesem Grund wurden sowohl die Beleuchtungsstärke als auch die Farbörter auf dem Diffusor-Aufsatz des Spektroradiometers in der Mitte des Studios aus verschiedenen Winkeln gemessen. Die Positionierung ist in Abb. 3 schematisch dargestellt.

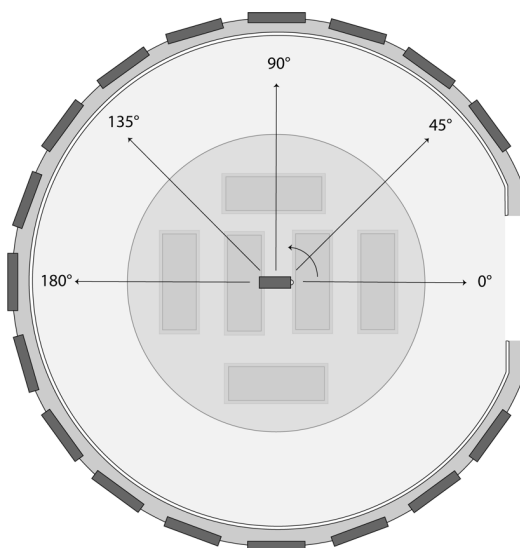


Abbildung 3: Platzierung des Spektroradiometers

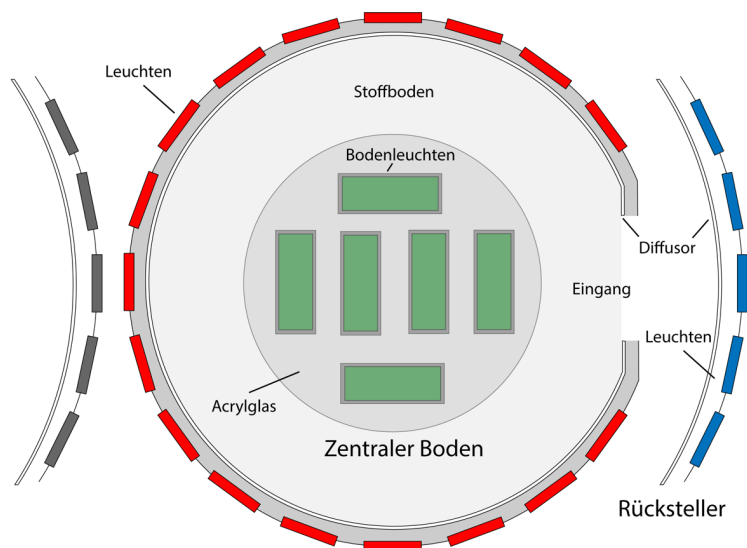


Abbildung 4: Aufbau des Volumetric Video Studios

Die Messergebnisse in Tab. 1 zeigen, dass die Beleuchtungsstärke abhängig vom horizontalen Blickwinkel ist. Dies liegt primär am Aufbau des Studios, welches aus einer Rotunde und einem Rücksteller hinter dem Eingang besteht (siehe Abb. 4), in

Winkel [°]	Rücksteller 50 %		
	Beleuchtungsstärke [lx]	x	y
0	8128	0,3314	0,3457
45	8510	0,3309	0,3453
90	8785	0,3304	0,3448
135	8800	0,3305	0,3449
180	8740	0,3305	0,3451

Tabelle 1: Beleuchtungsstärke und Farbörter über horizontalen Blickwinkel

dessen Richtung die Beleuchtungsstärke abfällt.

Die Auswirkungen der inhomogenen Lichtverhältnisse auf die RGB-Werte einzelner Farbfelder wurden durch eine Messreihe mit Verkippung des Referenzcharts in verschiedene horizontale und vertikale Winkel überprüft.

Zur Ausführung wurden sowohl ein Aufbau zum Ablesen der Winkel als auch ein System, um das Lot zur optischen Achse der Kamera zu bestimmen (siehe Abb. 5), entwickelt.

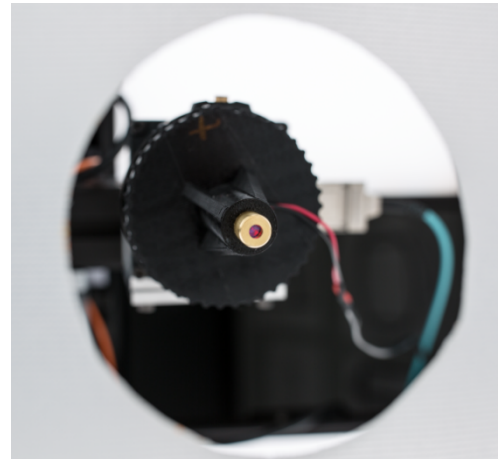


Abbildung 5: Aufbau zur Bestimmung der optischen Achse

Aus den Aufnahmen des Charts konnten pro Farbfeld für verschiedene Winkel über die Fläche gemittelte RGB-Werte berechnet werden, die sich wie in Abb. 6 vor allem in der Helligkeit unterscheiden.

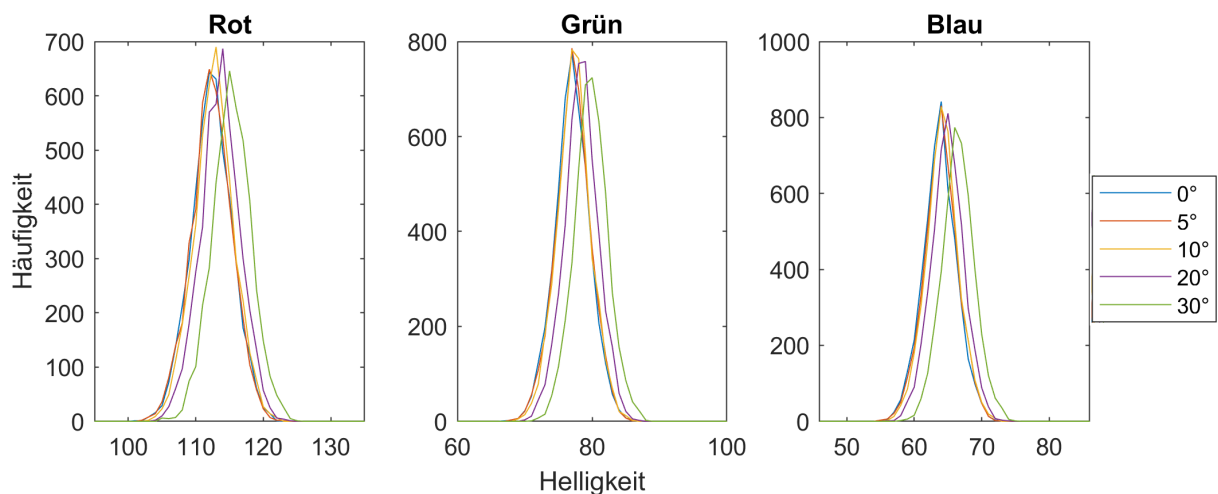


Abbildung 6: Häufigkeit der RGB-Werte des Farbfelds „Dark Skin“ über verschiedene horizontale Kippwinkel

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich je nach Drehwinkel des Charts andere RGB-Werte in der Kamera ergeben. Um den Einfluss dieser auf die Rekonstruktionsergebnisse abzuschätzen, wurde im Rahmen der Masterarbeit eine komplette 3D-Rekonstruktion einer Person durchgeführt (siehe Abb. 7).

Die Farbkalibrierung der Kameras wurde dabei mit Referenzcharts einmal mit einer festen Ausrichtung und einmal im Lot zur optischen Achse der jeweiligen Kamera durchgeführt. Für die Analyse des Charts wurde ein mehrschrittiges Schema aus einer Kombination kommerzieller Software erarbeitet. Dieses Verfahren lieferte sowohl bei

der Auswertung der Farbabstände der verarbeiteten Kamerabilder als auch der 3D-Rekonstruktionen sehr gute Ergebnisse.

Für beide Ausrichtungen zeigten sich optisch identische Ergebnisse bei der 3D-Rekonstruktion ohne Flecken in der Textur. Da jedoch nur zwei benachbarte Stereopaare, d.h. zwei Kameras verwendet wurden, vermutet die Autorin, dass die Beleuchtungsunterschiede auf den Charts deutlich geringer waren, als wenn die vollen 360° des Raums ausgenutzt werden, bei denen diese Unterschiede sich dann auch in der Textur in Form von Flecken zeigen.



Abbildung 7: 3D-Rekonstruktion aus drei Winkeln

Allerdings konnte durch optischen Vergleich der nach dem Schema vorbehandelten, d.h. kalibrierten Bilder und durch Auswertung der RGB-Werte nachgewiesen werden,



Abbildung 8: Zusammenschnitt von Bildern zweier Kameras, links: Chart mit fixer Position im Raum, rechts: Chart zu den Kameras gedreht

dass die Farbkalibrierung der Kameras untereinander schlechtere Ergebnisse liefert, wenn das Chart zur jeweiligen Kamera gedreht wird (siehe Abb. 8 rechts im Vergleich zur fixen Position links).

Daraus kann geschlossen werden, dass diese Ausrichtungsvariante generell nicht zu empfehlen ist, wenn die Beleuchtung innerhalb des Mehrkamerasytems nicht homogen ist. Dieses Ergebnis ist besonders wichtig im Hinblick darauf, dass das Chart bis zu diesen Untersuchungen im Volumetric Video Studio immer zu Kamera gedreht wurde und dies auch in Untersuchungen anderer Forschergruppen gängige Praxis ist.

2.2 Aktive Kalibrierkonzepte

Der zweite Fokus der Arbeit lag auf der Ausarbeitung eines aktiven Kalibrierungskonzepts, das von der Beleuchtungssituation während der Aufnahmen im Studio entkoppelt ist. Hierfür wurden zwei verschiedene Konzepte vorgestellt.

In der ersten Variante wurden die RGB-Module der im Studio verwendeten Leuchten dazu verwendet, auf einer weißen Kugel in der Mitte des Raumes Testfarben zu erzeugen (siehe Abb. 9). Der von den Modulen aufgespannte Farbraum ist dabei groß genug, um sRGB auszufüllen. Nach Anfertigung einer passenden Kugel zeigten sich bei der Überprüfung der Leuchtdichte auf der Kugel die gleichen Inhomogenitäten wie auf dem Chart. Die Ergebnisse der Messung sind in Tab. 2 aufgeführt.



Abbildung 9: Kugel im Volumetric Video Studio

Aus diesem Grund wurde diese Variante nicht weiterverfolgt, allerdings sind in der Abschlussarbeit alle Informationen gegeben, um ein vergleichbares Kalibrierobjekt herzustellen und dieses in einem Aufbau mit homogenem Licht zu verwenden.

Winkel [°]	Leuchtdichte [$\frac{cd}{m^2}$]	x	y
0	2310	0,3264	0,3425
90	2353	0,3258	0,3421
180	2536	0,3271	0,3429
270	2511	0,3265	0,3424
0 Bottom	2348	0,3262	0,3421
0 Top	1947	0,3299	0,3448
90 Top	1838	0,3277	0,3434
180 Top	2078	0,3296	0,3442
270 Top von oben	2037	0,3299	0,3445

Tabelle 2: Leuchtdichte auf der Kugel aus verschiedenen Winkeln gemessen

Als zweite aktive Variante wurde die komplette Entwicklung einer LED-Leuchte vorgenommen, bei der die Testfarben durch einen LED-Emitter mit RGB+Amber-Chips realisiert werden (siehe Abb. 10). Der von den RGB-Chips ausgefüllte Farbraum deckt sRGB bereits ab, die Amber-Komponente lässt aber die Möglichkeit offen, das Kalibrierobjekt in Zukunft auch für einen größeren Farbraum einzusetzen.

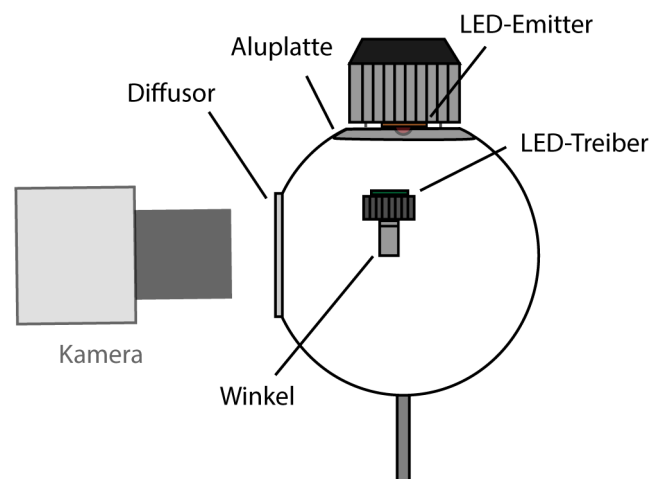


Abbildung 10: Schematischer Aufbau der LED-Leuchte

Damit die Kameras möglichst ähnlichen Beleuchtungsniveaus wie im Studio ausgesetzt werden, wurde die Beleuchtungsstärke an den Objektiven auf einen geforderten Emitter-Lichtstrom zurückgerechnet. Durch die Betrachtung des Thermomanagements wurde zudem dafür Sorge getragen, dass die lichttechnischen und farbmetrischen Parameter der Leuchte möglichst konstant gehalten werden. Durch die Wahl aller zusätzlichen Komponenten sowie Informationen über die zur Inbetriebnahme benötigten Messungen und dem Einsatz des von der Autorin erarbeiteten Kalibrierschemas sind die Voraussetzungen für eine Realisierung des Konzepts in der Arbeit gegeben.

3. Fazit und Ausblick

Mit der Erstellung von immersiven Inhalten für VR- und AR-Anwendungen ist eine ganz neue Form von Content-Erzeugung notwendig. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sowie die vorgeschlagenen Messungen sind im Besonderen für die Erstellung von hochqualitativen Mehrkamera-Aufnahmen wichtig, die spezielle Anforderungen an die Beleuchtung und den Umgang mit Referenzcharts stellen.

Im Fall von blickwinkelabhängigen Beleuchtungsstärken in der Mitte des Raumes, wie im Volumetric Video Studio, können nur mit einer reduzierten Anzahl an Kameras und einem fix positionierten Referenzchart eine Beeinflussung der Kalibrierung vermieden werden. Das Drehen des Referenzcharts sollte in diesem Kontext vermieden werden. Die Autorin empfiehlt zur Einschätzung und Korrektur der Beleuchtungssituation jedes neuen Aufbaus die Durchführung der in der Arbeit beschriebenen Kontrollmessungen. Diese umfassen Messungen des Verlaufs der Beleuchtungsstärke und der Farbörter in der Mitte des Raumes nach Anschalten der Beleuchtung sowie der Beleuchtungsstärke in der Mitte über verschiedene horizontale und vertikale Blickwinkel.

Mit dem vorgestellten Konzept einer Kalibrierleuchte wurde ein Lösungsweg für Studios mit inhomogenen Lichtbedingungen skizziert. Dieses soll im Rahmen weiterer Abschlussarbeiten realisiert und im Einsatz überprüft werden.

References

[1] Kun Li, Qionghai Dai und Wenli Xu. „Collaborative color calibration for multi-camera systems“. In: *Signal Processing: Image Communication*, 26 (Jan. 2011), S. 48–60. doi: 10.1016/j.image.2010.11.004

Einfluss von Tuben zur Abschirmung von Streulicht bei photometrischen Messungen

Laura Kallenbach, Johannes Ledig, Thorsten Gerloff

Fachbereich 4.1 Photometrie und Spektroradiometrie

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany

Laura.Kallenbach@ptb.de

Abstrakt

In diesem Beitrag wird der Einfluss von Tuben zur Streulichtreduzierung auf Messungen von photometrischen und radiometrischen Größen untersucht. Dazu wurden Messungen mit einer grünen 5 mm LED sowie einem Leuchtdichtenormal mit einer Halogenglühlampe und einer Lichtaustrittsfläche von 70 mm im Durchmesser durchgeführt. Zum Einsatz kamen sechs verschiedene Empfänger (drei Photometer und drei Radiometer), welche jeweils mit sechs verschiedenen Tuben sowie ohne Tubus eingesetzt wurden. Die Tuben unterscheiden sich in ihren matt schwarzen bzw. schwarz eloxierten (glänzenden) Ringblenden, der Blendenposition im Tubus, dem Fasenwinkel und der Ausrichtung der Faser zur Lichtquelle bzw. zum Empfänger. Die Messungen erfolgten in einer reflexionsarmen Umgebung. Die Ergebnisse wurden im Anschluss analysiert und graphisch aufgearbeitet. Dabei sind Unstimmigkeiten im Bezug zu einem Empfänger aufgetreten, die im Weiteren mit zusätzlichen Messungen untersucht wurden.

1 Einleitung

Der Einsatz von Tuben bei photometrischen und radiometrischen Messungen ist weit verbreitet und in der Messtechnik zur Reduktion von Streulicht allgegenwärtig. Hierbei stellt sich die Frage, welche Auswirkungen Tuben auf die jeweilige Messgröße haben. Diese Arbeit untersucht hierbei exemplarisch den Einfluss von Tuben hinsichtlich der – aus dem Detektorsignal berechneten – Licht- bzw. Bestrahlungsstärke bei der Messung unterschiedlicher Lichtquellen in verschiedenen Distanzen.

Abbildung 1 zeigt den typischen Aufbau eines Photometers mit Eingangsoberatur inklusive (optionalem) Tubus, dabei sind diese Zeichnung und folgenden Darstellungen nicht maßstabsgetreu abgebildet. In lila sind die begrenzende Ringblende des Photometers sowie das durch die Ringblenden im Tubus eingeschränkte Sichtfeld dargestellt. Die Blenden im Tubus sind dabei so angeordnet,



dass ihre Kanten in einer Linie zum eingeschränkten Sichtfeld liegen. Der von der gesamten Photodiode sichtbare Bereich wird dabei hellgrün und der gegenüber der Photodiode durch die Ringblende teilweise verschattete Bereich etwas dunkler in einem Balken rechts dargestellt.

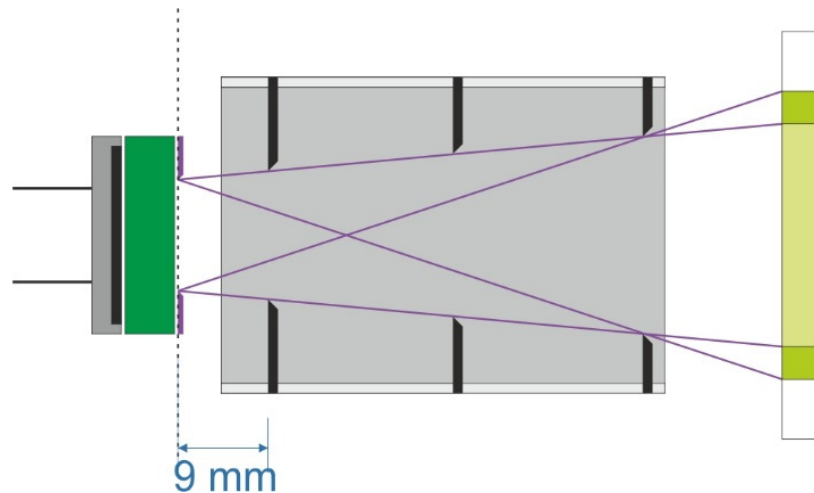


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Photometers mit Tubus und Gesichtsfeld im Querschnitt

Der durch die Siliziumphotodiode erzeugte Photostrom kann bei bekannter photometrischer Empfindlichkeit des Photometerkopfes genutzt werden, um hieraus die Beleuchtungsstärke E_v zu bestimmen. Die betrachtete Lichtstärke I_v kann durch die gemessene Beleuchtungsstärke $E_v(r)$ unter Berücksichtigung des Abstands r und des Einheitsraumwinkels Ω_0 unter Verwendung von Gleichung 1 berechnet werden.

$$I_v = \frac{E_v(r) \cdot r^2}{\Omega_0} \quad (1)$$

Ein ähnlicher Zusammenhang gilt auch für die Messung des radiometrischen Äquivalents, der Strahlstärke. Streng genommen gilt dieser Zusammenhang nur für punktförmige Lichtquellen und infinitesimale Empfängerflächen. Näherungsweise, bei Akzeptanz eines definierten Restfehlers, gilt dieser Zusammenhang auch bei ausreichend großem Abstand zwischen ausgedehnten Lichtquellen und endlich großen Empfängerflächen. Die minimale Distanz bei einem noch akzeptablen Restfehler wird als photometrische Grenzentfernung bezeichnet.

Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss der Einsatz verschiedener Tuben auf die photometrischen und radiometrischen Messungen hat.

In Tabelle 1 sind die verschiedenen verwendeten Empfänger aufgeführt. In der weiteren Diskussion werden nur die in blau geschriebenen Empfänger herangezogen, da die Verläufe der Empfänger P1, P2, R2 und R3 vergleichbar sind und lediglich P3 und R1 von diesen Ergebnissen abweichen und daher separat diskutiert werden.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Empfänger

Bezeichnung	Durchmesser der Empfängerfläche	Diffusorglas	$V(\lambda)$ - Filter
P1	11,3 mm	Nein	Ja
P2	11,3 mm	Nein	Ja
P3	10 mm	Ja	Ja
R1	11,3 mm	Nein	Nein
R2	11,3 mm	Nein	Nein
R3	11,3 mm	Nein	Nein

2 Einfluss der Tuben bei LED-Messungen

Die ersten Untersuchungen erfolgten mit den verschiedenen Empfänger-Tuben-Kombinationen an LEDs als Lichtquelle. Dabei wurde der Abstand zwischen den LEDs und dem Empfänger von 100 mm bis 1000 mm variiert. Abbildung 2 zeigt dabei beispielhaft am Empfänger P1 einen typischen Verlauf der vermeintlichen Lichtstärke berechnet nach $E_v(r) \cdot r^2$ in Abhängigkeit des Abstands. Die Fehlerbalken stellen die Standardmessunsicherheit ohne Berücksichtigung des Streulichts dar.

Hierbei fällt die Variation der vermeintlichen Lichtstärke im geringen Abstand von 100 mm auf. Dies ist eine in der CIE 127:2007 „Measurement of LEDs“ empfohlene und weit verbreitete Geometrie in der LEDs gemessen werden, die als „Averaged LED Intensity ILED B“ bezeichnet wird. Der Anstieg der vermeintlichen Lichtstärke lässt sich durch die geringe Distanz erklären, da hier noch nicht die photometrische Grenzentfernung erreicht wurde, um ähnlich einer Punktlichtquelle wirken zu können. Dieses zeigt, dass die erhaltenen Werte der Messbedingungen für ILED A (316 mm) und ILED B (100 mm) in der Regel nicht der physikalischen Größe der Lichtstärke zugeordnet werden können und daher als Größe „LED-Intensitätsmittelwert“ (engl. Averaged LED Intensity) bezeichnet werden müssen. Die Einheit beider Größen ist jedoch identisch (Candela).

Der relative Verlauf der vermeintlichen Lichtstärke gegenüber der Distanz zwischen Empfänger und Lichtquelle ist bei Messungen mit unterschiedlichen Tuben sehr ähnlich, lediglich der Absolutwert der ermittelten Lichtstärke weicht voneinander ab. Dieser Umstand kommt dadurch zustande, dass die photometrische Empfindlichkeit lediglich für eine Tuben-Empfängerkombination kalibriert wurde und diese in allen Messungen Anwendung fand. Die Kalibrierung einer Kombination lässt sich demnach

nicht auf andere Tuben übertragen. Insbesondere ist das Photometersignal ohne Einsatz eines Tubus größer. Grund dafür ist der vermehrte Beitrag von Streulicht des Raumes.

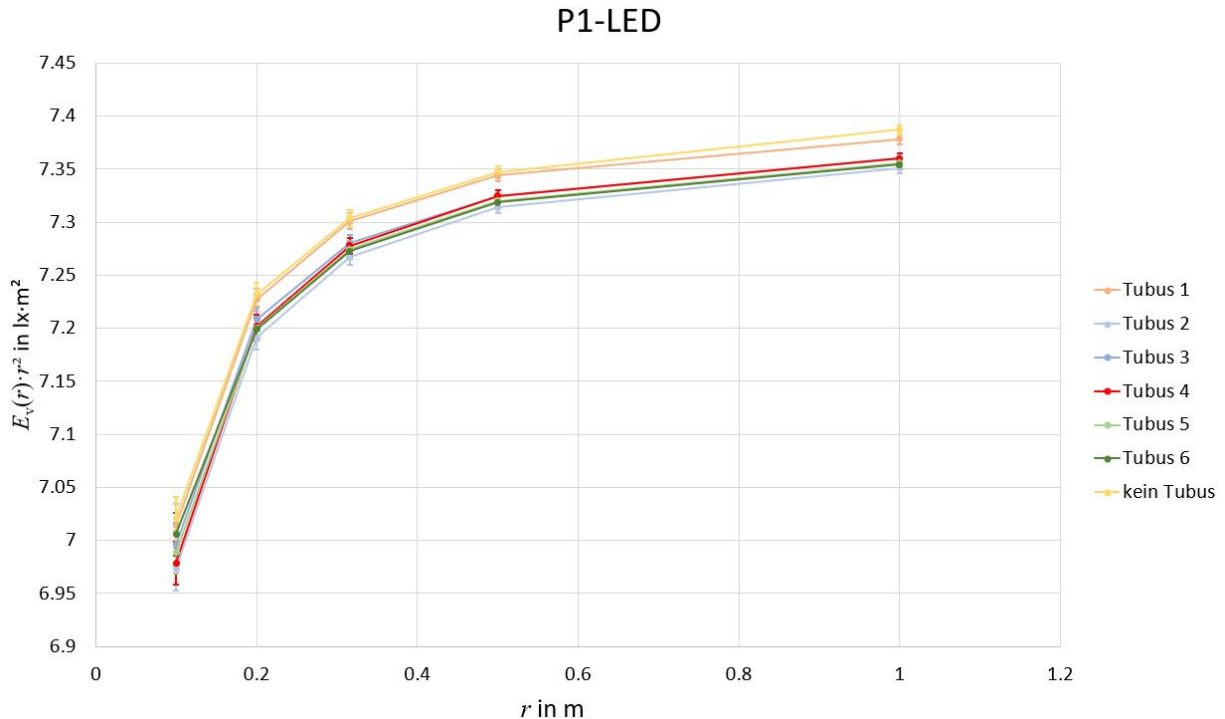


Abbildung 2: Mit Empfänger P1 bestimmtes $E_v(r) \cdot r^2$ bei unterschiedlichem Abstand zur LED
(Die Fehlerbalken stellen die Standardmessunsicherheit ohne Berücksichtigung des Streulichts dar.)

3 Einfluss der Tuben bei ausgedehnten Lichtquellen

Um auch die Auswirkungen von Tuben auf die Lichtstärke bei ausgedehnten Lichtquellen zu untersuchen, wurde ein Leuchtdichtenormal basierend auf einer lichtstromgeregelten Halogenglühlampe als Lichtquelle verwendet. Das Leuchtdichtennormal weist eine leuchtende Fläche von 70 mm im Durchmesser und eine annähernd lambertsche Abstrahlcharakteristik auf. Der Verlauf der in verschiedenen Abständen vom Empfänger P1 ermittelten Lichtstärke ist in Abbildung 3 dargestellt. Wie bei den LEDs ist auch hier ein vermeintlicher Anstieg der Lichtstärke mit zunehmendem Abstand zu erkennen. Es sind erst Messung ab einem Abstand von 500 mm dargestellt, da bei kleineren Abständen der Rand der großen Lichtaustrittsöffnung mit einem Durchmesser von 70 mm durch das Sichtfeld der Ringblenden abgeschnitten wird. Für einen zugelassenen Fehler von z.B. 0,2% ist die photometrische Grenzfernung in einer Distanz von einem halben Meter noch nicht erreicht. Darüber hinaus führt bei der Bestimmung der Lichtstärke allein die Unsicherheit der Abstandsmessung von 1 mm bereits zu einem Messunsicherheitsbeitrag von 0,4%, der in den Messwerten dargestellt ist. Zusätzlich lässt sich ohne Einsatz eines Tubus wieder ein deutlich größeres Photometersignal des Empfängers feststellen. Eine weitere Auffälligkeit, die auch bei anderen Empfängern bei Verwendung des Tubus 4

auftrat, ist der starke Abfall der berechneten vermeintlichen Lichtstärke bzw. Strahlstärke bei einem Abstand von nur einem halben Meter.

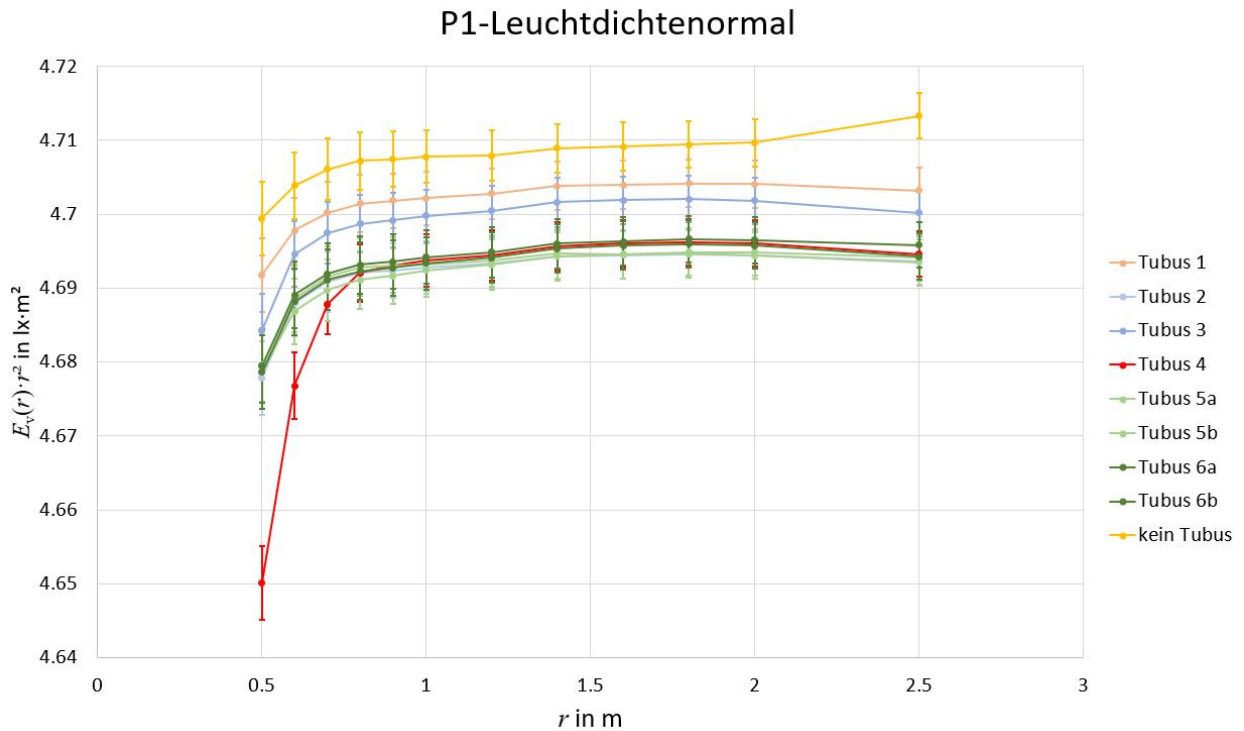


Abbildung 3: Mit Empfänger P1 bestimmtes $E_v(r) \cdot r^2$ eines Leuchtdichtenormals bei unterschiedlichem Abstand (Die Fehlerbalken stellen die Standardmessunsicherheit ohne Berücksichtigung des Streulichts dar.)

Ein Vergleich von Tubus 1 und Tubus 4 zeigt, dass der Abstand des Tubus zur Photometerapertur um 3 mm größer ist als bei Tubus 1, weshalb die erste Blende das Sichtfeld des Empfängers mehr einschränkt. Zur Veranschaulichung stellt Abbildung 4 in lila das nicht verschattete Sichtfeld der Empfänger-Tuben-Kombination P1 dar.

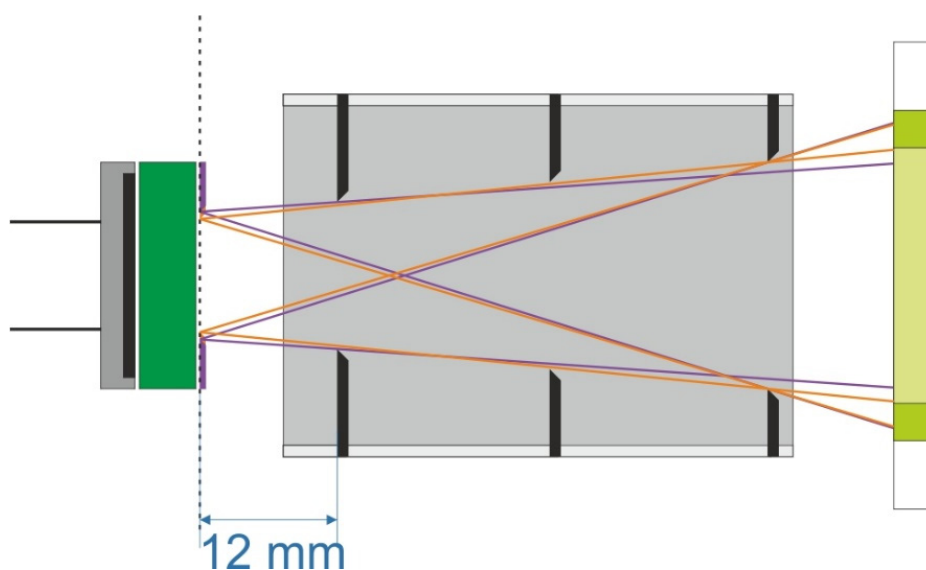


Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines Empfängers mit Sichtfeld bei vergrößertem Abstand des Tubus (lila) sowie eines Empfängers mit verkleinerter Empfängerapertur (orange)

Die hellgrüne Balkendarstellung des sichtbaren Bereichs der Kombination P1 mit Tubus 1 wurde aus Abbildung 1 übernommen. Es ist gut zu erkennen, wie das Sichtfeld des Empfängers durch Verschieben des Tubus verkleinert wird.

Dieser Effekt ist bei Empfänger P3 in Abbildung 5 nicht festzustellen, da dieser eine Empfängerapertur von nur 10 mm Durchmesser besitzt. Durch die kleinere Empfängerfläche hat die erste Blende im Tubus bei dieser Konstellation noch keine abschneidende Wirkung, wie bei den anderen Empfängern. Beispielhaft wird das Sichtfeld dieses Empfängers in Abbildung 4 in orange dargestellt.

Zusätzlich hat dieser Empfänger im Vergleich zu den anderen Empfängern noch einen Diffusor vor dem Filterglas, um ein homogenes Strahlungsfeld für die Photodiode zu erzeugen. Der Empfänger erfasst durch den Diffusor bei 2,5 m Abstand ohne Tubus mehr Streulicht des Raumes, als der Empfänger P1 ohne Diffusor (vergleiche Abbildung 5 mit Abbildung 3).

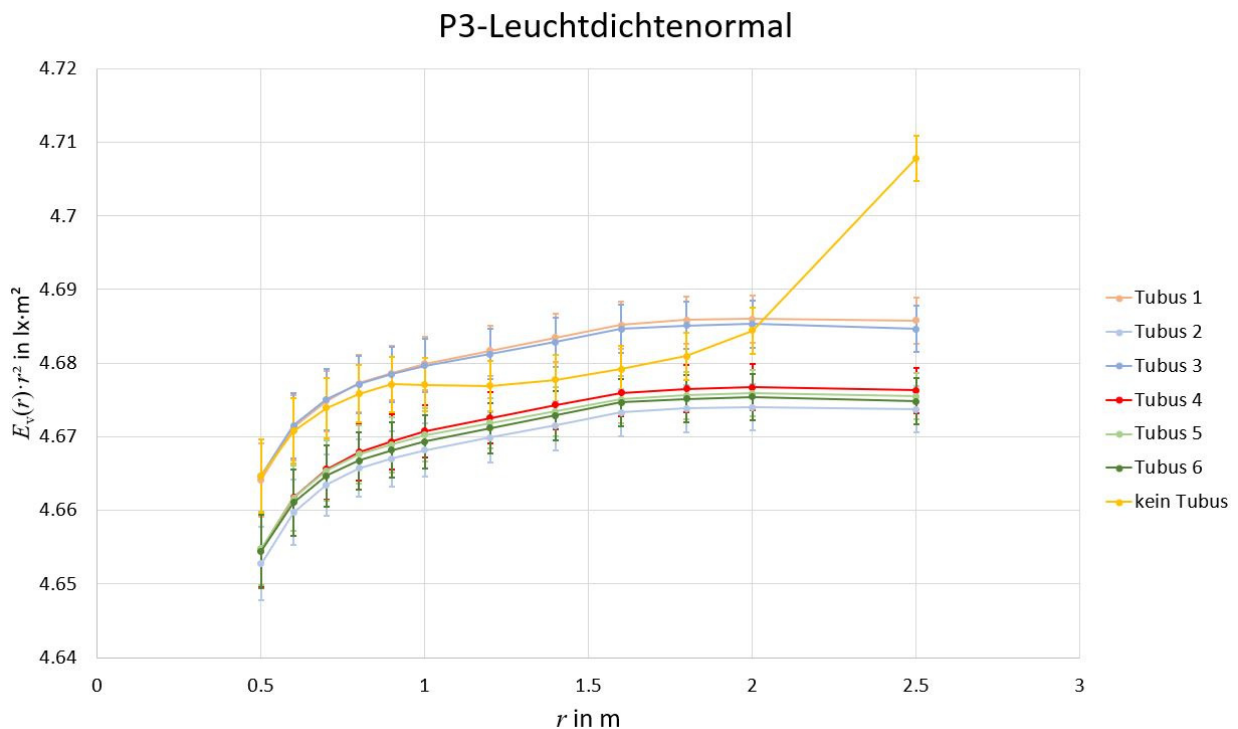


Abbildung 5: Mit Empfänger P3 bestimmtes $E_v(r) \cdot r^2$ eines Leuchtdichtenormals bei Abstandsvariation (Die Fehlerbalken stellen die Standardmessunsicherheit ohne Berücksichtigung des Streulichts dar.)

Die Abstandsabhängigkeit der ohne Tubus bestimmten Lichtstärke kann durch einen Beitrag von Streulicht im Raum erklärt werden, welcher mit größerem Abstand zunimmt. Anders sieht das bei dem Kurvenverlauf des Radiometers R1 in Abbildung 6 aus. Hier ist ein Unterschied zwischen den Messungen mit Tubus und ohne Tubus von 3 % zu erkennen, weshalb für die Konfiguration ohne Tubus das Streulicht im Raum mit Hilfe einer zusätzlichen Messung bestimmt wurde. Dabei wurde eine kleine kreisrunde Blende zwischen Empfänger und Lichtquelle positioniert, die die Lichtquelle gegenüber der Empfängerapertur abschattet, aber nicht den Raum. Dadurch kann das

Streulicht des Raumes bestimmt und vom Photometersignal abgezogen werden. Der Beitrag liegt für die dargestellten Messungen bei unter 1%. Die signifikante Differenz zwischen den Messungen mit und ohne Tubus wurde auch schon bei den LED-Messungen festgestellt. Eine mögliche Ursache sind Interreflektionen zwischen Empfänger R1 und Tubusblenden, weshalb weitere Untersuchungen durchgeführt wurden.

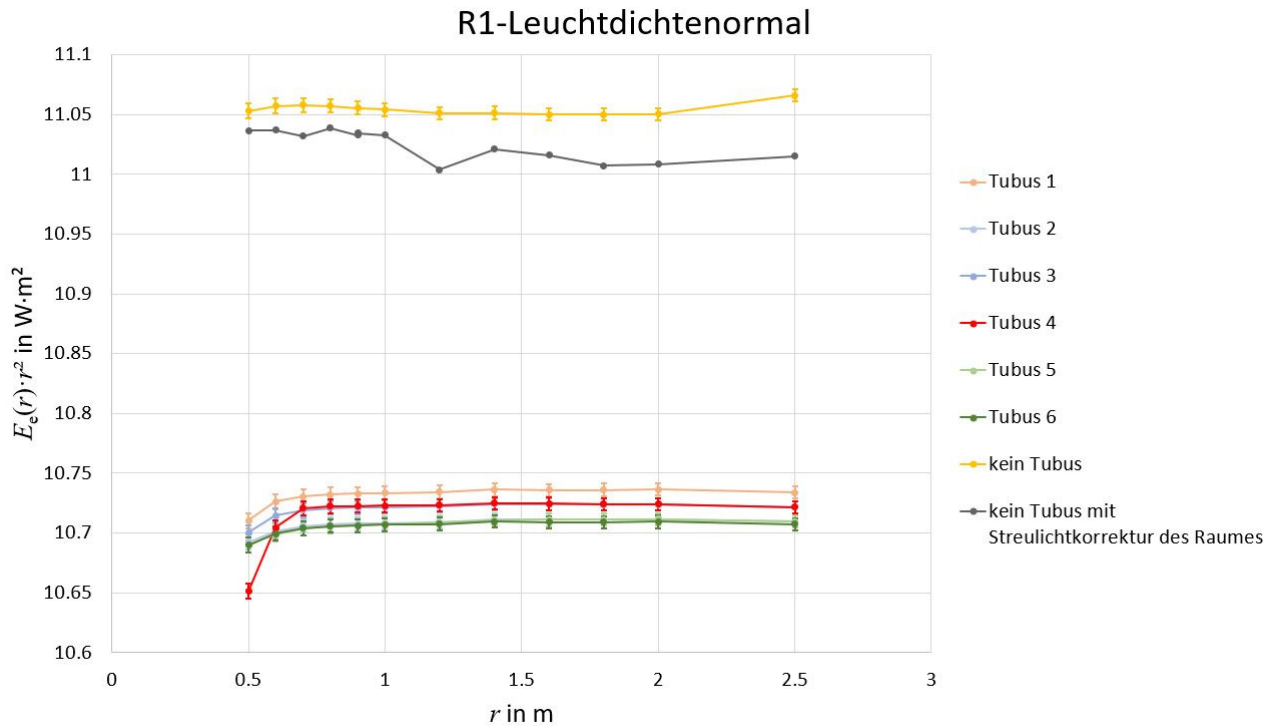


Abbildung 6: Mit Empfänger R1 bestimmtes $E_e(r) \cdot r^2$ eines Leuchtdichtenormals bei unterschiedlichem Abstand (Die Fehlerbalken stellen die Standardmessunsicherheit ohne Berücksichtigung des Streulichts dar.)

4 Untersuchung des Empfängers R1

Um weitere Erkenntnisse über den Empfänger R1 zu erlangen wurde auf diesen ein Spezialtubus mit einer verstellbaren Blendenöffnung geschraubt. In Abbildung 7 ist der mit Hilfe einer Leuchtdichtemesskamera aufgenommene Aufbau (Radiometer R1 mit Spezialtubus zur Variierung des Blendendurchmessers) dargestellt. Dabei zeigt die Farbdarstellung der einzelnen Flächen indirekt deren Reflexionsverhalten in Richtung der Lichtquelle.

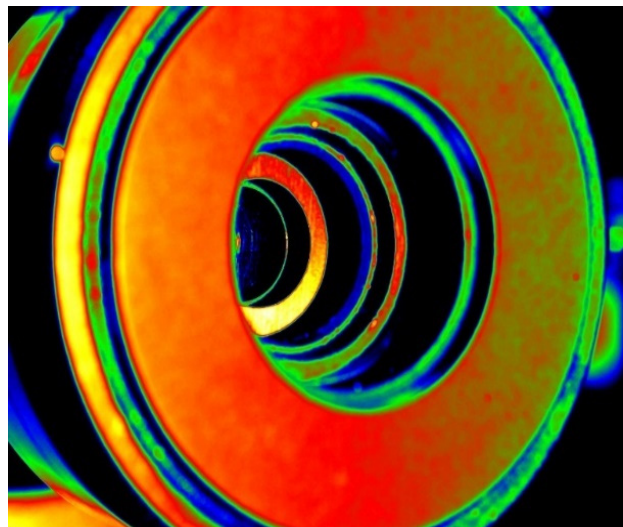


Abbildung 7: Leuchtdichtebild des R1 mit Spezialtubus

Ein Problem bei der Darstellung des Leuchtdichtebildes ist die Blickrichtung der Kamera. Diese schaut von vorne auf den Aufbau und nimmt nicht den Blickwinkel des Empfängers ein, dessen Signalunterschiede untersucht werden soll.

Aus diesem Grund wurde eine weitere Messreihe aufgenommen, in der der Blendendurchmesser Schritt für Schritt verkleinert und gleichzeitig das Signal des Empfängers notiert wurde. In Abbildung 8 sind beispielhaft zwei Fotos mit unterschiedlichem Blendendurchmesser dargestellt. Am linken Bild kann man verschiedene reflektierende Kanten erkennen. Die dritte Kante stammt vom Übergang des Empfängers R1 zum Spezialtubus mit verstellbarer Blende. Die anderen beiden Reflexionskanten kommen durch Blenden in der Lichteintrittsöffnung des Empfängers zu Stande. In der rechten Abbildung kann man die verstellbare Blende erkennen, deren Durchmesser mit aufgezeichnet wurde.

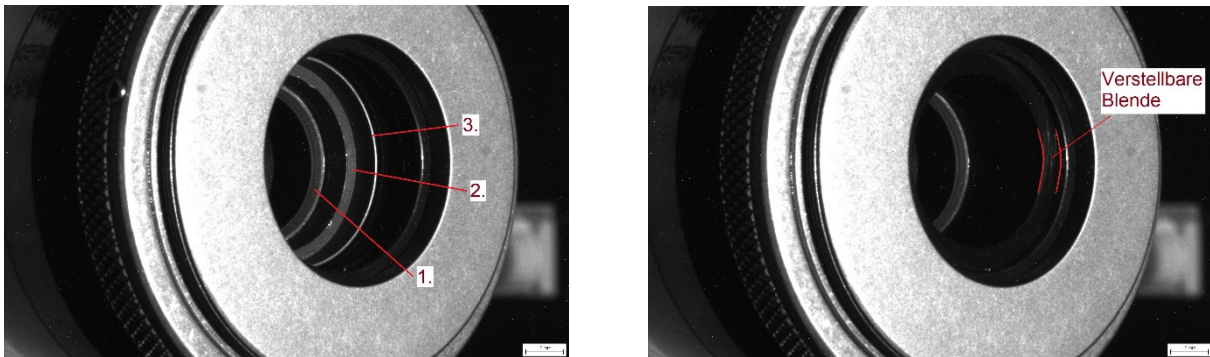


Abbildung 8: Fotos des reflektierten Lichteinfalls bei unterschiedlicher Blendeneröffnung (links: Blendeneröffnung maximal; rechts: Blendendurchmesser verkleinert)

Durch den Schattenwurf der verstellbaren Blende und der berechneten Strahlstärke erhält man den Kurvenverlauf in Abbildung 9. Daran sind deutlich die gesuchten 3% Veränderung in der Strahlstärke zwischen einem Blendendurchmesser von 21 mm

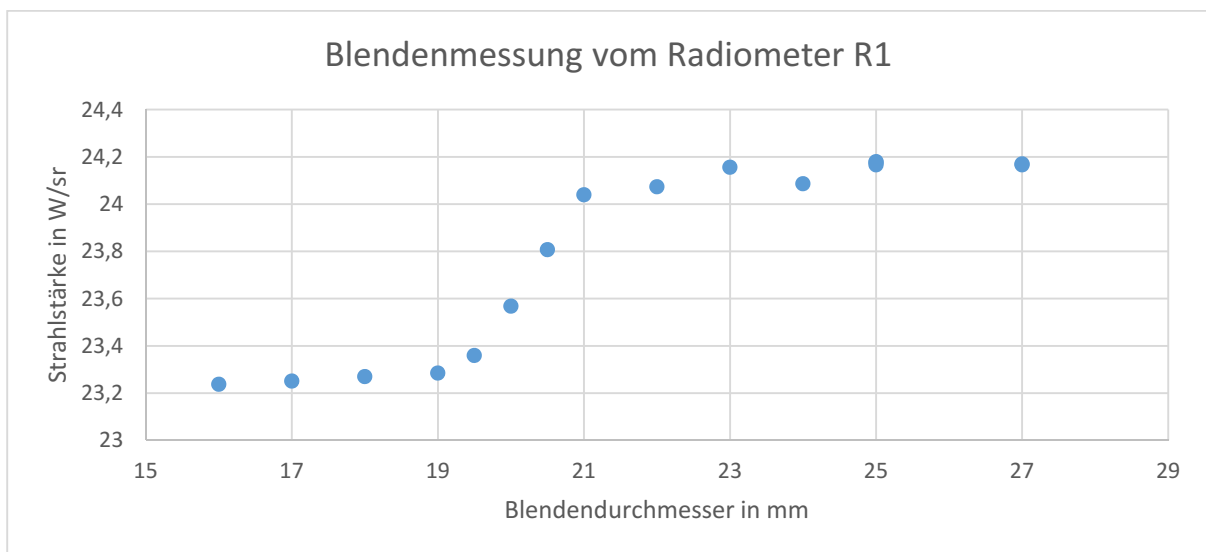


Abbildung 9: Strahlstärke des Empfängers R1 bei Variation des Blendendurchmessers

und 19 mm erkennbar. Gleichzeitig aufgenommene Bilder des Schattenwurfs der Blende geben Aufschluss über die Ursache des Signalunterschieds. Der Schattenwurf erstreckt sich bei einem Blendendurchmesser von 21 mm bis zur dritten Reflexionskante, so dass diese gerade noch im Schatten der Blende liegt. Bei einem Durchmesser von 19 mm fängt der Schattenwurf der Blende an, die zweiten Reflexionskante zu verdecken. Auch wenn der Bereich zwischen der zweiten und dritten Reflexionskante in der Abbildung 8 schwarz erscheint, so reflektiert er doch an seiner glatten, zylinderförmigen Oberfläche Licht, welches fälschlicherweise vom Empfänger als zusätzliches Signal detektiert wird. Diese Reflexion wird durch einen Tubus auf dem Empfänger unterdrückt, da dessen Blenden diese Fläche gegenüber der Lichtquelle verdecken.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden verschiedene Messergebnisse im Bezug zur Tubennutzung bei photometrischen Messungen diskutiert. Dabei wird die Empfehlung ausgesprochen, solche Messungen auch mit seinen eigenen Empfängern durchzuführen um deren messtechnisches Verhalten besser einschätzen zu können. Im Anschluss können dann die passenden Empfänger für die jeweilige Lichtquelle ausgewählt werden. Ideal ist ein Substitutionsprinzip, bei dem Lichtquelle gegen Lichtquelle bzw. Empfänger gegen Empfänger kalibriert wird. Da dies nicht immer möglich ist, ist es umso wichtiger seine Empfänger-Tuben-Kombination genau zu charakterisieren.

Ein Tubus muss als Bestandteil des Empfängers betrachtet werden und daher auch während der Kalibrierung angebracht sein, damit sein Einfluss berücksichtigt („mitkalibriert“) wird. Am Beispiel des Radiometers R1 kann man dies deutlich erkennen.

Sensor array for the analysis of the lighting situation in an intelligent industrial hall

Benkner, S., Klir, S., Truong, W., Khanh, T.Q.; Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik

benkner@lichttechnik.tu-darmstadt.de,

Abstract

In this paper, the possibility of using a multi-channel color sensor to identify artificial light and daylight for use in an intelligently illuminated industrial hall is investigated. First, an overview of intelligent lighting systems is given and the experimental setup is explained. Due to the large amount of data, the processing of large data sets is then highlighted. On the basis of the data collected, it will then be shown that it is possible to distinguish between daylight and artificial light using multi-channel colour sensors.

Index Terms: *intelligent lighting, smart lighting, color sensor, daylight, adaptive illumination*

1 Introduction

Due to the increasing digitalization and connectivity of all areas of life, terms such as "Internet of Things" or "smart" have become an integral part of today's technological discussions. Small, networked electronic components provide the technical basis for a "smart" environment. They collect information about their environment and can interact with it and the user. On the basis of this information it is possible to increase user comfort. In the field of interior lighting, such "smart" concepts for increasing user comfort are currently still in an early stage of development. Commercially available systems currently offer basic options for adjusting brightness and colour temperature via smartphone applications, for example. There are also individual products that offer brightness control. All these systems have in common that the user must actively intervene and the lighting cannot adapt adaptively to the spectral properties of the room.

2 Definition of an intelligent lighting system

The first step is to define the properties of an intelligent lighting system. Looking at common definitions shows two essential approaches: purely technical and involving people.



2.1 Technical definition

Heppelmann and Porter identify three main components of an intelligent lighting system: physical components, smart components and connectivity components [1]. Physical components represent all electrical and mechanical elements of a lighting system that are essential for its function. Such functions, which represent specific product properties through sensors, smartphone applications etc. and extend the basic function of the luminaire, are referred to as smart components. The provision of communication to smartphones or a higher-level building management system is represented by connectivity components.

2.2 Biological-technical definition

In contrast to the purely technical definition, the biological-technical definition according to Khanh et al. also considers the effect of light on humans and their interaction with the intelligent lighting system. For example, the system must be able to set the optimum lighting situation for the user. Visual, non-visual and individually adaptable parameters must be taken into account.

3 Research Topics

It is currently necessary to know the spectral properties of a room within the framework of a light installation. This requires either the spectral measurement of a room or knowledge of all components such as wall paint, furnishings, etc.. Based on these spectral data, the lighting of the room can now be adjusted accordingly. However, both variants require a considerable amount of time or technology. For this reason the idea of an intelligent lighting system exists. It is able to adapt dynamically within the room according to its target specifications. For this purpose, the luminaires need information about the room and the current spectrum of the area to be irradiated. In addition to this, however, information such as room occupancy, temperature and current weather data is also required. The latter provide information on the influence of outdoor light on the lighting system. For space and cost reasons, a compact and simple sensor system for recording room data is required. This work is intended to investigate to what extent multi-channel colour sensors are suitable for distinguishing between daylight and artificial light.

4 Test setup

For the experiment, a small factory hall was equipped with an intelligent lighting system. Sensor arrays were installed at various positions within the hall for this purpose. Figure 1 shows the positions of the sensor arrays inside the hall. In the following, sensor array 1 is examined as an exemplary example.

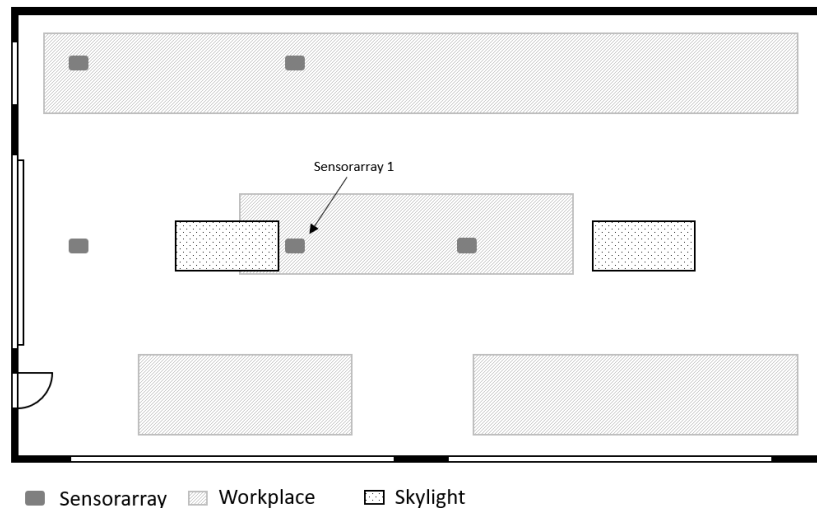


Figure 1: Positioning of the sensor arrays within the industrial hall

Each sensor array contains a 6-channel color sensor AS7262 [2], a Grideye IR sensor AMG8833 with 8x8 pixels [3] as well as a sensor for the acquisition of environmental data such as temperature, air pressure, humidity and air quality BME680 [4]. The sensor array is shown in Figure 2.

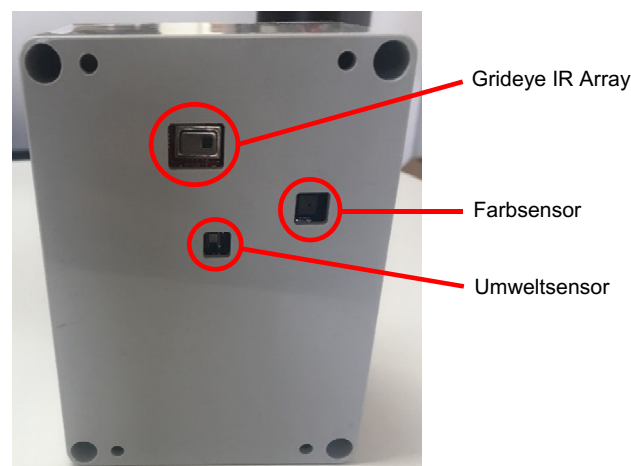


Figure 2: Underside of the sensor array

The respective sensor data are recorded and preprocessed by an ESP32 microcontroller. The microcontroller transmits the data via WiFi to a local edge computer. The Edge Computer has four tasks: Query of the weather data, processing and filtering of the sensor data, control of the lighting system and communication to a cloud. A server cluster at the TU Darmstadt is chosen as the cloud. All sensor and weather data are continuously stored in a Cassandra database running in the cloud [5].

5 Data evaluation

In order to obtain a usable data situation, data were recorded over a period of three months in the context of this work. This resulted in a total data set of 170 GB in CSV and JSON format [5]. Therefore, the collected data had to be aggregated and filtered first. The processing and visualization of the data was performed in Python 3.7 and Pandas.

Figure 3 shows an example of a line with a total of 145 million lines. This is formatted as a JSON file. JSON is a hierarchical, text-based representation of key/value pairs and is used especially in machine to machine communication as a file format.

```
1 {  
2   "index": "0",  
3   "mac": "B4E62DAC56A5",  
4   "room": "werk3",  
5   "time": "1557391580.1747217",  
6   "partition_id": "2735",  
7   "luminaires": "",  
8   "name": "None",  
9   "sensors": {  
10    "gas_resistance_env": "48.375",  
11    "humidity_env": "35.497",  
12    "pressure_env": "972.53003",  
13    "temperature_env": "26.87"  
14  }  
15 }
```

Figure 3: Raw data from database dump

First, all irrelevant key/value pairs and the JSON hierarchy are removed from the data record to simplify further processing with pandas. In the following step, the data was revised with regard to storage efficiency and readability. The Unix timestamp was translated into a readable date format and the MAC address was renamed to the name of the array. Finally, the data types of the respective measured values were reduced to the smallest possible data type. Thus, the data set could be reduced from 170 GB to about 50 MB without any relevant loss of information. The finished data set can be seen in Figure 4.

```
1 {  
2   "mac": "Node01",  
3   "time": "2019-05-09 10:46:20.654758",  
4   "gas_resistance_env": "48.375",  
5   "humidity_env": "35.497",  
6   "pressure_env": "972.53003",  
7   "temperature_env": "26.87"  
8 }
```

Figure 4: Filtered and preprocessed data set

6 Discussion

Figure 5 shows the sensor response of the 450nm channel of the color sensor over 24 hours of one of the installed sensor arrays. These indicate the measured irradiance in

$\mu\text{W}/\text{cm}^2$. The data were averaged to $T=60\text{min}$ to make a first qualitative statement. For the further consideration the 450nm channel is used as an example. There are three striking characteristics: On weekdays the sensor responses increase about one hour earlier compared to the weekend, the brightness curves of individual days show a strong variability (see Sat-Sun) and in the afternoons the curves are similar.

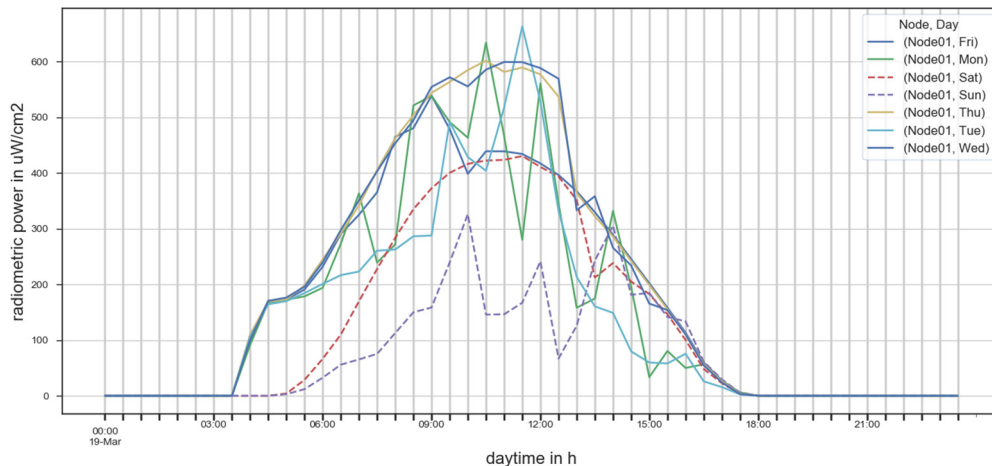


Figure 5: Sensor return values of the 450nm color channel of the AS7262 color sensor over $T=60\text{min}$ averaged for the daily courses of the weekdays Monday - Sunday

6.1 Time-delayed increase of sensor responses

On weekdays, sensor responses show a comparatively abrupt increase each day at the exact same time. On the other hand, the sensor response increases continuously on weekends. A comparison of the maxima of the individual sensor responses shows a difference of approx. $E=150\mu\text{W}/\text{cm}^2$ between working days and weekends. This difference can also be determined at the beginning of the day. Thus the conclusion is obvious that the artificial lighting is switched on at this time. This has an influence of approx. 15% of the total irradiance. An inquiry with the owner of the industrial hall confirmed this assumption.

6.2 Variations in the brightness curve

The days Tuesday, Wednesday and Saturday show in the measurement a brightness curve correlating to the time of day. On the remaining days, on the other hand, significant fluctuations can be observed as shown in Figure 6. As these occur both on weekdays and at weekends, therefore under pure daylight as well as under mixed light, external influences can be assumed. One possible cause can be changing weather conditions, especially the degree of cloud coverage. The verification of this hypothesis will be carried out in the context of a further work.

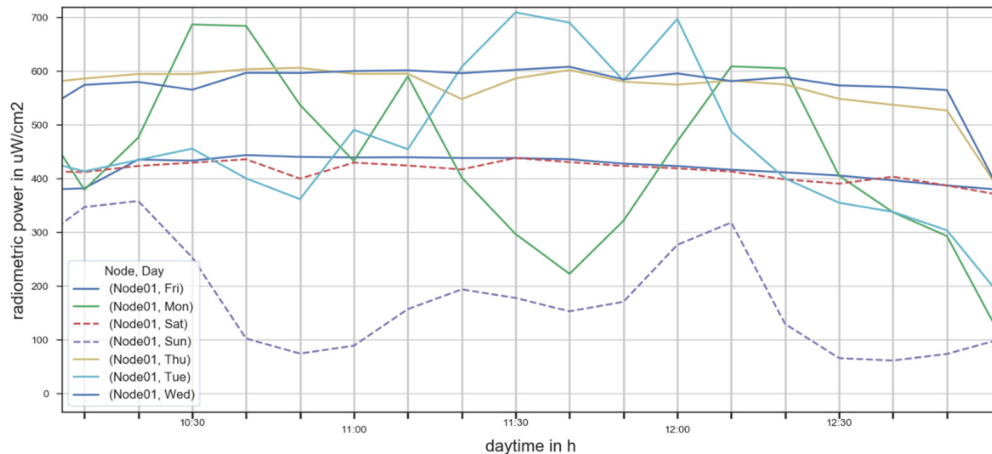


Figure 6: Strong variations of the individual sensor channels

6.3 Adjusting course in the afternoon

Thirdly, a converging course of the sensor responses of all days in the early afternoon can be observed, as shown in Figure 7. The weekdays show a significant reduction of their sensor response by about $E=250\text{-}300\mu\text{W}/\text{cm}^2$. At this point two boundary conditions have to be considered: The shift of the daylight spectrum into the warm white range over the course of the day and the fact that the 450nm channel of the sensor is considered here [6]. Taking these boundary conditions into account, it is assumed that the hall lighting will be switched off in the early afternoon. This was also confirmed after consultation with the hall operators.

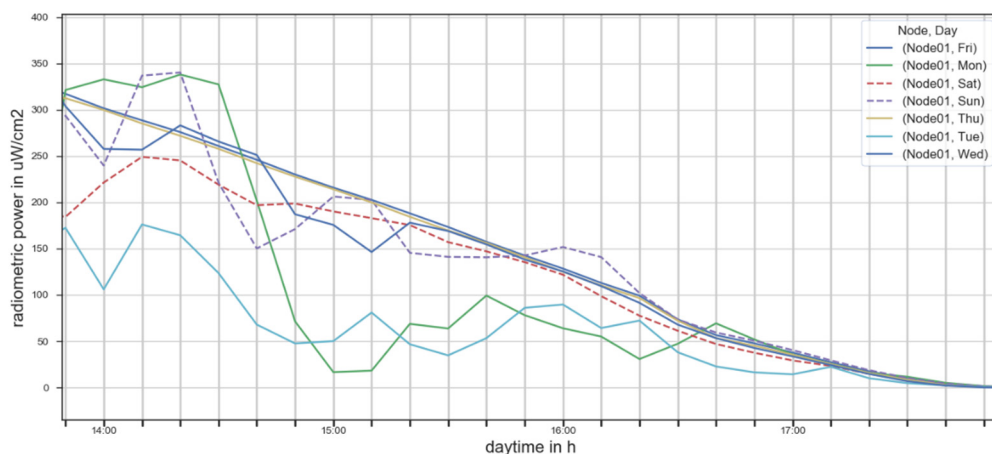


Figure 7: Converging course of sensor responses in the afternoon hours

7 Conclusion and outlook

In the context of this work, an initial evaluation was carried out regarding the use of a multi-channel colour sensor to differentiate between artificial light and daylight in smart

industrial hall lighting. Common patterns in the course of the sensor response are shown as a function of the day of the week. On working days, the sensor responses increase with time. A higher irradiance of about $E=150\mu\text{W}/\text{cm}^2$ is also recorded. The assumption that the hall lighting would be switched on was confirmed after consultation with the hall operator. Similarly, the switching off of the hall lighting could be detected.

In addition, the irradiance recorded during the course of the day fluctuated strongly in some cases. However, the presumption of the influence of the degree of cloud cover was not investigated in the context of this work. This offers a starting point for further investigations. In this respect the correlation between cloudiness and response of the colour sensor should be examined. The sensor responses of the remaining spectral channels should also be examined with respect to the spectral distribution of daylight.

8 References

- [1] M.E. Porter, J.E. Heppelmann, How smart, connected products are transforming competition, Harvard Business Review 2014, 92: 64–88.
- [2] ams AG, Datasheet AS7262, https://ams.com/documents/20143/36005/AS7262_DS000486_2-00.pdf/0031f605-5629-e030-73b2-f365fd36a43b, 25.06.2019
- [3] Panasonic Industry Europe GmbH, Datasheet AMG8833, <https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/ADI8000/ADI8000C66.pdf>, 25.06.2019
- [4] Bosch Sensortec GmbH, Datasheet BME680, <https://ae-bst.resource.bosch.com/media/tech/media/datasheets/BST-BME680-DS001.pdf>, 25.06.2019
- [5] Vohra, D., NoSQL web development with Apache Cassandra, Boston Cengage Learning, Boston, 2016
- [6] CIE Standard S 011/E:2003, Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky

Harmonic distortions from LED lighting in industrial buildings

Assoc. Prof. Orlin Lyubomirov Petrov, PhD

Eng. Angel Kostadinov Musev – PhD Student

University of Ruse; Ruse; BULGARIA

opetrov@uni-ruse.bg

Abstract

In recent years, there was increased use of advanced light sources with electronic control gear (LED Sources). This inevitably affects the generation of harmonic pollution in the power grids for lighting.

The report presents a study of harmonic pollution in industrial power grids for lighting. The aim of the study was to analyze the impact of modern LED sources on the quality of energy in industrial lighting power grids.

Since it is usually in the industry, lighting networks have a large number of luminaires and high power, the impact of the generated harmonics on the power supply parameters is noticeable.

A particular lighting facility of a medium-sized industrial building was investigated.

The study is done with the operation of the lighting system. Various electrical parameters were measured using a network analyzer. Results are displayed after processing the measured data.

There are made appropriate conclusions from the study.

Index Terms: LED harmonics, harmonic pollution, LED drivers

1 Introduction/Einleitung

The use of LED lights is now also targeting on the industry, which, until a few years ago, has created complications and sometimes inability to use them. With the use of modern materials and electronic components, a number of difficulties have been overcome in the creation of industrial LED lighting fixtures. LED Luminaires with a very good optical system, high light output LED modules, very good cooling systems and, of course, improved power supplies are already in use.



The purpose of the study is to determine some electrical parameters of already built-in LED industrial lighting fixtures and to assess their impact on the energy system.

2 Exposition

For the purpose of this work, an industrial hall (main use is as a brewery) with dimensions 18 x 10 m and a height of 6 m is used. There are positioning 9 industrial LEDs of the type shown in Fig. 1., with the technical parameters listed in tabl. 1.



Figure 1. LED industrial luminaire Variant P60

Table 1.

Technical characteristics of the tested luminaire

Model	Variant P60
LED Chip	CITIZEN
LED Driver	Meanwell
Power Factor	> 0.95
Input Voltage	100 – 260 V
Electrical Power	60 W
Luminous Flux	7800 Lm

Type of light	DayLight
Color temperature	5000 K
Index on Color Rendering	> 80 Ra
Working range	-35 °C to +60 °C
Protection	IP 54
Operating Life	over 50 000 h
Body	Aluminum

In the study room was realized: average illumination 307 lx; UGR = 9; Uniformity 0.65. The lighting system meets the requirements of EN 12464 for interior lighting.

In Fig. 2 are shown data from the light technical calculations for the industrial premises.

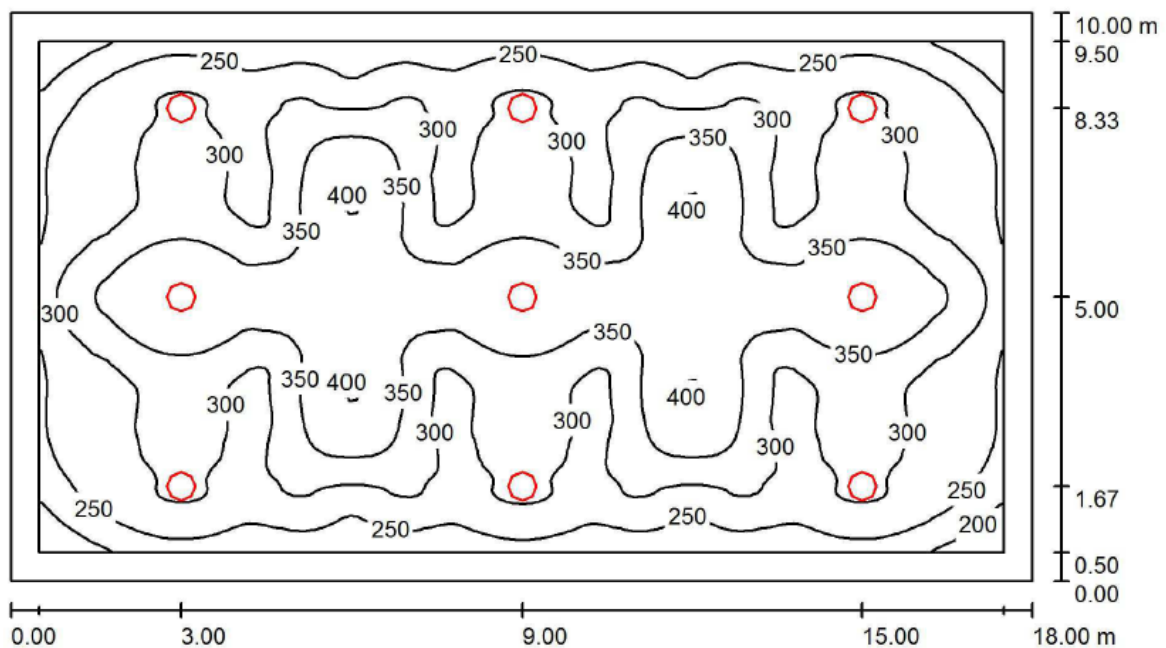


Figure 2. Results from the light technical calculations for the industrial premises

An power network analyzer - BMR Power Line Analyzer PLA33DL with very good technical parameters and good measuring accuracy, was used to study the electrical parameters of the power supply network. The measurement was carried out for one working week in the autumn-winter period, with the recording interval of the parameters being 5 minutes. The requirements of the standards EN 61010-1, EN 61000 were met.

After processing the obtained results, averaged values of the electrical parameters presented was calculated and shown in Table 2. Fig. 3.1 - 3.3 presents the graphical dependencies of the electrical parameters of the lighting system.

Table 2.**Measurement of the electrical parameters of the industrial premises****Voltage parameters**

Harmonic, Y	Y _u , V	Y _u , %
1	224,2	100
3	1,1	0,5
5	3,8	1,7
7	0,5	0,2
9	1,4	0,6
11	0,4	0,2
13	1	0,4
15	0,8	0,4
17	0,4	0,2
19	0,2	0,1

P =	0,568 kW
S =	0,585 kVA
cos φ =	0,969
PF =	0,917
Q =	-0,017 kVAr

THD U =	1,9 %
RMS =	224,1 V

Current parameters

Harmonic, Y	Y _i , A	Y _i , %
1	2,77	100
3	0,61	22,6
5	0,21	7,5
7	0,11	3,8
9	0	0
11	0	0
13	0	0
15	0	0
17	0	0
19	0	0

THD I =	22,6 %
RMS =	2,75 A

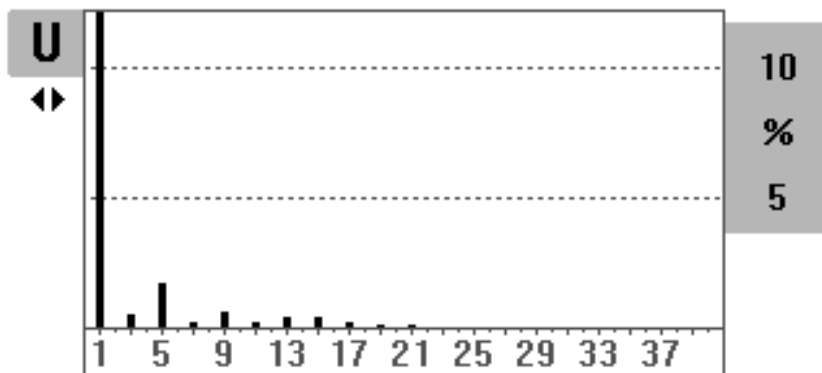


Figure 3.1. Generated Harmonic Voltage Pollution

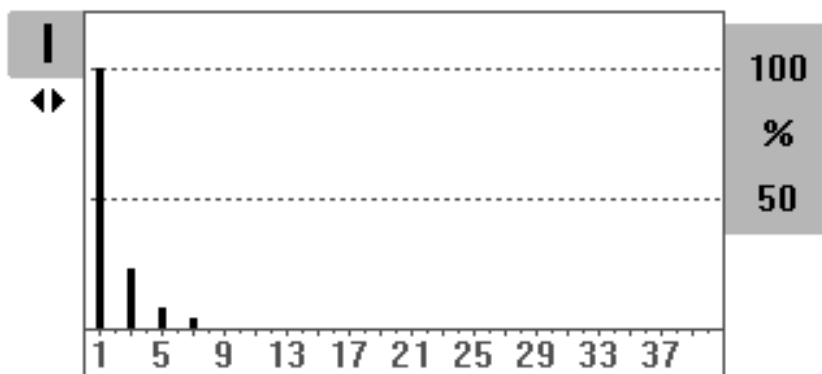


Figure 3.2. Generated Harmonic Current Pollution

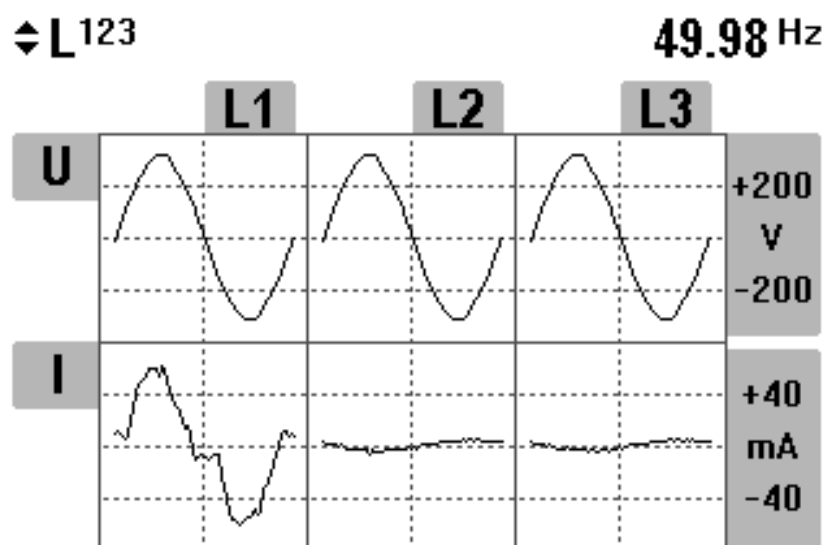


Figure 3.3. Form of the sinewave of the supply voltage and current

From the studies made it is clear that the generated higher voltage harmonics (THD U = 1.9%) are of very low value, ie. should not have a significant impact on the general power supply parameters. The harmonic current component (THD I = 22.6%) has a slightly increased value, but given the low power of the system it will not have a significant effect on the mains. This is mainly due to the quality driver used to power the LED luminaire. The realized electrical parameters $\cos \varphi$ and PF have excellent values close to 1.

3 Conclusion

1. The electrical parameters of a small industrial lighting system were studied. LED industrial lighting luminaires of 60 watts are used.
2. It was found that the main problem is the generated harmonic current pollutions (THD I = 22.6%), which is not very large, but with higher power of the system will affect the power supply network.
3. It has been found that with the use of a quality power module, the electrical parameters of the lighting system are close to or corresponding to those required by the standard EN 61000.

4 References

- [1] Dimitrijević, M., Litovski, V., Power Factor and Distortion Measuring for Small Loads Using USB Acquisition Module, *Journal of Circuits Systems and Computers* 20 No. 5, pp. 867–880, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, Aug 2011
- [2] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, Or Unbalanced Conditions, IEEE Std, pp. 1459-2010, March 2010.
- [3] IESNA Lighting Handbook, 10th edition, ISBN 978-0-87995-241-9.
- [4] Majithia CA, AV Desai, AK Panchal, Harmonic analysis of some light sources used for domestic lighting, *Lighting Res. Technol.* 2011; 43: pp. 371–380, DOI 10.1177/1477153510394597
- [5] Tagare, D. M., *Reactive Power Management*, McGraw-Hill Education, 2007.
- [6] Verderber RR, Morse OC, Alling WR. Harmonics from compact fluorescent lamps. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1993; 29: pp. 670–674
- [7] Wakileh, J. G., *Power Systems Harmonics*, Springer, 2001.
- [8] Webster, J. G., *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, IEEE Press, 1999.

Auswirkung von spektral moduliertem Licht auf die Photosynthese von Pflanzen

Jens Balasus, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Abstract

Für einen profitablen Anbau von Pflanzen in geschlossenen Kultursystemen ist der Einsatz elektrischer Energie zu optimieren. Wesentlich hierfür ist das Erlangen von Kenntnissen über den Zusammenhang zwischen Bestrahlungssituation und Pflanzenwachstum. Als potentiell Maß für die Wachstumsleistung gilt die Photosyntheserate der Pflanze, die durch die Messung der CO₂-Aufnahme eines Blattes ermittelt wird. Von Vorteil ist hierbei, dass Auswirkungen auf die Photosynthese im Gegensatz zum Wachstum direkt messbar sind. Aus diesem Grund wird zunächst der Einfluss von verschiedenen Bestrahlungsspektren auf die Photosyntheserate untersucht.

Das Ergebnis zeigt, dass die spektrale Zusammensetzung des Lichts messbare Auswirkungen auf die Photosyntheserate hat. Um zukünftig den Zusammenhang zwischen Photosyntheserate und Pflanzenwachstum zu untersuchen zeigt der Ausblick, wie hierfür Versuchsstände in weiteren Studien aufgebaut sein können. Mit diesen können verschiedene Wachstumsparameter erfasst, und damit wiederum Korrelationen festgestellt werden.

1 Einleitung

Geschlossene Kultursysteme ermöglichen jahreszeitenunabhängigen, lokalen Gemüseanbau in beständiger Qualität, indem in kontrollierten und reproduzierbaren Umgebungen optimale Bedingungen für Pflanzen geschaffen werden. Sie ermöglichen die genaue Überwachung und Modifikation von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Konzentration der Luft, Nährstoffversorgung und Licht. Dies erlaubt eine deutliche Reduktion des Verbrauchs von Wasser und Düngemitteln und den gänzlichen Verzicht auf Pflanzenschutzmittel [1]. Gleichzeitig bedeutet dies einen erhöhten Bedarf an elektrischer Energie für die Bestrahlung mit Kunstlicht [1].

In dieser Untersuchung werden zunächst die Grundlagen der Pflanzenbestrahlung erläutert und anschließend ein Prinzip zur Messung der Photosynthese vorgestellt.



2 Licht und Photosynthese

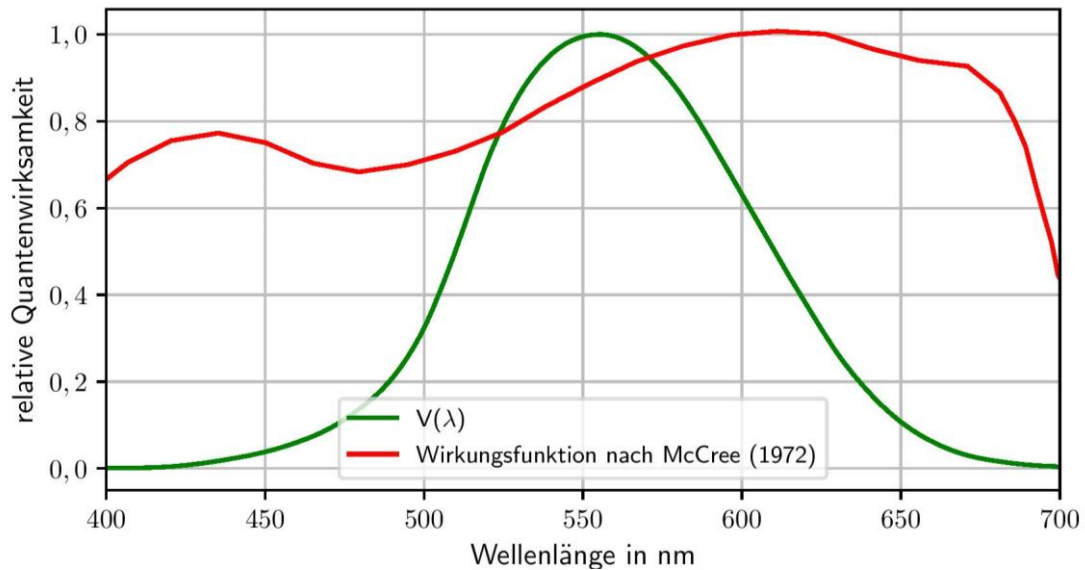


Abbildung 1: $V(\lambda)$ -Kurve und Photosynthese-Wirkungsfunktion nach McCree [2] im Vergleich. Deutlich zu erkennen sind die Unterschiede im kurzwelligen blauen und im langwelligen roten Bereich.

Pflanzen benötigen Photonen um Photosynthese zu Betreiben. Abb. 1 beschreibt die Effizienz der Photosynthese unter Einfluss von monochromatischem Licht. Aus dieser Abbildung geht hervor, dass die Wellenlängen, die für die Photosynthese am wichtigsten sind, durch die $V(\lambda)$ -Kurve sehr schwach gewichtet werden. Die $V(\lambda)$ -Kurve besitzt ihr Maximum bei 555 nm und beschreibt die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges im photopischen Bereich. In diesem Bereich ist die Photosynthese jedoch am ineffizientesten. Eine mit der Hellempfindlichkeit des Auges gewichtete Größe, wie in der Lichttechnik üblich, ist zur Beschreibung von Pflanzenbestrahlung also nicht sinnvoll. Die Verwendung von energetischen Größen ist ebenfalls nicht sinnvoll, da diese nicht berücksichtigt, wie viele Photonen tatsächlich zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund werden photon-basierte Größen verwendet. Eine Umrechnung von lichttechnischen und energetischen in photon-basierte Größen ist möglich, sofern ein Relativspektrum und eine absolute Größe, oder das Absolut Spektrum zur Verfügung stehen. Die Umrechnung erfolgt für diskrete Werte gemäß folgender Formel:

$$X_p = \frac{1}{N_A \cdot h \cdot c} \int \lambda \cdot X_e(\lambda) \cdot d\lambda$$

Hierbei ist N_A die Avogadro Konstante, h das Planck'sche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit, λ die Wellenlänge, $X_e(\lambda)$ der wellenlängenabhängige Strahlungsfluss und X_p der berechnete Photonenstrom.

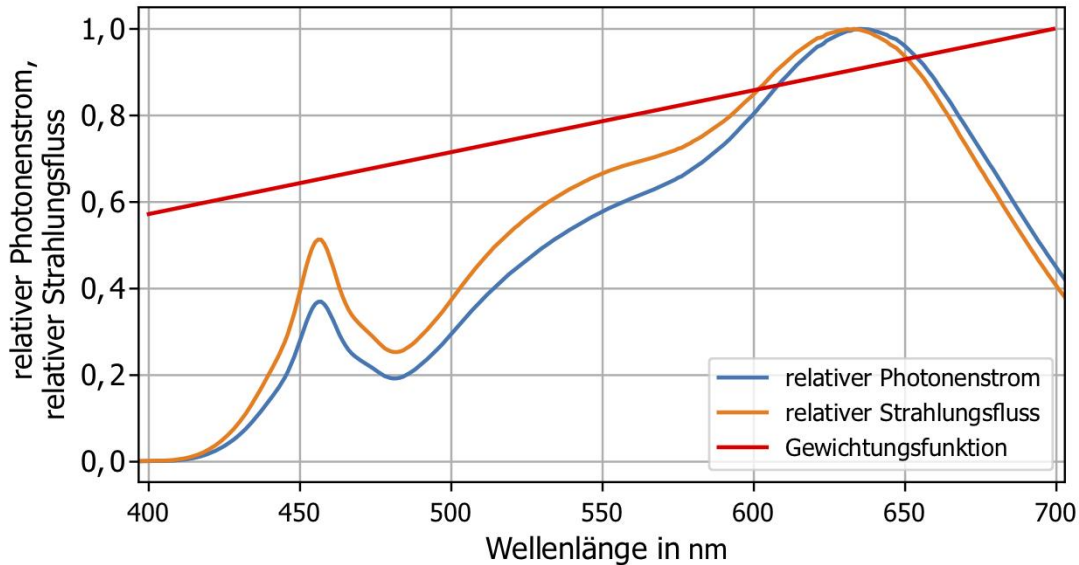


Abbildung 2 relativer Photonenstrom und relativer Strahlungsfluss einer weißen LED im Vergleich. Zu erkennen sind die deutlichen Unterschiede der relativen Verteilung im blauen Bereich.

In Abbildung 2 sind die Gewichtungsfunktion und exemplarisch ein Spektrum des relativen Strahlungsflusses und des relativen Photonenstroms einer weißen LED dargestellt. Hierbei sind, insbesondere im blauen Bereich, deutliche Abweichungen der relativen Verteilung ersichtlich.

3 Messung der Photosynthese

Im Prozess der Photosynthese wandelt die Pflanze Wasser und aufgenommenes Kohlenstoffdioxid unter Abgabe von Sauerstoff in organische Substanzen. Die Aufnahme von CO_2 ist damit ein Maß für die Effizienz der Photosynthese. Diese kann mit einem Gaswechsellmessgerät gemessen werden. In diesem Gerät wird das Blatt einer Pflanze in einer Küvette eingeklemmt, beleuchtet, und mit einem definierten Messgas umströmt. Die Luftfeuchtigkeit, sowie der CO_2 -Gehalt des Messgases werden auf einen eingestellten Wert geregelt. Vor und nach dem Umströmen des Blattes wird der CO_2 -Gehalt des Gases gemessen. Die hierbei auftretende CO_2 -Differenz entspricht der von dem Blatt aufgenommenen CO_2 -Menge. Nach diesem Prinzip ist es nun möglich, die Photosyntheseleistung eines Blattes unter verschiedenen Bestrahlungssituationen zu bestimmen. Das aufgenommene CO_2 , aufgetragen über der Photonenstromdichte, wird hierbei als Lichtantwort beschrieben. Eine mögliche Lichtantwort ist in idealisierter Form in Abbildung 3 dargestellt.

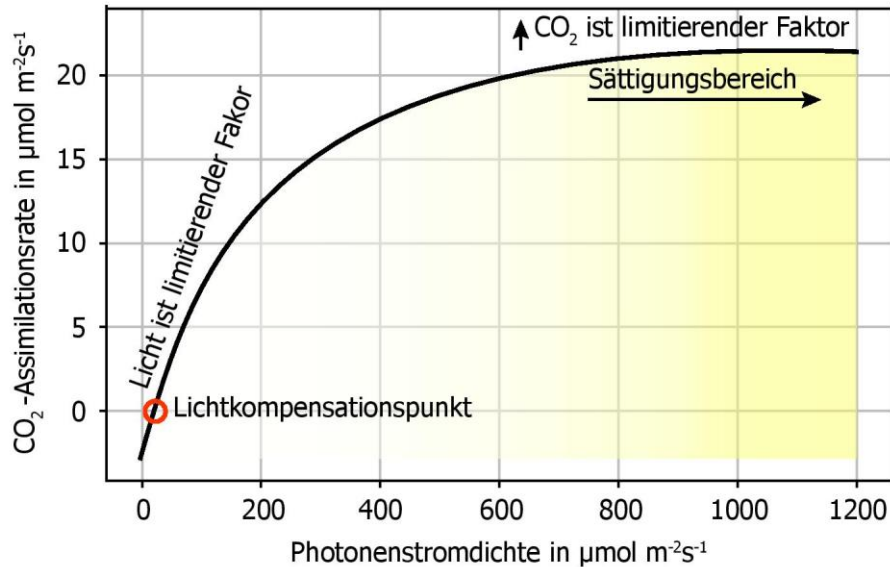


Abbildung 3 exemplarische Lichtantwort mit charakteristischen Punkten.

Es ist grundsätzlich zwischen Brutto- und Nettphotosynthese zu unterscheiden, da auch bei Pflanzen eine Atmung (Dissimilation) stattfindet. Hierbei wird CO₂ abgegeben und O₂ aufgenommen. Aus diesem Grund ist bei Dunkelheit eine negative CO₂-Assimilationsrate zu messen. Wird ein Blatt unter konstanter CO₂-Konzentration der Umgebungsluft gehalten und die Photonenstromdichte schrittweise erhöht, so tritt ein Punkt in Erscheinung, an dem sich die CO₂-Aufnahme und die CO₂-Abgabe kompensieren. Bei Bestrahlung laufen Assimilation und Dissimilation parallel ab. Dementsprechend gibt es einen Punkt, an dem diese gleich groß sind. Dieser in Abbildung 3 eingezeichnete Punkt wird als Lichtkompensationspunkt der Photosynthese bezeichnet. Er gibt an, wie viel Licht erforderlich ist, um CO₂-Verluste durch die Atmung zu kompensieren. Ebenso liefert er Auskunft über die auf lange Sicht zum Überleben der Pflanze erforderliche Photonenmenge. Ein Wachstum findet in diesem Zustand jedoch nicht statt. Wird die Photonenstromdichte über den Lichtkompensationspunkt hinaus erhöht, so steigt auch die Nettphotosynthese an. Die Photosynthese steigt mit dem Photonenstrom an, bis sie in einen Sättigungsbereich gelangt. In diesem Bereich ist trotz Erhöhen der Lichtintensität keine Steigerung der Photosynthese mehr möglich, da die Assimilationsrate der Pflanze durch das zur Verfügung stehende CO₂ limitiert wird. [3]

4 Angepasste Bestrahlungseinheit für das Gaswechsellmessgerät



Abbildung 4 Gaswechsellmessung an dem Blatt einer Spinatpflanze

Die im vorherigen Abschnitt erläuterte Lichtantwort kann mit einem Gaswechsellmessgerät gemessen werden. Dieses ist herstellerseitig mit einer Leuchte ausgestattet, die ein konstantes LED-Spektrum besitzt. Hierbei kann lediglich die Intensität variiert werden, jedoch nicht die spektrale Zusammensetzung des Lichtes. Aus diesem Grund wird eine neue Leuchte inklusive einer Ansteuerelektronik aufgebaut, die darüber hinaus eine Variation der spektralen Zusammensetzung erlaubt. Zusätzlich lässt sich diese mit der Messsoftware des Herstellers ansteuern und erlaubt daher die automatisierte Messung beliebiger Bestrahlungssituationen. Die aufgebaute Bestrahlungseinheit besteht aus 450 nm und 660 nm LEDs. Bei maximaler Bestromung kann somit eine Photonenstromdichte von $1800 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$ bzw. $1750 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$ erreicht werden. Die Photonenstromdichte an einem unbewölkten Sommertag beträgt im Freiland ca. $2000 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$. Die Bestrahlungseinheit auf der Küvette mit dem eingespannten Blatt einer Spinatpflanze ist in Abbildung 4 dargestellt.

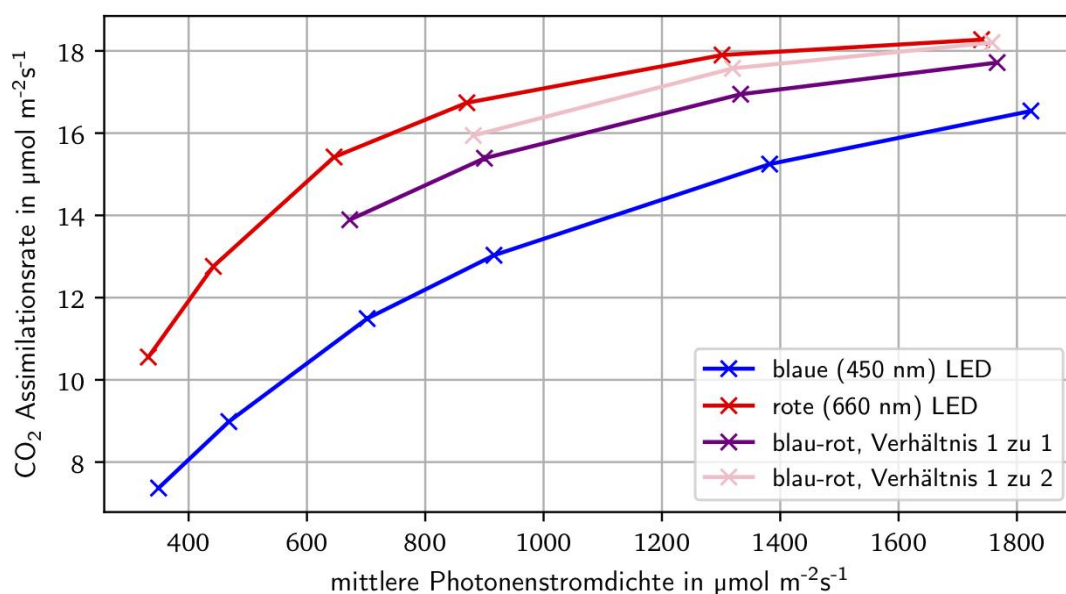


Abbildung 5 Lichtantworten eines Spinatblattes bei Bestrahlung mit verschiedenen blau/roten LED-Spektren.

Mit der neu gebauten Bestrahlungseinheit werden verschiedene spektrale Verhältnisse eingestellt und die CO₂ Aufnahme des Blattes einer zwei Wochen alten Spinatpflanze gemessen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Bei der Messung wird jeweils mit der höchsten Intensität gestartet und das Blatt mit dieser für 20 Minuten beleuchtet. Im Anschluss werden drei Messungen der CO₂ Aufnahme durchgeführt und diese gemittelt. Anschließend wird die Intensität auf die nächstniedrigere Intensitätsstufe gestellt und das Blatt für vier Minuten beleuchtet. Daraufhin erfolgt die Messwertaufnahme. Diese Reihe wird fortgesetzt, bis die Messung bei der niedrigsten Photonenstromdichte abgeschlossen ist. In Vorversuchen zeigte sich bei der Erstbestrahlung mit maximaler Intensität eine Stabilisierung des Messwertes nach 20 Minuten. Bei einer nachfolgenden Bestrahlung mit geringerer Intensität betrug die Adaptationszeit lediglich vier Minuten.

In dem Experiment wird zunächst eine Lichtantwort mit der roten 660 nm-LED aufgenommen, im Anschluss daran eine Lichtantwort mit der blauen 450 nm-LED. Schließlich werden beide LEDs gleichzeitig mit unterschiedlichen Verhältnissen aktiviert. Emitieren sowohl die blaue als auch die rote LED die gleiche Anzahl an Photonen, so beträgt das Verhältnis 1:1. Zusätzlich wird das Verhältnis 1:2 eingestellt. Die höchste Assimilationsrate wird bei Bestrahlung mit ausschließlich rotem Licht erzielt. Jedoch erreicht auch eine Bestrahlung mit blauen und roten LEDs im Verhältnis von 1:2 die gleiche Assimilationsrate, bei entsprechend hoher Intensität. Die niedrigste Rate erreicht eine Bestrahlung mit ausschließlich blauem Licht.

Das Experiment zeigt, dass der neu entwickelte Aufbau geeignet ist, um spektrale Einflüsse auf die Photosyntheserate zu untersuchen. Es kann damit zukünftig in weiteren Untersuchungen eine Vorauswahl von Spektren für Wachstumsversuche getroffen werden. Die Spektren, welche die höchste Photosyntheserate bewirken, müssen in jedem Fall in einem Wachstumsversuch auf ihre Langzeitwirkung überprüft werden, da durch das Licht neben der Assimilationsrate weitere wichtige Prozesse der Pflanze gesteuert werden.

5 Konzept zur Optimierung von Bestrahlungsspektren mittels Wachstumsversuchen

Neben der Photosynthese wirkt Licht auch auf Photorezeptoren von Pflanzen und beeinflusst diese dadurch in ihrer Entwicklung. Die bisherige Untersuchung betrachtete lediglich die Wirkung der Photosynthese an einem definierten Blattausschnitt. Bildet eine Pflanze jedoch unter einer Bestrahlungssituation besonders große Blätter aus, so wirkt sich dies auf die absolute CO₂-Assimilation der ganzen Pflanze aus. Diese Effekte müssen für eine Optimierung ebenfalls berücksichtigt werden. Deshalb fließt deren messtechnische Bestimmung in das Versuchskonzept mit ein.

Zur Optimierung der Bestrahlung ist es erforderlich, neben der Photosynthese weitere Parameter zu erfassen. Einen geeigneten Parameter stellt die projizierte Blattfläche der Pflanze dar, welche ein Maß für die CO₂-Assimilation der gesamten Pflanze ist.

Diese kann mit einer Kamera erfasst werden. Neben der projizierten Blattfläche wird auch das Gewicht der Pflanzen kontinuierlich erfasst. Damit ist es möglich, auch Unterschiede in der Wachstumsgeschwindigkeit zwischen verschiedenen Versuchsgruppen zu detektieren. Die Messung mehrerer Größen in zeitlichen Abständen von einer Stunde erlaubt gegenüber herkömmlichen Wachstumsversuchen, bei denen die Pflanzen nach einer bestimmten Zeitdauer abgeerntet werden, einen gesteigerten Erkenntnisgewinn. So ist es auch möglich, während des Versuchs die Bestrahlungssituation zu ändern und zu messen, nach welcher Zeit dies Auswirkungen auf das Wachstum der Pflanzen hat.

Zukünftig werden Wachstumskammern gebaut, um parallel mehrere Versuche durchführen zu können. Die bereits genannte Messtechnik wird in diesen Kammern integriert. Damit kann eine umfassende Optimierung des Bestrahlungsspektrums erfolgen. Durch die Vielzahl der erfassten Parameter und der gegenüber konventionellen Versuchen erhöhten Datenlage soll zudem überprüft werden, ob eine Optimierung der Bestrahlung mittels künstlicher Intelligenz möglich ist.

6 Fazit und Ausblick

Die bisherige Untersuchung zeigt, dass mit dem aufgebauten System die Auswirkung verschiedener Bestrahlungssituationen auf die Photosynthese gemessen werden kann. Dies stellt eine wichtige Basis zur weiteren Erforschung von Licht auf Pflanzen dar. Die aufgebaute Leuchte inklusive deren Ansteuerelektronik sind so gestaltet, dass diese zukünftig auch mit weiteren LED-Spektren ergänzt werden können. Damit ist es möglich, vielfältige LED-Spektren in ihrer Wirkung auf die Photosynthese zu untersuchen. Die Messung der Assimilationsrate kann in vergleichsweise kurzer Zeit von ca. 40 Minuten erfolgen. Verglichen mit einem Wachstumsversuch, der im Fall von Spinatpflanzen ca. 2 Wochen benötigt, können hierbei innerhalb kurzer Zeit potentiell geeignete Spektren erarbeitet werden. Mit diesen sind anschließend Wachstumsversuche über einen längeren Zeitraum durchzuführen um auch die physiologischen Auswirkungen des Lichtes auf die Pflanzen zu untersuchen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] T. Kozai, Smart Plant Factory: The Next Generation Indoor Vertical Farms, Springer Singapore, 2018.
- [2] K. J. McCree, „The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants,“ *Agricultural Meteorology*, Bd. 9, pp. 191-216, 1971.

[3] P. Schopfer und A. Brennicke, Pflanzenphysiologie, 7. Auflage Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2016.

Methode zur Messung des Einflusses von Lichtimpulsen auf die visuelle Leistungsfähigkeit

Helmer, Melanie; Neumann, Cornelius

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)

Engesserstraße 13, Geb. 30.34, 76131 Karlsruhe

Tel. 0721-608 46735, M.Helmer@kit.edu, www.lti.kit.edu

Abstract

Fahrten im Straßenverkehr sind durch sich ständig verändernde Lichtsituationen charakterisiert, die sowohl zeitlich als auch örtlich eine hohe Dynamik aufweisen. Ist die Dynamik innerhalb des Gesichtsfeldes des Beobachters so hoch sodass es das Auge nicht schafft sich entsprechend anzupassen, wird dies als Blendung bezeichnet. Während dieses Anpassungsprozesses verfügt das visuelle System nicht über seine optimale visuelle Leistungsfähigkeit, sodass potentiell gefährliche Objekte unter Umständen zu spät oder gar nicht erkannt werden können. Um das damit verbundene Gefährdungspotential besonders in Blendsituationen mithilfe von Probandenstudien evaluieren zu können, wurde eine objektive Messmethode, die sogenannte MeLLI-Methode (Masurement of glaring Light stimuli with Letter Identification) entwickelt und erfolgreich validiert.

1 Blendung im Straßenverkehr

Sowohl im Bereich der automobilen als auch der allgemeinen Lichttechnik ist das Thema Blendung bereits seit mehreren Jahrzehnten ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt. Folglich wurden bereits verschiedene Methoden zur Bewertung der Blendung entwickelt. Eine Übersicht hierzu liefert Völker [2], in der außerdem die unterschiedlichen Maßzahlen, Einflussfaktoren und Modelle zur Bewertung physiologischer Blendung zusammenfasst.

Als Maßzahlen werden ΔVL als Differenz zwischen ursprünglicher und der unter Blendeinfluss reduzierten visuellen Leistungsfähigkeit sowie die Readaptationszeit t_R als die Zeit, die das Auge benötigt um die ursprüngliche Leistungsfähigkeit nach erfolgter Blendung wiederherzustellen, verwendet.



1.1 Charakterisierung der Blendsituationen im Straßenverkehr

Sobald eine Blendsituation im Gesichtsfeld des Beobachters auftritt, beginnt das Auge sich an diese anzupassen. Dieser Vorgang ist nach [3 bis 5] von folgenden Parametern abhängig:

- Blendimpulsdauer t_B
- Position und Bewegung der Blendquelle im Gesichtsfeld des Beobachters
- Verhältnis von Basis-Adaptationsleuchtdichte bzw. Basis-Beleuchtungsstärke und Blend-Adaptationsleuchtdichte bzw. Blend-Beleuchtungsstärke am Auge.

Wie bereits in anderen Veröffentlichungen [1, 6, 7] gezeigt werden konnte, zeichnen sich Blendsituationen im Straßenverkehr durch verhältnismäßig kurze, aber gleichzeitig sehr hohe Beleuchtungsstärkeniveaus am Auge aus. Außerdem verändert sich die Position der Blendquelle aufgrund der Fahrdynamik innerhalb des Gesichtsfeldes. Folglich ergibt sich insgesamt eine örtlich dynamische und zeitlich sehr kurze Situation, die es hinsichtlich der Blendung zu bewerten gilt.

1.2 Blendungsbewertung von Situationen im Straßenverkehr

Um das Blendpotential von Scheinwerfern bewerten zu können, hat das amerikanische *Insurance Institute of Highway Safety* bereits im August 2015 die erste Version des Headlight Test and Rating Protocols veröffentlicht, das seit Juli 2018 in der dritten Version vorliegt [8]. In diesem Dokument sind umfangreiche Anforderungen an das Fahrzeug und die Versuchsbedingungen gestellt, die dazu dienen sollen den Messablauf zu standardisieren sodass vergleichbare Ergebnisse gewährleistet werden können. Dem Verfahren liegen jedoch ausschließlich subjektive Blendungsbewertungen aus Probandenstudien zugrunde. Die beiden zuvor definierten notwendigen Maßzahlen ΔVL und t_R können hieraus nicht abgeleitet werden.

Etablierte Methoden zur Blendungsbewertung, wie die Schwellenkontrast-, Readaptationsmethode und Methode nach Greule sind Methoden, mit deren Hilfe der Einfluss auf die visuelle Leistungsfähigkeit zwar messbar gemacht werden kann, die Positionsänderung der Blendquelle innerhalb des Gesichtsfeldes jedoch nicht berücksichtigen. Für weitere Erklärungen hierzu sei auf [1, 9] verwiesen.

2 Methodenoptimierung

Grundlegend für die Entwicklung der MeLLI-Methode sind die Erkenntnisse, die aus bereits etablierten Methoden abgeleitet werden können. Folglich sind die drei wesentlichen Aspekte die Reaktionszeit, die Messauflösung und die Reizdarbietung.

2.1 Reaktionszeit

Um die Zeit t_R zu bestimmen, die das Auge nach einer Blendsituation zur Wiederherstellung der ursprünglichen visuellen Leistungsfähigkeit benötigt, werden

die Probanden stets gebeten einen Taster zu betätigen, also eine motorische Aktion auszuführen. Ist die zu erwartende Readaptationszeit t_R jedoch in der Größenordnung der motorischen Reaktionszeit, ist die Validität der Messergebnisse aufgrund der notwendigen motorischen Aktion in Frage zu stellen. Eine rein visuelle Aufgabe, ähnlich wie bei Greule [10], könnte Abhilfe schaffen, bringt allerdings neue Probleme in Bezug auf die vorhandene Messauflösung mit sich und im nächsten Abschnitt näher erläutert wird.

2.2 Optimierung der Messauflösung

Greule präsentierte seinen Probanden entweder einen Landolt-Ring oder einen von vier ausgewählten Buchstaben zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Blendimpuls in unterschiedlichen Kontrasten. So konnte er abhängig vom Zeitpunkt nach dem Blendimpuls ermitteln wie stark der Kontrast im Vergleich zu der Situation ohne Blendung erhöht werden muss, damit die Sehzeichen korrekt erkannt werden können. Diese Methode hat jedoch den Nachteil, dass zur Bestimmung der sogenannten Schwellenkontrasterhöhung eine Vielzahl von Messungen durchgeführt werden müssen. Übertragen auf den Anwendungsfall im Straßenverkehr würde dies wiederum bedeuten, dass die zu untersuchende Situation unverhältnismäßig oft durchlaufen werden muss sodass diese als nicht praktikabel angesehen werden kann.

Um dieser Problematik zu lösen zu können, kann der Fachbereich der kognitiven Psychologie herangezogen werden. Das visuelle Ultrakurzzeitgedächtnis oder auch ikonisches Gedächtnis genannt, wurde erstmalig von George Sperling [11] nachgewiesen. Dieser präsentierte den Probanden verschiedene Matrizen aus Buchstaben und Ziffern für teilweise weniger als 50 ms. Die Probanden hatten die Aufgabe so viele Buchstaben und Ziffern wie möglich an der korrekten Position wiederzugeben. Sperling konnte zeigen, dass es auch bei derart kurzen Darbietungszeiten möglich ist eine bestimmte Menge an Informationen, nämlich die der Anzahl der korrekt benannten Items, visuell aufzunehmen, kognitiv zu verarbeiten und wiederzugeben. In Bezug auf die Optimierung der Messauflösung bedeutet dies, dass den Probanden anstatt eines Items wie bei Greule auch mehrere Items dargeboten werden können. So kann die Anzahl der Korrekt benannten Items als Maß für den Blendeinfluss auf die visuelle Leistungsfähigkeit genutzt werden.

2.3 Optimierung der Reizdarbietung

Damit die Verwendung der Itemmatrix valide und vergleichbare Ergebnisse liefert, ist zunächst zu klären, wie diese hinsichtlich gesamter Matrixgröße, Itemanzahl und Itemanordnung gestaltet werden sollte.

Ausgehend vom gemäß CIE definierten Normalbeobachter, sollte die maximale Matrixgröße das 2°-Sichtfeld nicht überschreiten [12], damit alles auf einen Blick wahrgenommen und der Einfluss von Blickbewegungen ausgeschlossen werden kann.

Die Anzahl der dargebotenen Items orientiert sich vorrangig an der Kapazität zum Abruf der möglichen Informationsmenge. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse von Sperling zum Thema ikonisches Gedächtnis, Miller [13] zum Thema Kapazität des Arbeitsgedächtnisses und Hamilton, zitiert in [12], bzw. Walter [14] zum Thema Wahrnehmungsspanne zur Simultanerfassung wird die Anzahl der darzubietenden Items auf acht festgelegt.

Zur Festlegung einer geeigneten räumlichen Anordnung der Items wurde eine Probandenstudie durchgeführt [1, 15] und die Anordnung ausgewählt, welche sich als möglichst robust gegenüber der Darbietungszeit erwiesen hat. Dies bedeutet, dass sowohl bei kurzen als auch langen Darbietungszeiten vergleichbar viele Items erkannt wurden. Die Studie ergab, dass eine 2x4 mit 2°-Größe dieser Anforderung am besten gerecht wird.

Der Itempool umfasst die folgenden Buchstaben: C, D, F, H, K, M, N, P, R, S, T V, X und Z und wird in der Normschrift DIN 1451-2 dargeboten. Die Gründe für die Darbietung ausschließlich von Buchstaben und die Beschränkung auf oben genannten Zeichenpool erfolgt in [1, 16].

2.4 MeLLI-Methode

Anhand der vorgestellten Methodenoptimierung wurde eine Methode zur Blendungsbewertung entwickelt, die auf der Anzahl der korrekt benannten Buchstaben nach einem Blendimpuls basiert, engl.: Measurement of glaring Light stimuli with Letter Identification, kurz MeLLI-Methode, zur Blendungsbewertung entwickelt. Mithilfe dieser Methode ist es möglich sowohl die Maßzahl der relativen Visuellen Leistungsfähigkeit ΔVL als auch und die Readaptationszeit t_R gleichzeitig zu erfassen. Eine Prinzipskizze der Methode ist in Abbildung 1 zu sehen.

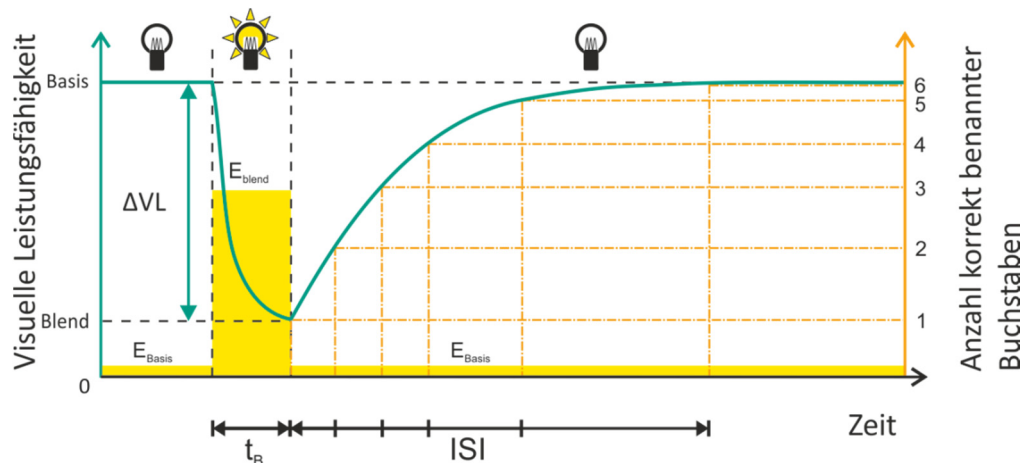


Abbildung 1 Prinzipskizze der MeLLI-Methode inkl. zeitlicher Verlauf der visuellen Leistungsfähigkeit anhand der Anzahl korrekt benannter Buchstaben in Abhängigkeit der gewählten Interstimulusintervalle (ISI) [1]

Wie anhand von Abbildung 1 ersichtlich ist, ist es über die Variation der Interstimulusintervalle, kurz ISIs, möglich den zeitlichen Verlauf nach dem Blendimpuls unter Berücksichtigung der Darbietungszeit der 2x4-Buchstabendmatrix zeitdiskret abzutasten. Zur Validierung der Methode wurden mehrere Probandenstudien durchgeführt.

3 Methodvalidierung

Zur Methodvalidierung wurden drei unterschiedliche Studien durchgeführt, die zum einen die zeitdiskrete Abtastung, den Einfluss variabler Blendimpulsdauern und die Kontrastsensitivität thematisieren. Im Folgenden wird exemplarisch die Studie zur zeitdiskreten Abtastung näher beschrieben.

3.1 Versuchsaufbau

Für die Studien wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, der sich an den Rahmenparametern von Freyer [17] orientiert und insgesamt reproduzierbare Bedingungen gewährleistet. Der Aufbau, der in Abbildung 1 Abbildung 2 als Draufsicht zu sehen ist, orientiert sich am Anwendungsfall im automobilen Kontext zur Blendungsbewertung entgegenkommende Scheinwerfer (Punkt B50L).

Innerhalb des Aufbaus sind die Blendquelle und der Monitor zur Matrixdarbietung auf der Augenhöhe des Probanden von 1,25 m montiert. Der Proband befindet sich in 2,5 m mit direktem Blick auf den Monitor. Die weiß gestrichene Wand wird so beleuchtet, dass eine homogene Fläche mit einer Helligkeit von 0,1 cd/m² entsteht. Dies entspricht einer typischen Adaptationsleuchtdichte im Straßenverkehr.

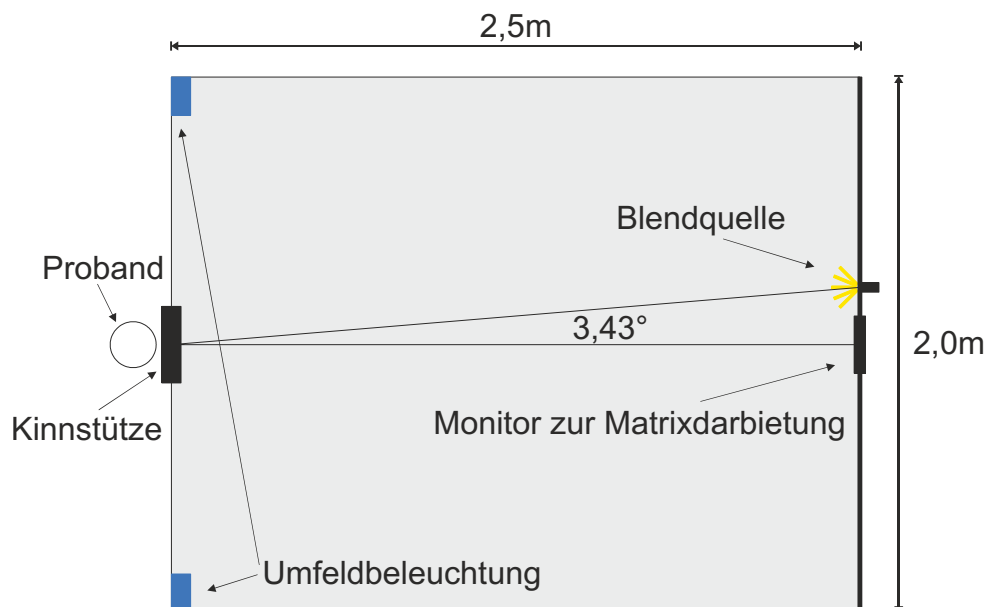


Abbildung 2 Draufsicht des Versuchsaufbaus

3.2 Versuchsdesign

Alle Studien wurden als within-subject-Design geplant und durchgeführt, wobei alle Probanden jede Situation mehrfach in randomisierter Reihenfolge durchlaufen. Wie bereits in Studien von Sperling [11] als auch eigenen Untersuchungen [7, 16] konnte gezeigt werden, dass von einem Lerneffekt der Probanden auszugehen ist. Die ersten zehn Durchläufe wurden folglich nicht bewertet und zum Einlernen der Probanden genutzt.

Das Probandenkollektiv wurde in allen Studien so gewählt, dass eine möglichst geringe Streuung der Messergebnisse bei gleichzeitiger hoher Vergleichbarkeit erreicht wird. Aufgrund der altersbedingten Streulichtbildung im Auge wurde das Maximalalter auf 30 Jahre festgelegt. Außerdem wurden Mindestvoraussetzungen hinsichtlich Visus und Kontrastsehvermögen unter photopischen und mesopischen Bedingungen abgetestet und nur die Probanden zum Versuch zugelassen, die diese erfüllen konnten.

3.3 Rahmenbedingungen zur Studie Zeitdiskrete Abtastung

Innerhalb der Studie zur zeitdiskreten Abtastungen, wurden die folgenden Rahmenparameter festgelegt:

- Blendimpulsdauer $t_B = 500 \text{ ms}$
- Blendbeleuchtungsstärke $E_B = 24 \text{ lx}$
- Darbietungszeit der Buchstabenmatrix $t_D = 50 \text{ ms}$
- Buchstabenkontrast: individuell bestimmter Schwellenkontrast mit Blendung K_S

In dieser Studie werden die Interstimulusintervalle (ISI) von 0 ms , 50 ms , 100 ms , 200 ms , 300 ms , 500 ms , 800 ms und 1000 ms untersucht. Für jedes Interstimulusintervall werden je fünf Messwerte erhoben.

3.4 Versuchsablauf

Zu Beginn erhielten die Probanden eine Instruktion zum Ablauf der Studie, sowie den Eingangsfragebogen zur Aufnahme der demographischen Daten. Anschließend erfolgte die optometrische Vermessung. Während der Adaptationzeit von 20 min wurde dem Probanden der Ablauf und die Aufgabenstellung noch einmal vorgelesen.

Dann absolvierte der Proband die studienspezifischen Durchgänge, wobei der erste ausschließlich dazu diente ihn mit dem zeitlichen Ablauf vertraut zu machen. Aufgrund des Lerneffektes wurde dieser, wie bereits erwähnt, nicht weiter berücksichtigt.

Die vier Durchgänge und die jeweiligen Parameter sowie Anzahl der Wiederholungen sind in der folgenden

Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1 Durchgänge, Parameter und Anzahl der Wiederholungen bzw., Durchläufe je Durchgang der Studie zur zeitdiskreten Abtastung;) wird randomisiert; t_B - Blendimpulsdauer, E_B - Blendimpulsbeleuchtungsstärke am Auge des Probanden, t_D - Darbietungsdauer der Buchstabendmatrix, K_{BM} - Kontrast der Buchstabenmatrix, $K_{W,max}$ - Technisch maximal einstellbarer Kontrast nach Weber, K_S - Individueller Schwellenkontrast*

Durchgang	t_B [ms]	E_B [lx]	t_D [ms]	K_{BM}	ISI [ms]	Wdh.
1	500	24	50	$K_{W,max}$	500	10
2	500	24	50	K_S	0	15
3	500	24	50	K_S	Var.*	40
4	–	–	50	K_S	–	5

3.5 Ergebnisse

Insgesamt konnten im Rahmen dieser Studie 22 Probanden ausgewertet werden. In Abbildung 3 sind die ermittelten Mittelwerte der visuellen Leistungsfähigkeit inkl. Standardabweichung zu den getesteten ISIs dargestellt. Die Anzahl der in Durchgang 4 ohne Blendung im Mittel korrekt benannten Buchstaben beträgt $2,87 \pm 0,98$. Dieser Wert entspricht der ursprünglichen visuellen Leistungsfähigkeit, sodass auf der rechten Skala die Anzahl der im Mittel korrekt benannten Buchstaben auf diesen Wert normiert wird. Es zeigt sich, dass die Anzahl der korrekt benannten Buchstaben nach dem Blendimpuls mit steigendem ISI ebenfalls ansteigt. Um die Frage zu beantworten, ob die visuelle Leistungsfähigkeit nach einem relativ kurzen Blendimpuls signifikant kleiner ist als ohne Blendung wurde auf Basis der ermittelten Werte ein Paarvergleich aller ISIs zur Situation ohne Blendung durchgeführt und die Effektstärke nach Cohen berechnet. Die ermittelten p-Werte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Effektstärke nach Cohen beträgt 0,59. Folglich handelt es sich um einen großen Effekt.

Anhand der Ergebnisse lässt sich zeigen, dass ein signifikanter Einfluss des Blendimpulses auf die visuelle Leistungsfähigkeit für alle getesteten ISIs nachgewiesen werden kann. Da vergleichbare Situationen auch im Straßenverkehr auftreten können [1, 6, 18, 19] unterstreichen diese Ergebnisse die Kritikalität dieser Situationen.

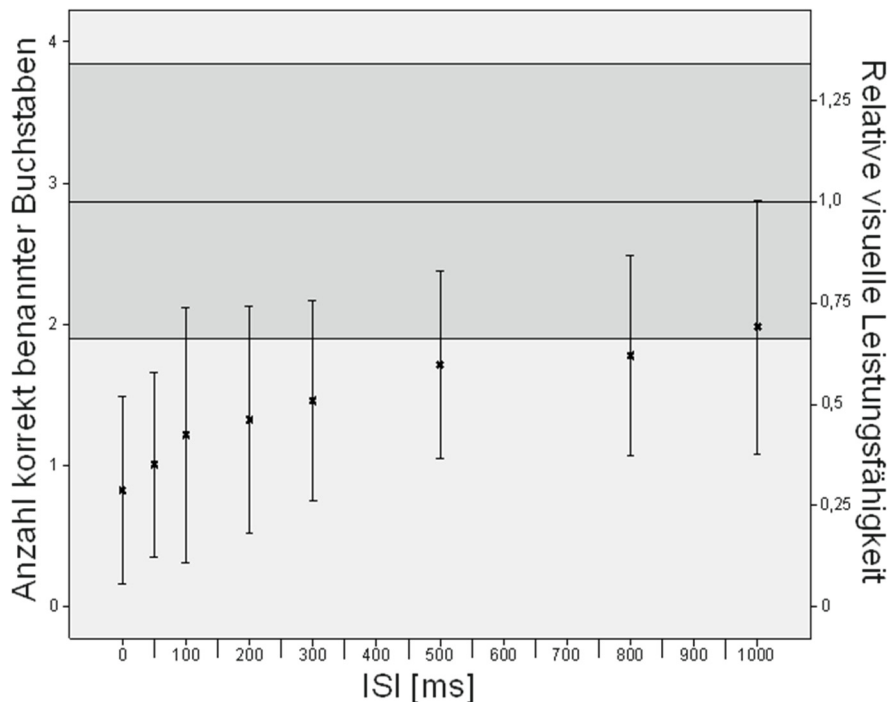


Abbildung 3 Linke Skala: Berechnete Mittelwerte und einfache Standardabweichung aus Durchgang 3 (x) mit Blendung in Abhängigkeit des gewählten ISIs; dunkel hinterlegt: Berechneter Mittelwert und einfache Standardabweichung aus Durchgang 4; rechte Skala: relative visuelle Leistungsfähigkeit (normiert auf die ursprüngliche visuelle Leistungsfähigkeit aus Durchgang 4)

Tabelle 2 Statistische Auswertung der Messergebnisse

Paarvergleich der Situation ohne Blendung zu ISI [ms]	p-Wert, signifikant ab <0,05
0	0,000*
50	0,000*
100	0,000*
200	0,000*
300	0,000*
500	0,001*
800	0,001*
1000	0,007*

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde eine Methode aufgezeigt, die eine objektive Bewertung sehr kurzer Blendsituationen ermöglicht. Im Zuge der durchgeführten Studien zur Validierung der Methodik konnte aufgezeigt werden, dass mit dieser der funktionelle Zusammenhang zwischen visueller Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit der Zeit nach Blendimpuls nachgebildet werden kann. Des Weiteren konnte das Potential der neuen

Methodik zur objektiven Messung und Bewertung sehr kurzer Blendsituationen gezeigt werden.

Innerhalb der Studien zeigte sich jedoch, dass einige Aspekte genauer untersucht und diskutiert werden müssen. Diese stehen der generellen Funktionalität jedoch nicht entgegen.

1 Literaturangaben

- [1] Helmer, M.: Methode zur Messung des Einflusses von Lichtimpulsen auf die visuelle Leistungsfähigkeit, Karlsruher Institut für Technologie unveröffentlichte Dissertation. Karlsruhe
- [2] Völker, S.: Blendung durch Kfz-Scheinwerfer im nächtlichen Straßenverkehr. Ein Review bis 2006 - Beschreibung, Maßzahlen, Bewertungsmethoden. Schriftenreihe des Fachgebietes Lichttechnik, Bd. 10. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin 2017
- [3] Hartmann, E.: Die Sofortadaptation und ihre Bedeutung für den Sehvorgang, Ludwig-Maximilians-Universität Habilitationsschrift. München 1968
- [4] Crawford, B. H.: Photochemical Laws and Visual Phenomena, Bd. 133. 1946
- [5] Baker, H. D.: Initial stages of dark and light adaptation. *Journal of the optical society of america* 53 (1963), S. 98–103
- [6] Steinborm, W.: Evaluation realer Blendzeiten im Straßenverkehr, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2017
- [7] Helmer, M.: Messmethoden zur Bewertung dynamischer Blendsituationen. In: Schweizer Licht Gesellschaft (Hrsg.): Tagungsband LICHT2018. 23. Europäischer Lichtkongress vom 9.-12. September in Davos. 2018
- [8] Insurance Institute for Highway Safety: Headlight Test and Rating Protocol. <https://www.iihs.org/iihs/ratings/ratings-info/headlight-evaluation>, abgerufen am: 27.11.2018
- [9] Helmer, M.: Potentielle Messmethoden zur Bewertung dynamischer Blendsituationen. Tagungsband Lux Junior 2017. 2017
- [10] Greule, R.: Kontrastschwellen bei transientser Adaptation, Universität Karlsruhe Dissertation. Karlsruhe 1993
- [11] Sperling, G.: The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and Applied* 74 (1960) 11, S. 1–29

- [12] Solso, R. L. u. Reiss, M.: Kognitive Psychologie. Mit 14 Tabellen. Springer-Lehrbuch. Heidelberg: Springer 2005
- [13] Miller, G. A.: The magical number seven, plus or minus two. Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review* 63 (1956) 2, S. 81–97
- [14] Walter, D.: Nutzungsweisen bei der Verwendung von Tablet-Apps. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2018
- [15] Rapp, I.: Messung der visuellen Leistungsfähigkeit zur Bewertung dynamischer Blendsituationen, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2018
- [16] Walschus, C.: Zeitdiskrete visuelle Leistungsmessung zur Bewertung dynamischer Blendsituationen, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2018
- [17] Freyer, M.: Einfluss der Blendbeleuchtungsstärke und der Leuchtdichte auf die Blendung und den Schwellenkontrast bei homogenen und inhomogenen Umfeld, Hochschule Anhalt Diplomarbeit 2004
- [18] Dannenmaier, M.: Evaluierung realer Blendsituationen im Straßenverkehr, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2017
- [19] Brahim, M.: Evaluierung maximaler Lichtstärken für unterschiedliche Scheinwerfersysteme unterhalb der HDG, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2018

Entwicklung eines Robustheitsmaßes für die Wahrnehmung von LEDs

Nicole Stubenrauch, Christoph Schierz, TU Ilmenau

n.stubenrauch@online.de

Zusammenfassung

Metamere Spektren sind Spektren, die trotz unterschiedlicher spektraler Verteilung in einem ausgewählten Farbsystem identische Farbörter haben. Ein spezifiziertes Farbsystem beinhaltet jedoch nur ein spezifiziertes Tripel von Spektralwertfunktionen. Eine Metamerie kann also nicht einheitlich für Probanden verschiedener Altersklassen und Beobachterfeldgrößen existieren. In dieser Arbeit wird eine Probandenstudie beschrieben, die in ihrer Auswertung berechnete Indexe, bzw. Robustheitsmaße überprüfen kann. Außerdem kann mit den ermittelten Daten für jeden Fall untersucht werden, für welche Spektralwertfunktionen Berechnung und Wahrnehmung am besten übereinstimmen.

1 Einleitung und Motivation

Die Spektren von weißen LEDs unterscheiden sich durch die verwendete blaue LED und den Leuchtstoff teilweise deutlich. Dadurch können metamere Spektren sehr verschieden sein. Die Berechnung der identischen Farbörter erfolgt mit Spektralwertfunktionen (**color matching functions** - CMF). Diese CMF sollen die Farbwahrnehmung eines durchschnittlichen Beobachters wiedergeben und wurden schon in vielen Studien untersucht. Die CIE hat 2006 neue CMF herausgegeben, welche Unterscheidungen für die Feldgröße (2° und 10°) sowie das Beobachteralter (20-80 Jahre) ermöglichen [1].

Schaut man sich an, wie stark sich die CMF für junge und alte Probanden sowie für die verschiedenen Feldgrößen unterscheiden, so ist es nicht verwunderlich, dass rechnerisch metamere Spektren i.A. als farblich deutlich unterschiedlich wahrgenommen werden, da die Metamerie schließlich nur für eine CMF ermittelt werden kann. Für andere Altersklassen von Beobachtern und andere Beobachtungsbedingungen ist die Metamerie somit nicht gegeben.

Die Unterschiede zwischen den Altersgruppen und den Feldwinkeln sind vom Spektrum der Lichtquelle abhängig. So gibt es Spektren, bei welchen die Wahrnehmung robust gegenüber Veränderungen des Probandenalters oder der Feldgröße ist, genauso wie Spektren, bei denen die Wahrnehmung sehr sensibel auf bereits geringe Veränderungen reagiert. In dieser Studie soll ermittelt werden, welchen



Einfluss die verschiedenen Wellenlängenbereiche auf die Robustheit gegenüber Veränderungen haben.

Des Weiteren ist zu überprüfen, welche der derzeit genutzten CMF die Wahrnehmung der Probanden am besten widerspiegeln. Dazu sind die Farbörter von Test- und Referenzlichtquelle mit den unterschiedlichen, altersangepassten Funktionen zu berechnen und für jeden Probanden sowie für Probandengruppen und für jede Beobachterfeldgröße die ideale CMF zu ermitteln.

Bemerkung: Alle hier dargestellten Diagramme sowie Erklärungen beziehen sich auf die Spektralwertfunktionen der CIE 2006 10°, bzw. 2°, jeweils entsprechend der aktuellen Anwendung.

2 Forschungshypothesen

- Die Spektralwertfunktionen unterschiedlicher Altersgruppen unterscheiden sich signifikant voneinander.
- Die Spektralwertfunktionen unterschiedlicher Beobachterfeldgrößen unterscheiden sich signifikant voneinander.
- Der Einfluss des Alters tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Index für die Abhängigkeit vom Alter rechnerisch vorhergesagt werden.
- Der Einfluss der Beobachterfeldgröße tritt beim Vergleich von LED-Lichtfeldern abhängig vom Spektrum unterschiedlich stark hervor. Für jedes Spektrum kann ein Index für die Abhängigkeit von der Beobachterfeldgröße rechnerisch vorhergesagt werden.

3 Versuchsdesign

3.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung wurde eine Abmusterungsbox entworfen, welche eine Vielzahl an Variationen an Testzeichen und Umfeldern erlaubt (Abb. 1) [3].

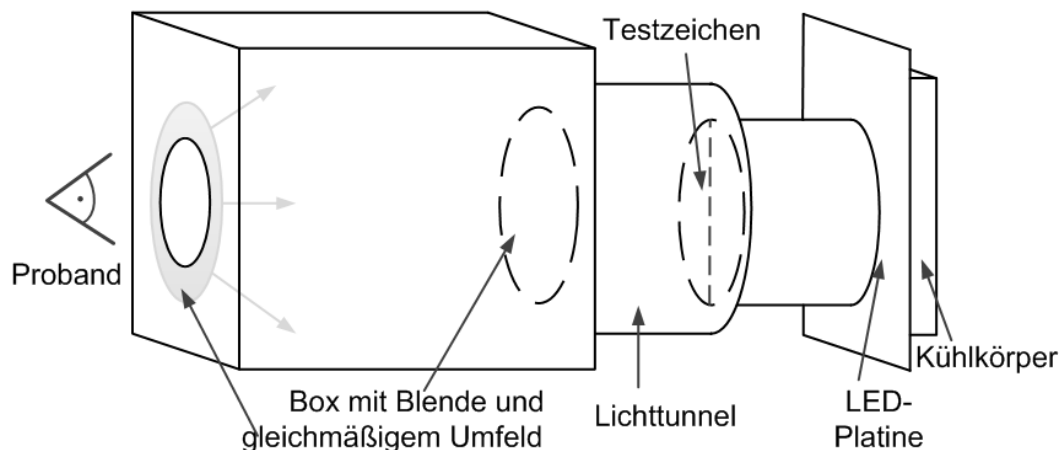


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Bewertung von Farbunterschieden

Der Proband sitzt auf einem höhenverstellbaren Stuhl vor der Box (L: 1,37 m; B: 0,66 m, H: 0,66 m). Der Kopf ist mit Hilfe einer Kinn-Kopf-Stütze fixiert. Die Betrachtung des runden, vertikal geteilten Testzeichens erfolgt monokular. Beim Blick in die Box ist das Testzeichen etwa 1 m entfernt. Mit Hilfe einer Blende 0,3 m vor dem Testzeichen kann dessen sichtbare Größe auf 2° oder 10° eingestellt werden, wobei bei einer Betrachtung des 10° -Feldes das 2° -Feld zusätzlich abgedunkelt ist.

3.2 Spektren

Die LED-Platine im Versuchsaufbau ist, genau wie der Mischzylinder und das Testzeichen, zweigeteilt. Auf jeder befinden sich sechs verschiedene, farbige LEDs (dominante Wellenlängen von 451 nm, 477 nm, 498 nm, 527 nm, 633 nm, und 660 nm) sowie drei weiße LED-Typen unterschiedlicher ähnlichster Farbtemperatur (2700 K, 4100 K, 6560 K). Durch diese verschiedenen LEDs kann ein großer Farbumfang aufgespannt (Abb. 2) und eine Vielzahl an Spektralverteilungen realisiert werden.

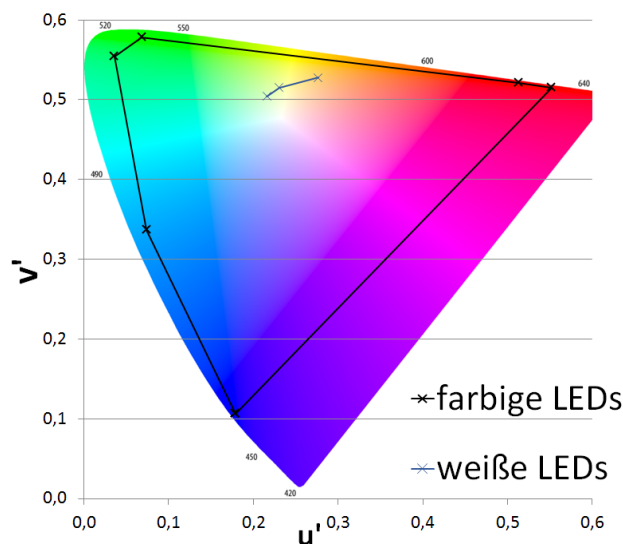


Abb. 2: Gamut, welcher mit den verwendeten LEDs aufgespannt wird

Für die Umfeldbeleuchtung wurden die weißen LEDs genutzt, welche auch auf der Platine verbaut sind. Die Umfeldbeleuchtung wurde bestmöglich an die Lichtfarbe des Testzeichens angepasst.

Für die Versuche wurden acht verschiedene Spektren ausgewählt, welche auf den Farbort eines Planckschen Strahlers bei 4000 K (CIE 2006 10° , bzw. 2°) eingestellt waren. Bei den Testspektren handelt es sich um verschiedene RGB- sowie RGBW-Kombinationen, die sich teilweise nur in einer Komponente unterscheiden oder, durch die Beteiligung einer weißen LED, in ihrer spektralen Homogenität.

Als Referenzen wurden zwei Kombinationen der neun LED gewählt, dabei ist eine Referenz möglichst ähnlich zu Planck (RP) und die andere zu einer weißen, leuchtstoffkonvertierten LED (RW). In Abb. 3 sind die zehn Spektren zu sehen.

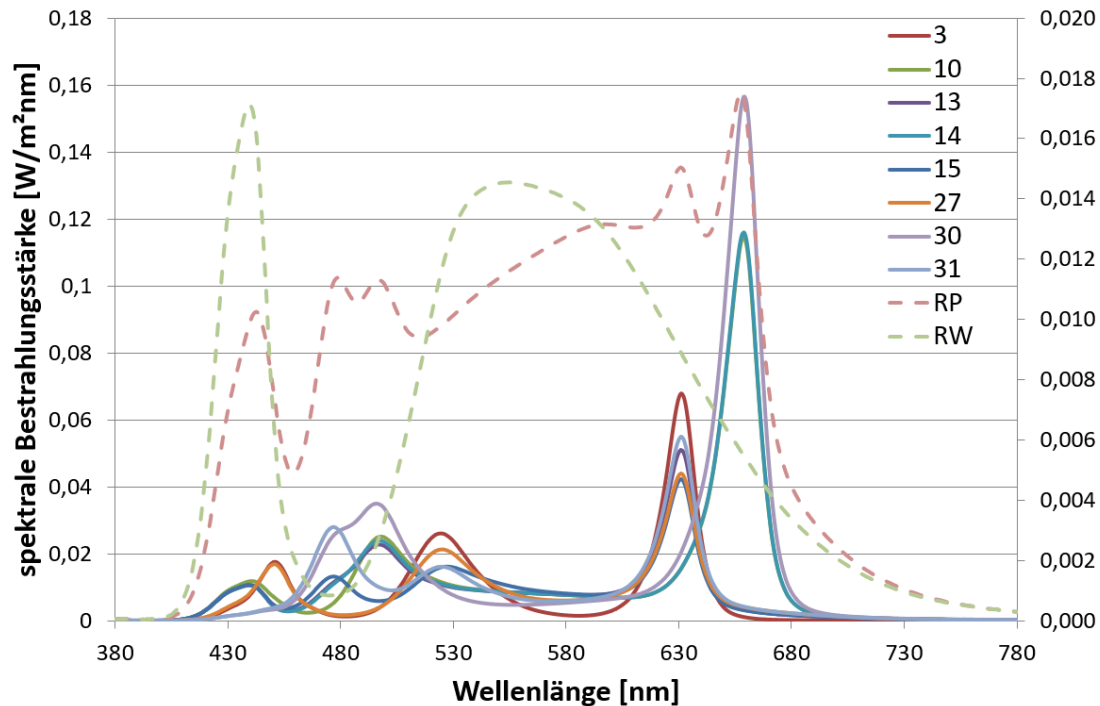


Abb. 3: Spektren der acht ausgewählten Kombinationen mit zwei Referenzen. Die beiden Referenzen beziehen sich auf die sekundäre Achse.

4 Durchführung der Versuche

Während eines Versuchsdurchlaufes bleibt eine Testzeichenhälfte als Referenz konstant, die zweite wird innerhalb eines Rasters (Abb. 4) leicht variiert. Aufgabe des Probanden ist es, die beiden Hälften des Testzeichens auf Gleichheit zu bewerten.

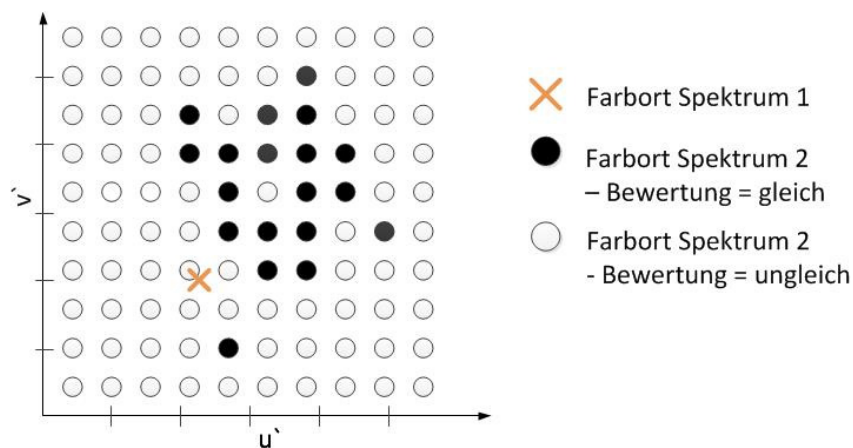


Abb. 4: Raster der abzufragenden Farbörter

Durchgeführt wurden die Versuche mit Probanden beider Geschlechter im Alter zwischen 27 und 69, bei jeweils zwei Beobachterfeldgrößen. Zusätzlich zu den acht Testspektren mit jeweils zwei Referenzen wurden die Nullhypothesen getestet. Die jeweilige Referenz befindet sich somit auf beiden Testzeichenhälften. Mit diesem

Versuch kann zusätzlich eine Anbindung an die Versuche von MACADAM [6] und KRAMER [4, 5] erfolgen.

Da die als gleich bewerteten Farbörter zwischen den Probanden bei den meisten Untersuchungen deutlich weiter auseinander liegen als die mittleren Streuungen der „Gleich“ Antworten war es nicht möglich bei allen Probanden die gleichen Punkte abzufragen. Daher war es nötig, mit den Probanden erst die Position eines geeigneten Gitters zu ermitteln. Das untersuchte Gitter musste im Anschluss ggf. erweitert werden, wenn noch nicht der gesamte gleich beurteilte Bereich umfasst wurde. In Abb. 5 ist ein typischer Versuchsdurchlauf dargestellt.

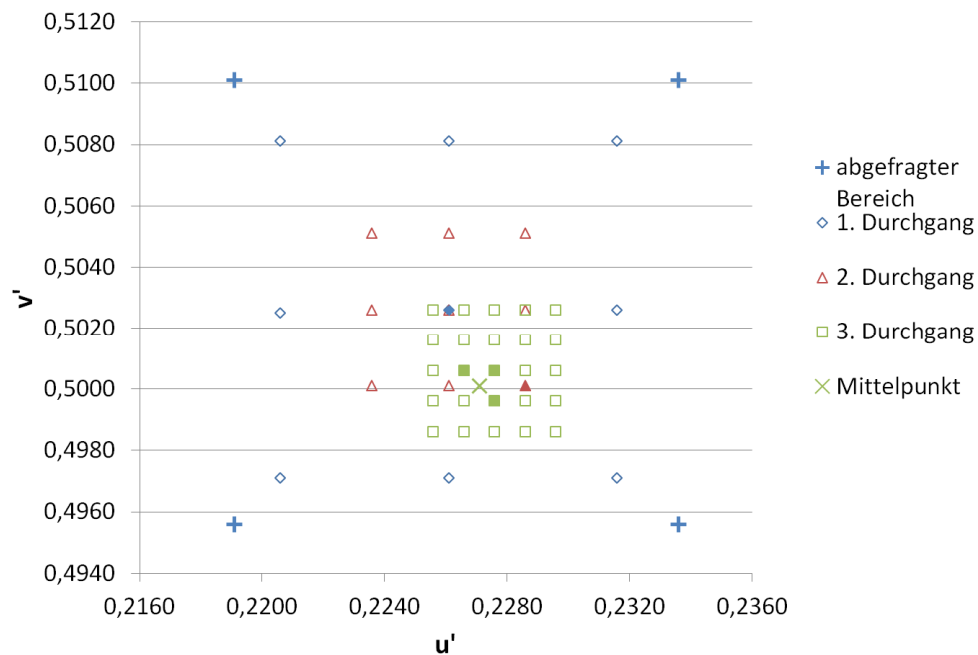


Abb.5: Methodik bei der Vorstudie am Beispiel: In zwei Durchgängen wurde der passende Ort für das abzufragende Gitter gesucht, welches in einem dritten Durchgang abgefragt wurde. Die gefüllten Kästchen geben dabei "Gleich" Antworten an. Hier dargestellt ist die Abfrage von Kombination 15 - Referenz RW – Gesichtsfeld 10° - Proband 3 im Farbsystem CIE2006 10°

5 Erste Auswertung der Versuche

5.1 Probandenkollektiv

An der Probandenstudie haben vier Probanden teilgenommen. Eine Übersicht ist in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Übersicht der 4 Probanden der Versuche

Nummer	Geschlecht	Alter	Auge
1	w	69	rechts
2	m	58	links
3	w	29	rechts
4	m	27	links

Aufgrund von Versuchsaufbau und Methodik war es sehr schwierig Probanden für die Durchführung der Versuche zu finden. Problematisch war häufig das Finden eines geeigneten Ortes für das endgültige Gitter. Dazu war es nötig dargestellte Farbunterschiede im ersten und zweiten Durchgang zu bewerten, um sich langsam dem perfekten Untersuchungsort und -umfang anzunähern. Diese Bewertung verschiedenster Farbunterschiede nach ihrer Größe gelang nicht allen möglichen Probanden und erschwerte somit die Probandensuche.

Die Versuche wurden in Sessions von max. 2 h Dauer durchgeführt. Wie viele Gitter in der Zeit bewertet wurden, hängt stark vom Probanden ab. Insgesamt benötigten die Probanden für die 10°-Versuche 7 h bis 13 h. Die 2°-Versuche sind noch nicht bei allen Probanden abgeschlossen. Es wurde jedoch schnell deutlich, dass sie anstrengender sind und mehrere, dafür kürzere Sessions nötig waren. Die Probanden wurden im Kollegen- und engen Familienkreis gefunden.

Wie zuvor erwähnt, werden die Versuche monokular absolviert, um Fehler durch Unterschiede zwischen den Augen auszuschließen. Die Auswahl des Auges erfolgte durch eine Untersuchung mit dem Flimmerphotometer am Fachgebiet Lichttechnik. Dabei wurde bei den jungen Probanden das jeweils klarere und bei den älteren Probanden das vergilbtere Auge gewählt.

5.2 Bestätigung durch gleiche Spektren (10°-Feld)

Eine Besonderheit dieser Studie, im Vergleich zu vielen anderen, ist der spektrale Unterschied zwischen den beiden Testzeichenhälften. MACADAM, KRAMER und viele andere führten Untersuchungen mit Spektren durch, die auf beiden Testzeichenhälften nahezu identisch waren und auf gleichen Grundvalenzen aufgebaut waren. Dies wurde hier anhand der beiden Referenzen nachgestellt. In Abb. 6 ist das Ergebnis am Beispiel RW, 10°-Beobachterfeld dargestellt.

Man kann gut erkennen, dass es nur geringe Unterschiede zwischen den Probanden gibt und die Referenz in jedem Fall innerhalb der Standardabweichung liegt. Die Standardabweichung kann dabei mit der Ellipsengröße bei KRAMER verglichen werden. Dieser ermittelte in seinen Untersuchungen für 4000K eine Ellipse mit einem flächengleichen Radius von $r_m = 0,0008$ (in CIE 2006 10°) [7]. Die hier ermittelte mittlere Standardabweichung liegt bei $du'v'_{CIE2006\ 10^\circ} = 0,0012$ und ist somit nur leicht höher.

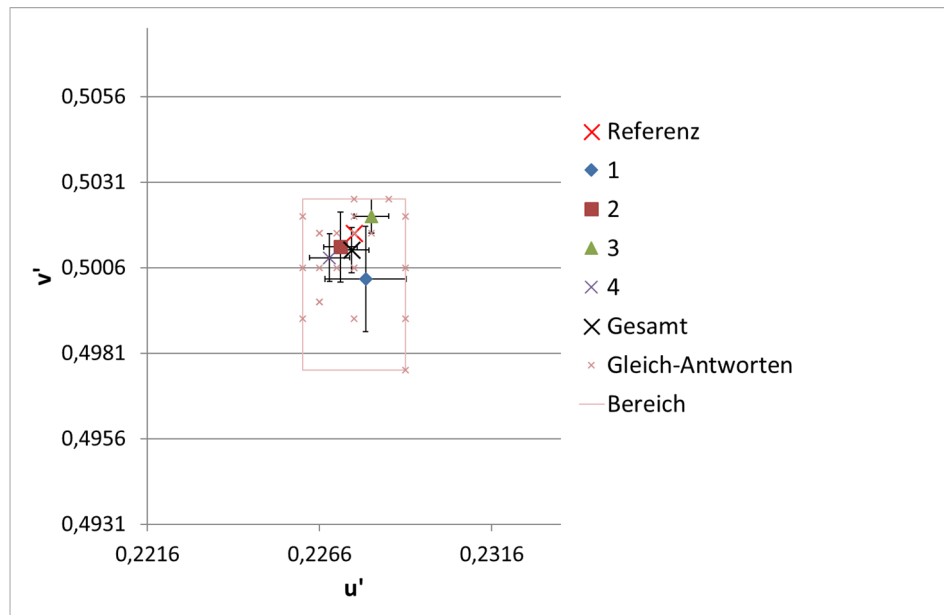


Abb.6: Überprüfung gleicher Spektren anhand der Referenz RW als Testgitter. Aufgetragen sind jeweils die Mittelpunkte der Gleich-Antworten der vier Probanden sowie der Gesamtmittelpunkt der Untersuchungen. Um einen Eindruck zu bekommen, wie groß die Ergebnisse streuen, sind außerdem die Koordinaten der Gleich-Antworten markiert und mit einem Rahmen die Maximal- und Minimalwerte eingegrenzt.

5.3 Auswertung an einem Beispielspektrum

Die Auswertung soll im Folgenden an einem Beispielspektrum erfolgen. Dazu wurde Kombination 3 (vgl. Abb. 3) ausgewählt.

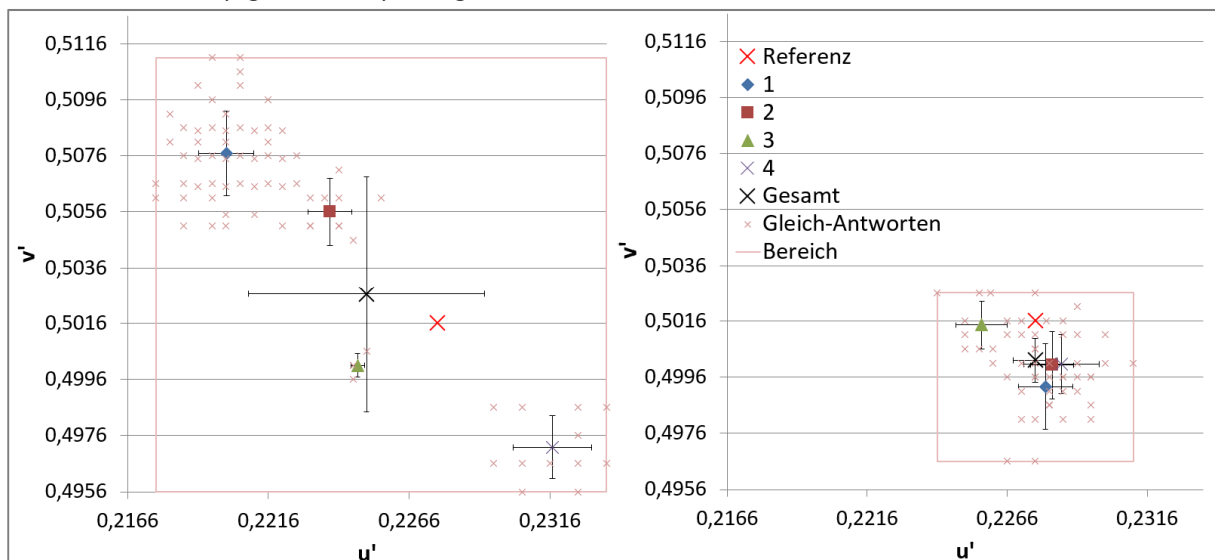


Abb.7: Ergebnisse der Studie für Kombination 3, 10°-Feld, Referenz RW (links) sowie Referenz RP (rechts).

In Abb. 7 sind die Ergebnisse für ein 10°-Feld dargestellt. Aufgetragen sind die Ergebnisse aller vier Probanden sowie der Gesamtmittelpunkt samt Streuung für beide Referenzen. Man kann gut erkennen, dass es große Unterschiede zwischen den

Ergebnissen beider Referenzen gibt. Für die Referenz RW sieht man einen Verlauf der Einzelmittelpunkte von oben links nach unten rechts mit absteigendem Probandenalter. Dieser Trend ist auch bei vielen anderen Beispielen zu erkennen und gut mithilfe der Vergilbung der Linse zu erklären. Für die Referenz RP ist dies jedoch nicht zu erkennen, die Lage der Einzelmittelpunkte im Vergleich zum Gesamtmittelpunkt hat sich deutlich verändert. Die Standardabweichungen der einzelnen Mittelpunkte hat sich genau wie die Abweichung des Gesamtmittelpunktes verkleinert. Bei keinem der 8 individuellen Fälle, ist der Farbort der Referenz innerhalb der Standardabweichung.

5.4 Notwendige Gittergrößen der 10°-Versuche

Im Laufe der Versuche mussten die Gitter regelmäßig erweitert werden, um alle möglichen Gleich-Antworten der Probanden finden zu können. Dabei ergaben sich die Abmessungen der Gitter wie in Tab. 2 aufgelistet.

Tab. 2: Abmessungen der erstellten Gitter für die Versuche im 10°-Beobachtungsfeld

	u'min	u'max	v'min	v'max	Spalten	Zeilen
Gitter3	0,2166	0,2336	0,4956	0,5126	35	35
Gitter10	0,2166	0,2336	0,4956	0,5106	35	31
Gitter13	0,2166	0,2336	0,4956	0,5116	35	33
Gitter14	0,2191	0,2336	0,4956	0,5101	30	30
Gitter15	0,2191	0,2336	0,4956	0,5101	30	30
Gitter27	0,2191	0,2336	0,4931	0,5101	30	35
Gitter30	0,2116	0,2386	0,4881	0,5176	55	60
Gitter31	0,2191	0,2386	0,4881	0,5126	40	50
RP	0,2216	0,2336	0,4956	0,5076	25	25
RW	0,2216	0,2336	0,4931	0,5076	25	30

Der Abstand von $du'v'_{CIE2006\ 10^\circ} = 0,0005$ ist für alle Gitter konstant. Für andere Probanden würden weitere Erweiterungen sehr wahrscheinlich nötig sein. Vor allem, wenn die Probanden deutlich älter oder jünger sind. Bei den Gittern 10 und 13 wurde das Gitter bis an seine Grenzen ausgenutzt. Eine zusätzliche Erweiterung ist mit den aktuell genutzten LEDs und dem Helligkeitsniveau von $800 \frac{cd}{m^2}$ nicht möglich. Anhand der Gitterabmessungen sieht man schnell, dass die Unterschiede zwischen den Probanden bei Gitter RP sehr klein und bei Gitter 30 und 31 sehr groß sind.

Bedenkt man die mittlere Standardabweichung von $du'v'_{CIE2006\ 10^\circ} = 0,0013$ (über alle 10°-Versuche) bei der benötigten Gittergröße so wird deutlich, dass das Abfragen des gesamten Gitters nicht möglich ist.

Für die 10°-Versuche sind die Standardabweichungen der vier Probanden vergleichbar, bei den 2°-Versuchen ist diese jedoch für die beiden älteren Probanden deutlich größer als bei den jüngeren.

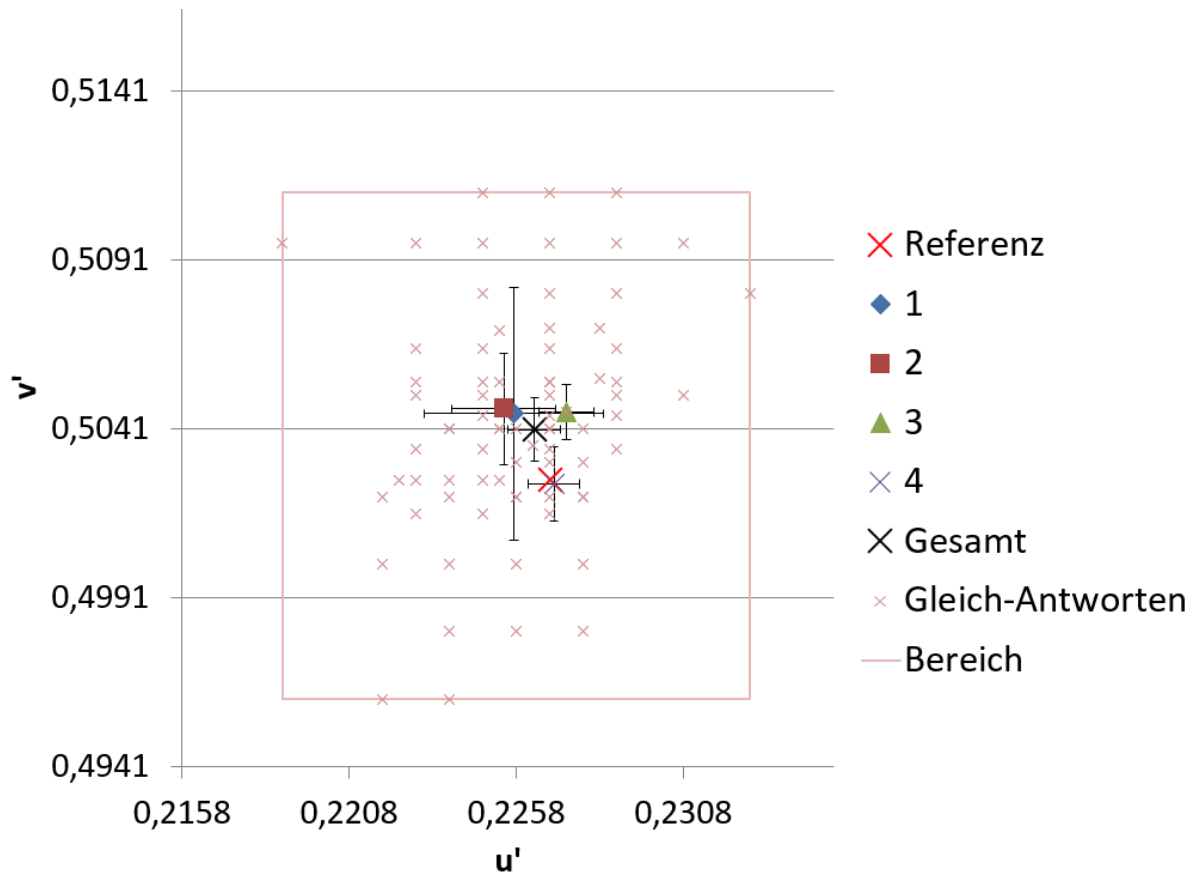


Abb. 8: Auswertung erster Ergebnisse im 2° Beobachterfeld für die Kombination 15

6 Ausblick

In dieser Studie wurden von Probanden verschiedener Altersklassen Schwellwerte bei der Bewertung unterschiedlicher Spektren im Test- und Referenzfeld ermittelt. Bisher wurden die Ergebnisse lediglich gesichtet und die Validität der Methodik wurde geprüft.

Mit Hilfe der ermittelten Daten können rechnerisch zu ermittelnden Indexe, bzw. Robustheitsmaße, erstellt werden, welche die Robustheit eines einzelnen Spektrums gegenüber Veränderungen der Feldgröße und des Probandenalters beschreiben.

Außerdem kann für jeden Probanden und jeden Test eine ideale Spektralwertfunktion ermittelt werden. Aus diesen Daten können dann gute CMF für die einzelnen Probanden, Beobachtungsbedingungen oder Spektren ermittelt werden.

7 Quellen

- [1] CIE: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 1. Technical Report CIE 170-1:2006. Vienna: CIE Central Bureau; 2006
- [2] CIE: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 2. Technical Report CIE 170-2:2015. Vienna: CIE Central Bureau; 2015
- [3] HAAG, S.; HARTWIG, U. M.: Aufbau einer Untersuchungskabine zur Abmusterung von Lichtfarben. Projektseminar, Ilmenau, 2015
- [4] KRAMER, G.: Farbdiskrimination: Ein empirischer Ansatz für die Gruppierung weißer LEDs. PhD Thesis, Ilmenau, Germany, 2014
- [5] KRAMER, G.; SCHIERZ, C.: Colour Discrimination Subject to Illuminant and Colour Transition. Colour Research and Application, Volume 41, Number 5, October 2016
- [6] MACADAM, DL.: Visual sensitivities to colour differences in daylight. J Opt Soc Am 1942: 32:247-274
- [7] STUBENRAUCH, N.; BIESKE, K.; KOLMER, J.; SCHIERZ, C.: Evaluation of colour differences from LEDs in new colour systems. In SLG – Schweizer Licht Gesellschaft (Hrsg.): LICHT 2018

Lighting of Ski Slopes

Pavlov D, K. Nikolova, D. Ivanov

Technical University of Sofia, Bulgaria

Abstract

The beauty of the nature and the dynamics of the movements make the skiing one of the most popular and attractive sports in a lot of countries. The daylight skiing is the most often practice but not only. The night time practicing has its own beauty and is also attractive. For this purpose is needed appropriate artificial lighting. In some cases and for big international events it is obligatory. The visual tasks, the curved slope fields, the not smooth calculating surfaces, the snow reflection characteristics, the speed of the movement and recognition make this field of lighting design quite interesting and challenging as the sport itself.

In the present paper it is proposed a practical solution for artificial lighting of a skiing slope, completed with 3D modelling of the track surface with its reflecting characteristics and fulfilling the standard requirements for artificial lighting of that kind of sport practicing.

Index Terms: Sports lighting, ski slopes, 3D modeling of surfaces

1 Introduction

The European standard dealing with sports lighting is EN 12193:2009 “Light and lighting - Sports lighting”. There is a new edition of the standard from 2019, but the previous one is still working. The standard requirements for ski slopes are shown in Table 1 [1].

The ski slopes reference area in which are applied the main lighting requirements has no standard sizes due to the differences of the ground surfaces. All illuminance levels for the ski slopes should be calculated (measured) on the slope surfaces. For alpine and freestyle skiing there are no specific requirements for the distances between the grid lines in length. For ski jumps there are some specific requirements for the grid points distances – 2m or less for the run down and 5m or less for the landing area. Moreover there is a requirement for the retardation area in ski jumps, in which the illuminance levels should have at least 30% the landing area but there are no preferable values for the uniformity. The ski jumps illuminance also should have equal levels at the point of take off and the landing.

© 2019 by the authors. – Licensee Technische Universität Imenau, 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/), (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Outdoor				Reference area		Number of grid points		
				Length	Width	Length	Width	
				m	m	m	m	
Skiing	Alpine/freestyle			-	-	11	5	
	Jumps		Run down	-	-	5	1	
			Landing	-	-	11	5	
Class	Illuminance Alpine/freestyle		Illuminance Jump run down		Illuminance Jump landing		GR	R _a
	\bar{E}_m, lx	E_{min}/\bar{E}_m	\bar{E}_m, lx	E_{min}/\bar{E}_m	\bar{E}_m, lx	E_{min}/\bar{E}_m		
I	100	0.5	150	0.5	300	0.7	50	20
II	30	0.3	50	0.3	200	0.6	50	20
III	20	0.2	20	0.3	200	0.6	55	-

Table 1. Requirements for ski slopes [1]

E_m is the average illuminance value in lx, E_{min}/E_m is the uniformity of the illuminated surface, GR is the glare rating [1, 2] and R_a is the general color rendering index.

Illumination criteria are defined from the performers' skills and the number of the spectators. The highest class is for top level competitions and trainings with international/national participation and importance and big spectator capacity. The second class includes mid level competitions/trainings (regional or local) and smaller spectator capacity. The third class is generally for trainings, sports education, recreational activities and small competitions without or not many spectators.

In artificial lighting for winter sports special attention should be paid of the surface characteristics because of the reflection when bright lighting sources are applied. This may lead to unacceptable GR. Other key factors for the lighting solutions are uniformity, color rendering and avoidance of stroboscopic effect. All mentioned above could be realized by choosing a proper optics of the luminaires and geometry of the lighting system.

The most often used lighting sources in the sports lighting are luminaires with metal halide lamps and LEDs, fig. 1



Fig.1 Types luminaires used for lighting of ski slopes: a) with metal-halide lamps; b) with LEDs without or with secondary optics, white and RGB [3,4,5,6,7]

The possibilities of LED luminaires for color changing give opportunities for very attractive lighting designs and magical experience. An example for this is the project in the Swedish Ski Resort Åre, fig. 2 [8].

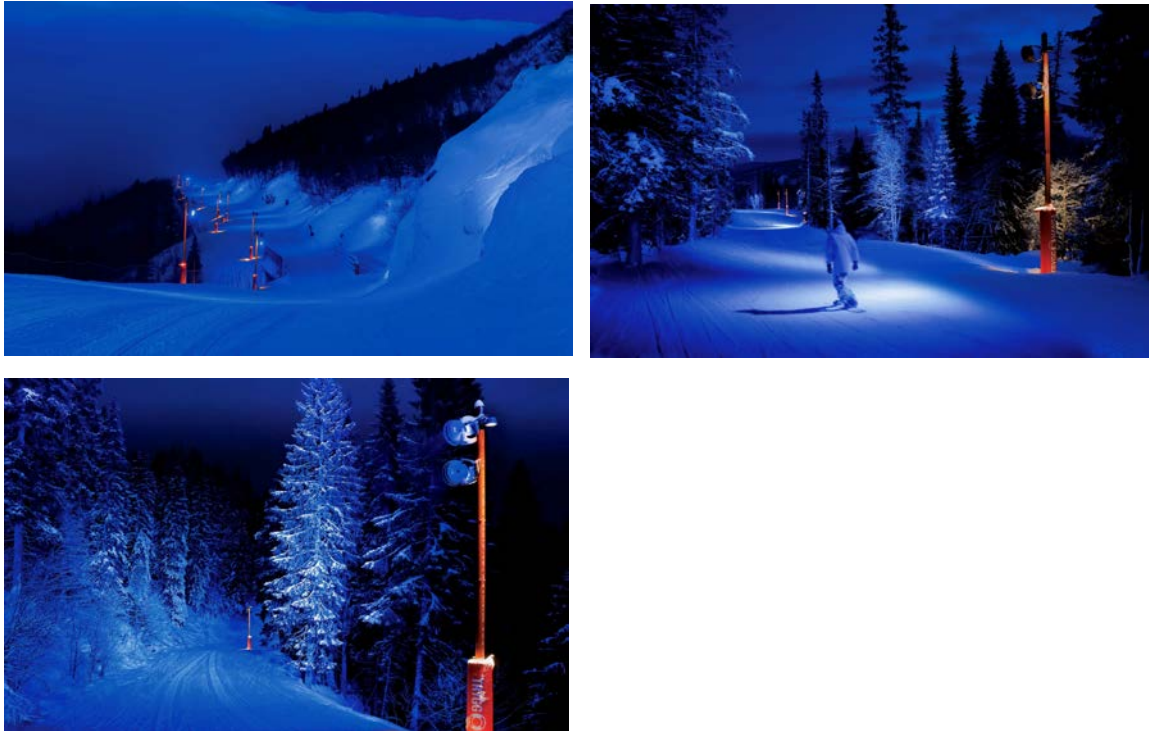


Fig.2 The magical lighting project in the Swedish Ski Resort Åre based on folklore tales of land-forming giants, performed with 240 colour-changing LED luminaires with different optical systems [8]

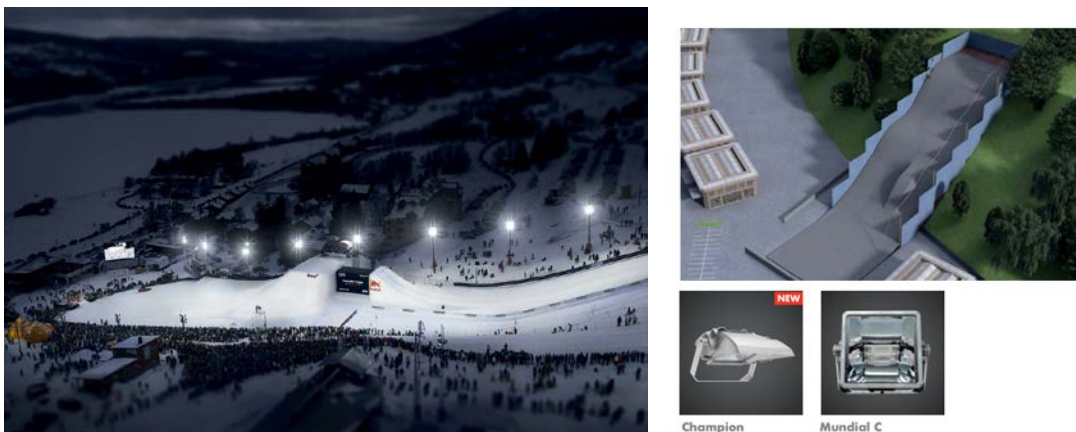


Fig.3 The Störtloppet ski slope is Sweden (Ski Resort Åre) with a vertical drop of 841 metres. The lighting system for illumination 1,308 feet with a vertical drop of 416 meters is realized with 350 Mundial HQI-TS 2000W floodlights illuminate and produces light level of 1000 lx [4].

For the highest classes of ski slopes and meeting television broadcast requirements the luminaires with metal halide lamps are still the preferred lighting solution, fig. 3 [4].

2 Landscape Contours, Tracking and Modeling of Existing Ski Slopes

The needed equipment is a device with GPS maps database. We have to choose the mountain area, starting and end point of the slope. The needed information and a record of the data for the landscape contour, altitude and length could be performed with View Ranger application. The next step is implementing the recorded data in the Sketchup software. The generated model of the chosen existing ski slope for our project is represented on fig. 4. The slope is with length 350 m and width 50 m.

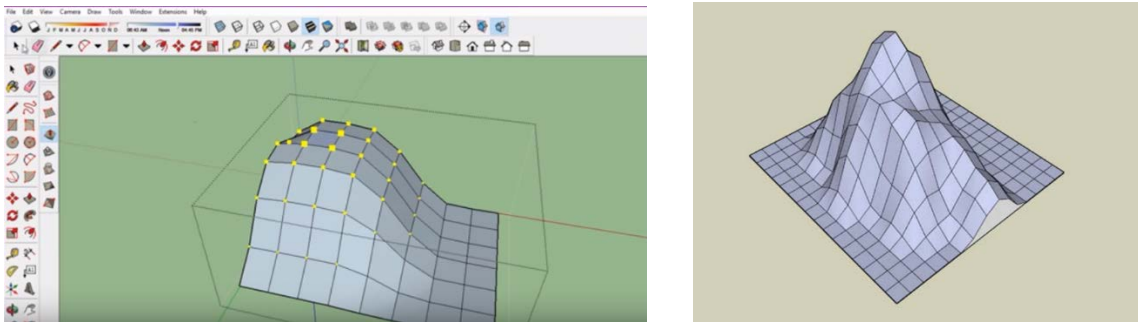


Fig.4 3D modelling of the chosen ski slope based on GPS tracking

After generating in Sketchup the 3D model is inserted in the lighting design program Dialux EVO. An illustration of the created model after adding additional surfaces with real reflection characteristics is shown on fig. 5.

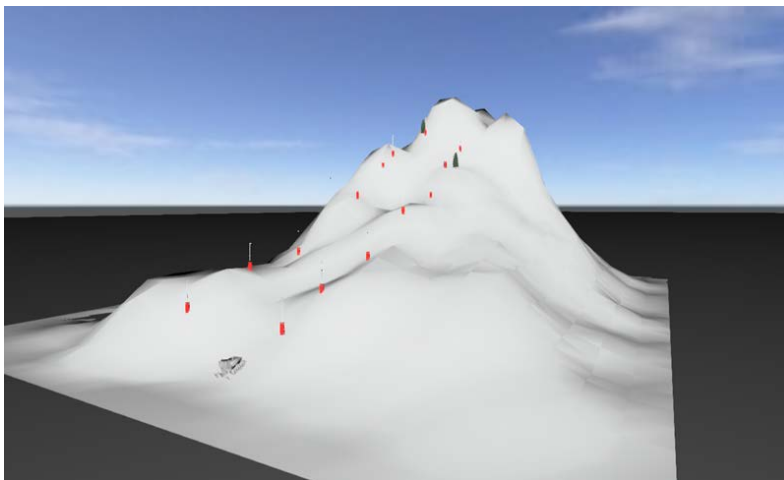


Fig.5 3D model in in the lighting design program Dialux EVO with real added real reflection characteristics of the calculation surfaces.

3 Lighting system geometry and basic principles

3.1.1 Pole positions - basic principles

The lighting poles should be situated with priority to the safety of the participants taking into account the curvature, trees, rocks, cliffs and etc. The height of the poles should be chosen considering the biggest expected snow amount [9].

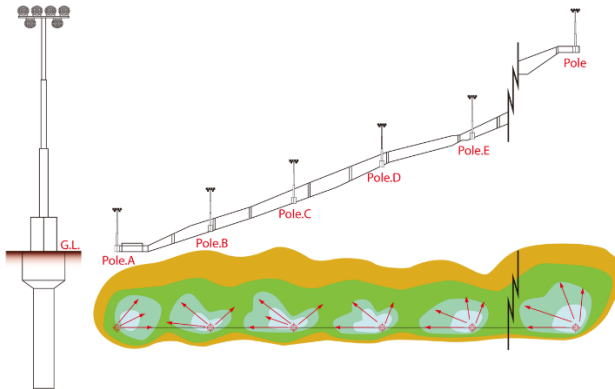


Fig. 6 Lighting pole positions and illuminance of the slope surface [9]

3.1.2 Orientation of the luminaires – basic principles

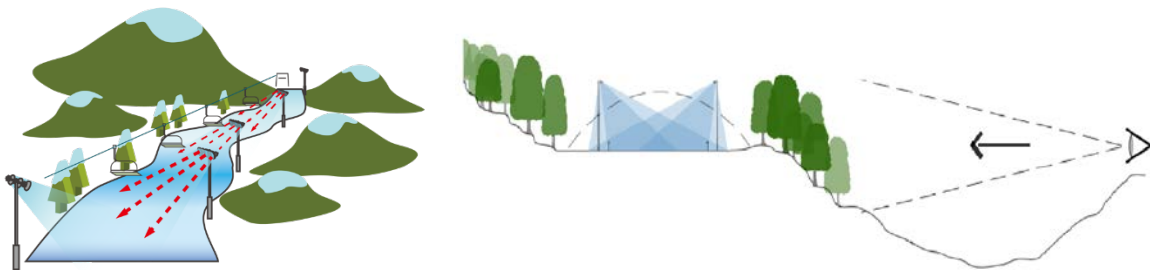


Fig. 7 Orientation of the luminaires aiming less obtrusive light [9,10]

The landscape, its contours and the luminaire orientation could be used for limiting the glare, fig. 7. The athletes' shadows must be avoided. They may disturb the participants and the spectators. As uniform is the slope field as comfortable and safe are the winter sport performers. The proper orientation of the luminaires leads to less lighting design pollution.

3.1.3 Project details

For the represented project are used Siteco LED luminaires Flood light 20 midi LED, 208W, 29599lm, CCT 5000 K and CRI > 80. Their mounting height is 12 m. The pole distance is 30m. The construction and the lighting distribution curve are shown on fig. 8.

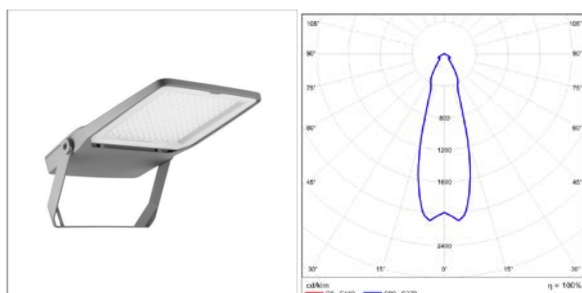


Fig. 8 Design and LDC of the used LED luminaires

The calculation results from the lighting design software are represented on fig. 9

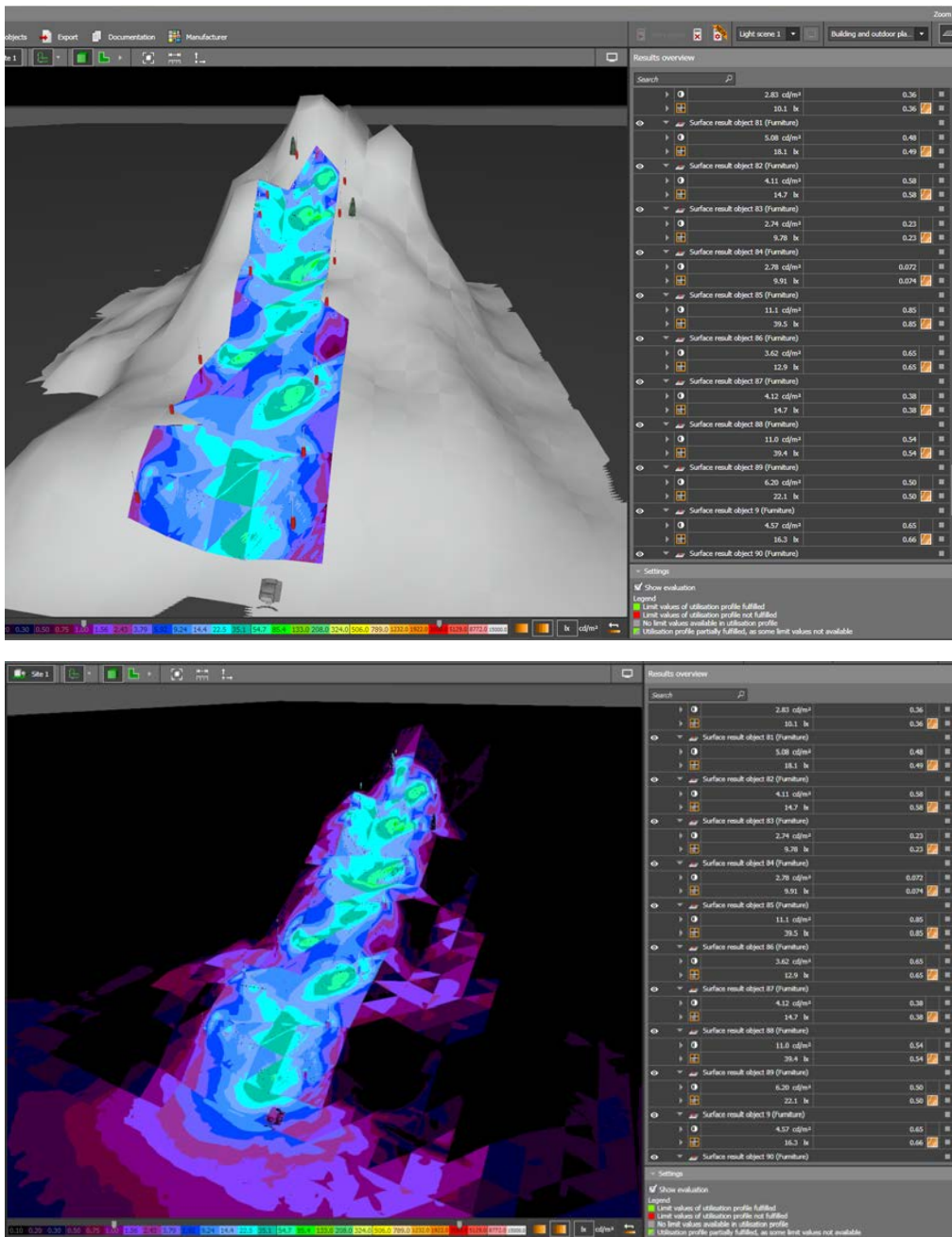


Fig. 9. Calculated values for the illuminance of the different surfaces

The average illuminance for the calculated surfaces is 24 lx, the uniformity is 0.27 and the glare rating is under 50. The results comply with standard requirements for a ski slope of Class III.

4 Conclusions

The realistic modeling of the calculation surfaces is one of the most important goals for every lighting designer. Although it seems complicated the recent technology progress gives a lot of opportunities for generation of 3D models. The realization of good

practices in ski slope lighting should be conformed with the characteristics of the landscape, curvature of the slope, athletes performance and movement direction, safety of the performers and the spectators, avoidance of stray light and light pollution. The possibilities of color changing LED lighting give the designers opportunities to create extraordinary and very attractive scenes even for ski slopes.

5 References

- [1] EN 12193:2009, Light and lighting - Sports lighting, 2009.
- [2] CIE Publication 112:1994, Glare evaluation system for use within outdoor sports and area lighting, 1994.
- [3] <http://www.slopelightingsolutions.com>.
- [4] <http://www.thornlighting.com>.
- [5] <https://www.zumtobel.com>.
- [6] <http://winled.com>.
- [7] <http://www.musco.com/project-showcase/moonstone/>
- [8] <http://www.musco.com/project-showcase/moonstone/>
- [9] http://sports-lighting.co.kr/ski_lighting_en/?lang=en
- [10] <https://www.sportengland.org/media/4181/artificial-sports-lighting-design-guide-2012-051112.pdf>
- [5] CIE Publication 112:1994, Glare evaluation system for use within outdoor sports and area lighting, 1994.

Dimmung des Scheinwerferlichts für zukünftige Elektrofahrzeuge

Pascal Janke¹, Aniella Thoma¹, Dr. Jürgen Locher¹, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Torsten Bertram²

¹Institut für automobiler Lichttechnik und Mechatronik (L-LAB), Steinstraße 18, 59552 Lippstadt

²TU Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, Otto-Hahn-Str. 8, 44227 Dortmund

Zusammenfassung

Im Zuge der Elektrifizierung von Fahrzeugen ergeben sich neue Anforderungen an das Scheinwerferlicht. Ein effizienter Ressourceneinsatz über ein Energiemanagement, in das auch die Fahrzeugbeleuchtung integriert ist, kann dazu beitragen, dass die Reichweite um einige Kilometer erhöht werden kann. Daraus ergeben sich zahlreiche Fragen: Was muss sich am Licht für zukünftige E-Autos ändern? Werden diese Änderungen akzeptiert? Durch die aktuell verwendete LED-Technologie ergeben sich im Scheinwerfer ganz neue Möglichkeiten für Lichtfunktionen. Das bisherige Ziel der Fahrzeugbeleuchtung ist es, viel Licht für eine gute Ausleuchtung der Verkehrssituation zu erzeugen. Die Möglichkeit der Dimmung einzelner LEDs kann aber in Zukunft auch für energieeffiziente Lichtfunktionen genutzt werden.

Um das Potenzial hinsichtlich einer ressourceneffizienten Ausleuchtung bewerten zu können, wurde im HELLA-Lichtkanal in Lippstadt eine Probandenstudie durchgeführt, die der Frage nachgegangen ist, wie weit das Scheinwerferlicht heruntergedimmt werden kann, bevor es für den Fahrer als zu dunkel wahrgenommen wird. In der Studie wurden zwei verschiedene Szenarien betrachtet: Einerseits eine Fahrt durch eine Ortschaft mit Straßenlaternen am Fahrbahnrand bei aktiviertem Abblendlicht sowie andererseits eine Landstraßenfahrt bei aktiviertem Fernlicht. Zuerst wurde den Probanden jeweils eine Referenzlichtverteilung präsentiert, die dem standardmäßigem Abblend- bzw. Fernlicht des verwendeten Scheinwerfers entspricht. Nachdem das Licht für ca. 5 Sekunden ausgeschaltet war, wurde daraufhin eine gedimmte Lichtverteilung eingeschaltet. Die Probanden sollten den Unterschied zwischen der Referenzlichtverteilung und der gedimmten Lichtverteilung bewerten. Die 9-stufige Bewertungsskala, bei der nur jede zweite Stufe beschriftet war, reichte hierbei von „nicht unterscheidbar“, über „akzeptabel“, „gerade zulässig“ und „nicht vertretbar“ bis hin zu „intolerabel“. Für diese Studie wurde ein Matrix-LED-Scheinwerfer mit 84



einzelnen ansteuerbaren LEDs im Hauptmodul sowie 4 weitere Dimmbare LEDs im Vorfeld-Modul genutzt. Die verwendeten Dimmstufen ergaben sich aus der Ansteuerung des Scheinwerfers, wobei auf eine gleichmäßige Dimmung geachtet wurde, so dass trotz der Veränderung des Lichts keine Inhomogenitäten aufgetreten sind.

Die Auswertung der Studie führt zu dem Ergebnis, dass in beiden Szenarien eine Dimmung des Lichts auf ca. 55% des ursprünglichen Gesamtlichtstroms im Vergleich zur Referenz durchschnittlich noch als „akzeptabel“ bewertet wird. Eine Dimmung des Lichts auf ca. 35% des Referenzlichts wird noch als „gerade zulässig“ bewertet. Grundsätzlich werden bei einer Dimmung der LEDs auf ca. 30% die gesetzlichen Werte sowohl für das Abblend- als auch das Fernlicht gerade noch erreicht. Obwohl die prozentuale Dimmung der LEDs in beiden Szenarien gleichwertig vorgenommen wurde, ergibt sich aus der absoluten Lichtreduktion eine starke Diskrepanz. Das Abblendlicht im ersten Szenario hat einen Referenzlichtstrom im gemessenen Winkelbereich von ca. 1600 lm. Beim Fernlicht im zweiten Szenario liegt der Lichtstrom beider Scheinwerfer zusammen bei ca. 2900 lm. Daher ist die absolute Reduktion des Lichtstroms bei gedimmtem Fernlicht deutlich höher als bei gedimmtem Abblendlicht.

Da die Ergebnisse auf die Durchschnittswerte der Probandenbewertung bezogen sind, ist eine Dimmung auf den „gerade zulässigen“ Wert trotz einer gaußverteilten Bewertung nicht sinnvoll. Hier haben bereits einige Probanden die Lichtverteilung als „nicht vertretbar“ bewertet. Nichtsdestotrotz wird das Einsparpotential in einem möglichen Energiesparmodus für Elektrofahrzeuge deutlich. Bei der im Durchschnitt als „akzeptabel“ bewerteten Lichtverteilung gibt es kaum noch Personen, die schlechter als „gerade zulässig“ bewertet haben. Hierbei ist es bereits möglich, sowohl im Abblend- als auch im Fernlichtfall ca. 45% des Lichtstroms zu sparen. Da die Ergebnisse innerhalb der gesetzlichen Rahmenwerte liegen, kann auf eine Untersuchung zur Sichtbarkeit von Objekten verzichtet werden.

Index Terms: headlamp, e-mobility, energy saving, empirical study

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Trend in der Automobilindustrie geht in Richtung E-Mobilität sowie Nachhaltigkeit. Im Zuge der Elektrifizierung des Autos ergeben sich neue Anforderungen an das Energiemanagement des gesamten Fahrzeugs. Jeder Kilometer mehr an Reichweite ist ein Zugewinn und sichert die Mobilität des Fahrers. Um die maximale Reichweite zu erzielen, müssen alle Komponenten des Fahrzeugs hinsichtlich ihres Energieeinsparpotentials betrachtet werden. Für die Scheinwerfer ergeben sich insbesondere durch die LED-Technologie, welche inzwischen zum Stand der Technik geworden ist, neue Möglichkeiten. Neben den bereits durch die LEDs gefestigten Lichtfunktionen, wie das Stadt-, Autobahn- oder das blendfreie Fernlicht, lässt sich das

Potential der LEDs im Scheinwerfer noch auf eine Eco-Funktion, also einem zuschaltbaren Energiesparmodus für eine erhöhte Reichweite, erweitern. Durch die hohe Lichtausbeute der LEDs lässt sich bereits viel Licht mit wenig Energie erzeugen [1]. Bisher wurde diese Eigenschaft hauptsächlich dafür genutzt, viel Licht auf die Straße zu bringen. Doch mit dem Blick auf den Trend der E-Mobilität ergibt sich ein neues Ziel: Mit der Energieeffizienz der LEDs Energie zu sparen.

Neben dem Ziel „Energie zu sparen“ ist eine weitere Herausforderung die Schonung der Hardware. Unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit ist es sinnvoll, kritische Situationen für die Hardware, vor allem für die LEDs, zu vermeiden. Dadurch soll eine lange Lebensdauer, welche weit über den Anforderungen liegt, gewährleistet werden. Somit lässt sich beispielsweise der Scheinwerfer in einem anderen Fahrzeug weiterverwenden, obwohl das ursprüngliche Fahrzeug nicht mehr fahrtüchtig ist. Mit dem Aktor LED ist es möglich, das Temperaturmanagement zu beeinflussen und somit hohe und für den Scheinwerfer schädliche Temperaturen zu vermeiden.

1.2 Fragestellung

Die Auslegung der Eco-Lichtfunktion darf allerdings nicht die Leistungsfähigkeit der Scheinwerfer und damit die Sicht des Fahrers beeinträchtigen. Um die formulierten Ziele umzusetzen, ergeben sich Fragen, die für die Auslegung neuer Funktionen beantwortet werden müssen:

1. Wie weit kann das Licht bzw. der Lichtstrom reduziert werden, bis es der Fahrer überhaupt bemerkt? und
2. Wie weit kann das Licht bzw. der Lichtstrom reduziert werden, bis es den Fahrer stört und als unzureichend empfunden wird?

Beide Fragen werden vermutlich vor dem Hintergrund der stark subjektiven Helligkeitswahrnehmung von Fahrer zu Fahrer unterschiedlich beantwortet werden. Ebenso spielen bei der Einschätzung und Bewertung die persönlichen Erfahrungen eine wichtige Rolle. Daher sollen die Aspekte in einer Probandenstudie mit einer hinreichend großen Stichprobe untersucht werden.

2 Aufbau und Ablauf der Probandenstudie

2.1 Scheinwerfer(technologie)

Als Grundlage für die Untersuchung wurde ein Matrix-LED-Scheinwerfer genutzt. Explizit ist es ein Scheinwerfer mit 84 einzeln ansteuerbaren LEDs. Die LEDs wurden jeweils mit einem pulsweitenmodulierten (PWM) Signal auf die gewünschte Stufe gedimmt. Hiermit lassen sich unter anderem Lichtfunktionen wie das Abblendlicht und das blendfreie Fernlicht realisieren. Abbildung 1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau dieses Moduls. Zusätzlich zu dem Hauptmodul sind im Scheinwerfer jeweils 4 Vorfeld-LEDs verbaut. Diese leuchten den unmittelbaren Bereich vor dem Fahrzeug aus.

Generell lässt sich sagen, dass es sich hier um einen Scheinwerfer für die Fahrzeugoberklasse handelt und sich die lichttechnischen Werte deshalb deutlich über den gesetzlichen Mindestanforderungen bewegen. Somit wird sichergestellt, dass bei einer leichten Dimmung nicht sofort die gesetzlichen Grenzwerte unterschritten werden.

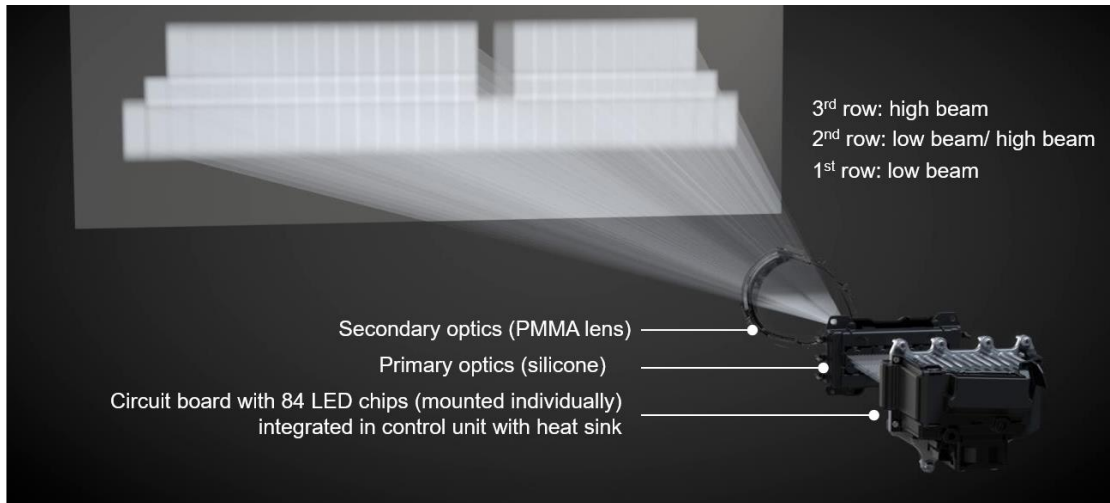


Abbildung 1: Aufbau und exemplarische Ausleuchtung auf einer Wand des im Scheinwerfer verwendeten Hauptmoduls.

Für diese Untersuchung wurde der genannte Scheinwerfer modifiziert. Serienmäßig ist das Licht der Vorfeld-LEDs nicht separat ansteuerbar und wird mit voller Leistung betrieben. Im hier verwendeten Scheinwerfer wurden die LEDs neu kontaktiert, so dass eine Dimmung des Vorfeld-Lichts möglich ist. Dies hat den Zweck, dass keine Inhomogenitäten in den gedimmten Lichtverteilungen entstehen.

Ein weiterer Grund für die Modifikation ist, dass ebenso bei den Vorfeld-LEDs Energie gespart werden könnte. Denn der Energieverbrauch der LEDs ist linear von der Bestromung bzw. des PWM-Signals abhängig [2]. Der Gesamtscheinwerfer hat jedoch neben den Leuchtquellen noch weitere elektrische Verbraucher, wie z.B. den Lüfter, Steuergeräte oder einen Schrittmotor für die dynamische Lichtweitenregulierung (LWR). Daher lässt sich durch Dimmen der LEDs nicht der Gesamtenergieverbrauch linear reduzieren. Da die LEDs aber der Primärverbraucher ist, hat das Dimmen einen großen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch.

2.2 Szenarien und Fragebogen

Für die Untersuchung einer ressourceneffizienten Ausleuchtung der Straße unter Berücksichtigung der Fahrerakzeptanz ist es nötig, die Rahmenbedingungen klar zu definieren. Insbesondere die Fahrszenarien müssen hierbei dem Probanden verständlich sein. Denn mit „advanced driving beam“ (adb)-Funktionen gibt es bereits für unterschiedliche Fahrsituationen verschiedene Lichtfunktionen, die dem Fahrer eine möglichst gute Ausleuchtung der Straße in der jeweiligen Verkehrssituation ermöglichen. Durch Lichtfunktionen wie Stadt-, Autobahn- oder blendfreies Fernlicht,

die bereits einige Fahrer bzw. Probanden kennen können, ist eine Abgrenzung in der Studie nötig. Daher wurden zwei Szenarien verwendet, die vermeintlich für die meisten Fahrer und Fahrzeuge immer noch die Standardfunktionen sind:

Das erste Szenario, welches in der Studie betrachtet wurde, war eine innerstädtische Fahrsituation. Da es in Städten in der Regel überall Straßenlaternen gibt, wurden diese auch genutzt. Hierfür wurden im HELLA Lichtkanal in Lippstadt, wo die Studie durchgeführt wurde, auf einer 140 m lange Straße im Tunnel, die LED-Straßenlaternen aktiviert. Die Idee hinter dem Szenario ist, dass durch die Umfeldbeleuchtung in der Stadt das eigene Scheinwerferlicht nicht dieselbe Relevanz für die eigene Sicht hat wie außerhalb von Städten [3]. Als Lichtfunktion des Fahrzeugs wurde das Abblendlicht genutzt. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die sich den Probanden dargestellte Szene. Zur besseren Vergleichbarkeit der Dimmstufen sind die Teilbilder in Graustufen dargestellt.



Abbildung 2: Graustufen-Darstellung von Leuchtdichteaufnahmen zum ersten Szenario mit Abblendlicht und angeschalteten LED-Laternen. Links: Referenzlichtverteilung. Rechts: auf 51% gedimmte Lichtverteilung.

Das zweite Szenario ist eine Landstraßenfahrt. Hier sollten sich die Probanden vorstellen, sie fahren allein auf einer Landstraße mit aktiviertem Fernlicht.

In der Studie sollten für beide Szenarien die Wirkung unterschiedlicher Dimmstufen untersucht werden. Dazu wurde zunächst eine Referenzlichtverteilung für 5 s gezeigt, welche der serienmäßigen Einstellung dieser Lichtfunktion entsprach. Danach wurde die zu vergleichende Lichtverteilung ebenfalls für 5 s gezeigt. Die zweite Scheinwerferlichtverteilung war entweder gedimmt oder entsprach wieder der Referenzlichtverteilung. Die Aufgabe der Probanden war es nun, die zweite Lichtverteilung mit der Referenzlichtverteilung zu vergleichen und zu bewerten. Hierfür hatten die Probanden einen Fragebogen vorliegen, siehe Abbildung 3. Der Fragebogen war in eine 9-stufige Skala [4] unterteilt und reichte von „nicht unterscheidbar“ bis „intolerabel“. Die Zwischenstufen waren mit „akzeptabel“, „gerade zulässig“ und „nicht vertretbar“ gekennzeichnet. Die Nummerierung entsprach der fortlaufenden Nummer der Lichtverteilung und wurde zur besseren Orientierung des Probanden jeweils ebenso erwähnt.

Die zweite Lichtverteilung war im Vergleich zur Referenz-Lichtverteilung										
Nr.	Nicht unterscheidbar		akzeptabel		Gerade zulässig		Nicht vertretbar		intolerabel	Nr.
1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1
2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	2
3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	3

Abbildung 3: Fragebogen zur Bewertung der Lichtverteilung im Vergleich zur Referenzlichtverteilung.

Zusätzlich wurde in einem Eingangsfragebogen noch nach dem Alter, dem Geschlecht, der persönlichen Einschätzung zur Erfahrung in der Bewertung von Scheinwerfern, einer Rot-Grün-Schwäche und nach einer Sehhilfe gefragt. Ein Feld für weitere Kommentare war ebenso vorhanden.

2.3 Ablauf

Die Studie wurde aufgrund der Durchführungsökonomie in Gruppen mit 7 bis 9 Probanden ausgerichtet. Die Probanden befanden sich hinter den Scheinwerfern mit Blick auf die Straße. Nach dem Ausfüllen des Eingangsfragebogens wurde eine allgemeine Instruktion gegeben. Den Probanden war es nicht gestattet miteinander zu reden und es wurde ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es auf die persönliche Einschätzung ankommt. Danach wurde das erste Szenario vorgestellt. Für jedes Szenario gab es jeweils eine Beispiellichtverteilung.

Der weitere Ablauf, je Szenario, war wie folgt:

- Zeigen der Referenzlichtverteilung für 5 s mit Verweis, dass dies die Referenzlichtverteilung sei,
- Ausschalten der Scheinwerfer für 3 s,
- Zeigen der zu bewertenden Lichtverteilung für 5 s mit Verweis auf die laufende Nummer,
- Ausschalten der Scheinwerfer für 3 s,
- Wiederholung der Schritte für die nächste Lichtverteilung.

Es wurden insgesamt 15 Abblend- bzw. 20 Fernlichtverteilungen gezeigt. Zum Szenariowechsel gab es eine kurze Pause von einer halben Minute, welche für das Ein- bzw. Ausfahren der LED-Laternen benötigt wurde. Danach wurde mit dem zweiten Szenario nach demselben Schema fortgefahren.

Die zu bewertenden Lichtverteilungen wurden nach einer vorher festgelegten Zufallsreihenfolge gezeigt. Nicht gedimmte Lichtverteilungen, also die Referenzlichtverteilung, wurden ebenso gezeigt und sollten bewertet werden. Es gab 2 unterschiedliche Zufallsreihenfolgen. Insgesamt dauerte die Erhebung ca. 35 min pro Gruppe.

3 Ergebnisse

3.1 Stichprobenbeschreibung

Insgesamt haben 68 Probanden in 8 Gruppen teilgenommen. Das Durchschnittsalter war 37 Jahre und erstreckte sich von 19 bis 61 Jahren. 25 der Probanden und somit 36,8% waren Frauen. 43 trugen eine Sehhilfe und 2 gaben eine Rot-Grün-Schwäche an. Die Probanden unterschieden sich in ihrer Vorerfahrung in der Bewertung von Scheinwerfern, 33 hatten keine Erfahrung, 25 wenig und 10 viel Erfahrung.

Keine der zusätzlich erhobenen Daten hatten einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse. Die Platzwahl des Probanden ebenso nicht. Lediglich die Reihenfolge hatte einen Einfluss. Da jedoch zwei unterschiedliche Reihenfolgen gezeigt wurden, wurde dieser ausgeglichen.

3.2 Auswertung

In der Studie wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Dimmstufen von Scheinwerferlichtverteilungen auf die Bewertung der Ausleuchtung vor dem Fahrzeug von Probanden im Vergleich zu einer Referenzlichtverteilung auswirkt. Allgemein lässt sich zu den Ergebnissen sagen, dass die Bewertungen konsistent sind und den Erwartungen entsprechen: Umso höher die Dimmung der Scheinwerfer war, desto schlechter wurde diese Lichtverteilung im Durchschnitt bewertet. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen dies sehr deutlich. In den Abbildungen sind die Durchschnittsbewertungen mit deren Standardabweichung über der jeweiligen prozentualen Dimmung der Lichtverteilung für die zwei unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Der prozentuale Wert ergibt sich aus dem gemessenen Gesamtlichtstrom der jeweiligen gedimmten Lichtverteilung. Hierbei können geringe Abweichungen zum tatsächlichen Lichtstrom auftreten, da Aufgrund der Vielzahl der nötigen Messungen ein verkleinerter Winkelbereich gemessen wurde. Die ersten beiden Werte zeigen die bewerteten Referenzlichtverteilungen.

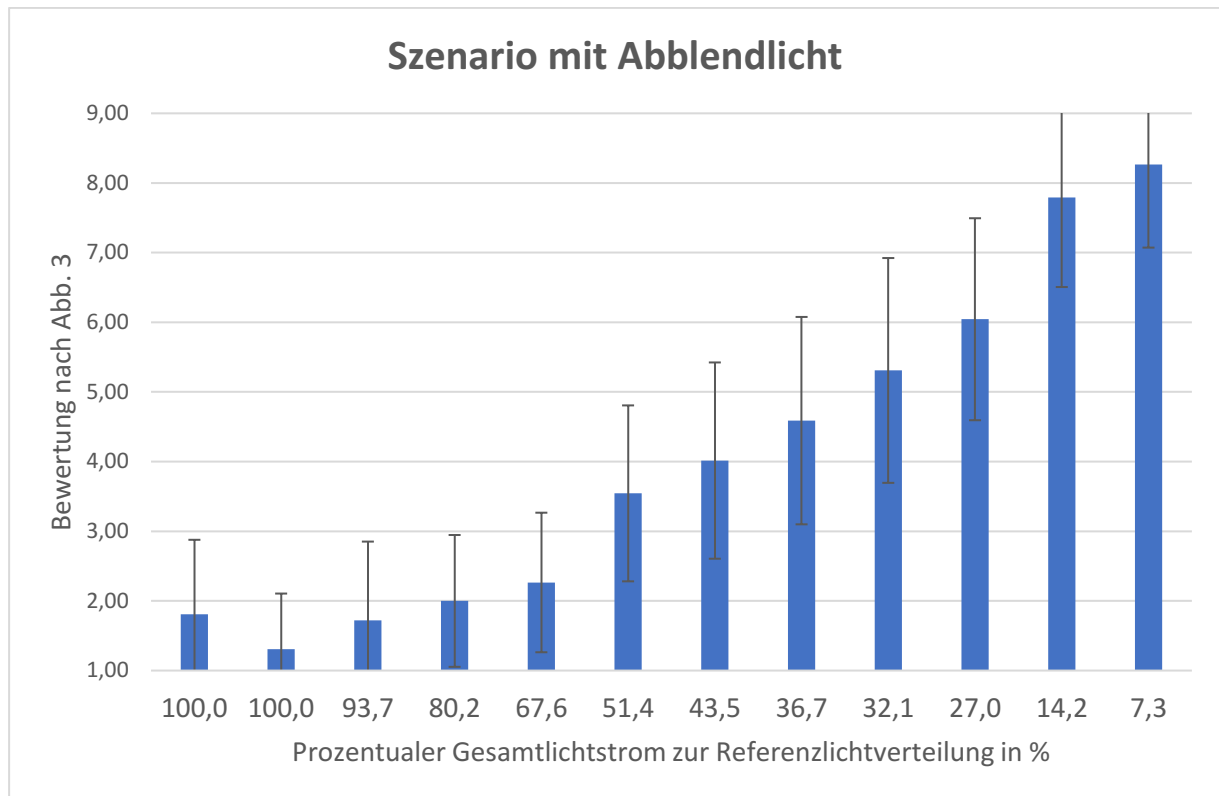


Abbildung 4: Bewertung der gedimmten Abblendlichtverteilungen über dem prozentualen Gesamtlichtstrom, verglichen zur Referenzlichtverteilung. Hier waren die LED-Laternen auf der Straße eingeschaltet, um eine Stadtfahrt zu simulieren.

Beim Szenario mit Abblendlicht entsprechen die 100%, also die Referenzlichtverteilung, einem Gesamtlichtstrom von ca. 1600 lm.

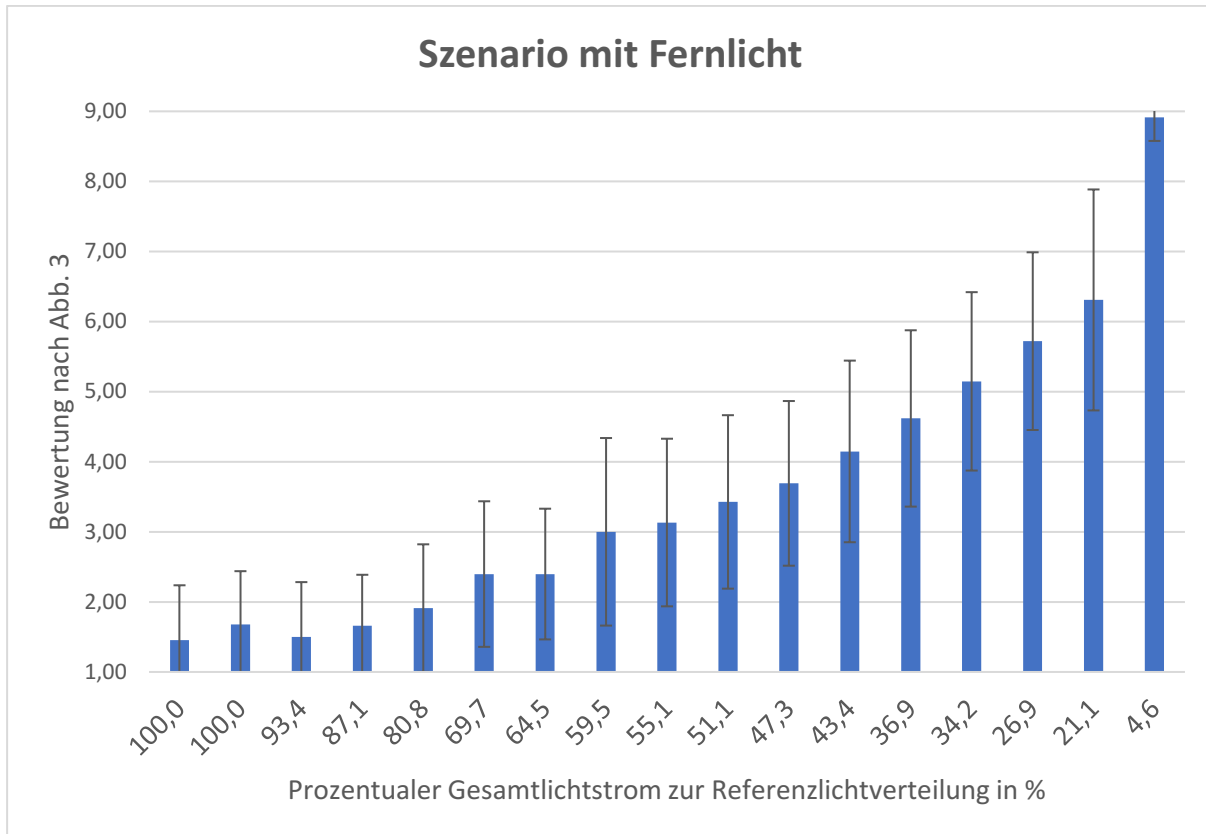


Abbildung 5: Bewertung der gedimmten Fernlichtverteilungen über dem prozentualen Gesamtlichtstrom, verglichen zur Referenzlichtverteilung. Hier wurde eine Landstraßenfahrt simuliert.

Beim Szenario mit Fernlichtverteilung entsprechen die 100% einem Gesamtlichtstrom von ca. 2900 lm.

Bei beiden Bewertungen ist auffällig, dass die nicht gedimmte Stufe, also die zweimal gezeigte Referenzlichtverteilung, nicht immer mit „nicht unterscheidbar“ bewertet wurde. Bereits hier gibt es Schwankungen in der Bewertung. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass alle Bewertungen auf dem Niveau bis zu einer Bewertung von „2“ als nicht wahrnehmbare Veränderung gewertet werden können. Dies beantwortet also bereits die erste Fragestellung, wie weit man das Licht reduzieren kann, ohne dass es der Fahrer bemerkt, nämlich bis zu ca. 80% des ursprünglichen Lichtstroms.

Weiter haben die Bewertungen beider Szenarios gemein, dass es eine hohe Übereinstimmung gibt. Die Muster der Ergebnisse zwischen Abblendlicht und Fernlicht sind nahezu identisch. Viele Dimmstufen werden bei beiden Szenarios gleich bewertet, siehe ca. 80% (Bewertung auf ca. 2), 51% (Bewertung auf ca. 3,3), 32 bzw. 34% (Bewertung auf ca. 5,2) und 27% (Bewertung auf ca. 6) des ursprünglichen Gesamtlichtstroms. Trotz unterschiedlicher Szenarien und Lichtverteilungen, wird dieselbe prozentuale Dimmung gleich bewertet. Dies zeigt, dass die Straßenlaternen

das eigene Abblendlicht sehr gut unterstützen und auf das Niveau einer Fernlichtverteilung heben.

Für die zweite eingangs gestellte Frage, wie weit man das Licht reduzieren kann, bis es den Fahrer stört, muss man sich 2 Bewertungspunkte genauer anschauen:

Durchschnittlich als „akzeptabel“ bewertet

Die von den Probanden durchschnittlich als „akzeptabel“ bewertete Dimmstufe liegt beim Abblendlichtszenario bei 51% und beim Fernlichtszenario bei 55% des Lichtstroms der Referenzlichtverteilung. Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Bewertungsverteilung. Grundsätzlich ist eine gute Gaußverteilung in der Bewertung zu sehen. Ähnlich ist dies bei allen Einzelbewertungen wiederzufinden. Explizit in dieser Bewertung ist eindeutig der Schwerpunkt der Bewertung bei der 3, also „akzeptabel“ zu sehen. Nichtsdestotrotz gibt es hier einige Probanden, die mit 5 bis 6 bewertet haben, also „gerade zulässig“. Niemand hat die Lichtverteilung mit „nicht vertretbar“ oder schlechter bewertet. Daher kann vermutet werden, dass bis hierhin gedimmt werden kann, ohne dass es den Fahrer stört.

Das Szenario für das Abblendlicht verhält sich analog zum Fernlicht.

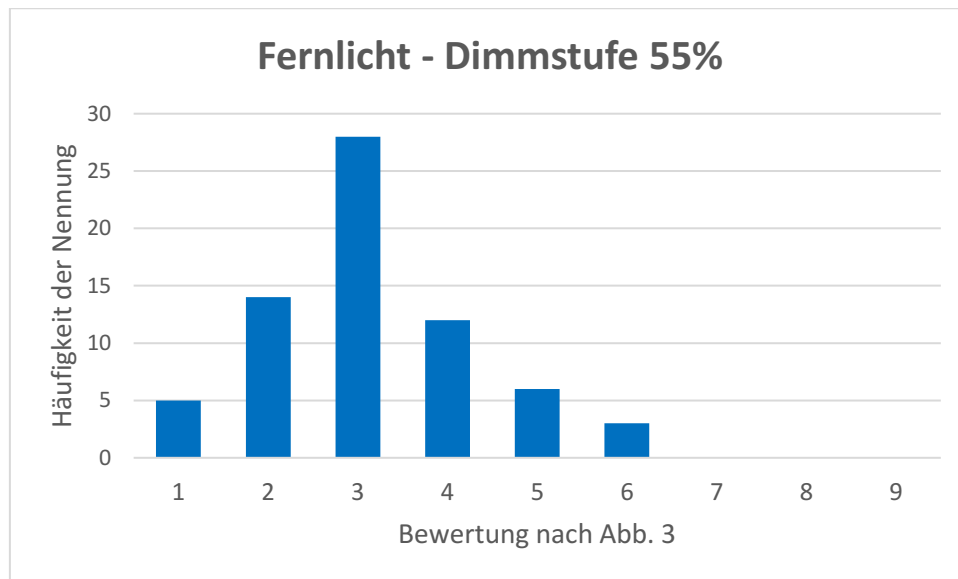


Abbildung 6: Bewertung der Fernlicht-Dimmstufe bei 55% des ursprünglichen Gesamtlichtstroms. Es ist die Häufigkeit der Nennungen über der Bewertung aufgetragen.

Durchschnittlich als „gerade zulässig“ bewertet

Im Durchschnitt wurden als „gerade zulässig“ die Dimmstufe bei 32% für das Abblendlicht- und 34% für das Fernlichtszenario bewertet. Auch diese sind wieder sehr nah beieinander. Abbildung 7 zeigt die Bewertungsverteilung für das Szenario mit aktiviertem Fernlicht. Auch hier ist, ähnlich wie in Abbildung 6, eine gaußverteilte Bewertung zu erkennen. Doch der Graph macht deutlich, dass bereits viele Probanden diese Lichtverteilung als „nicht vertretbar“ ansehen. Daher ist diese Stufe, wenn man

eine breite Masse der Zustimmung abdecken will, nicht mehr für eine mögliche umsetzbare Dimmung in Betracht zu ziehen.

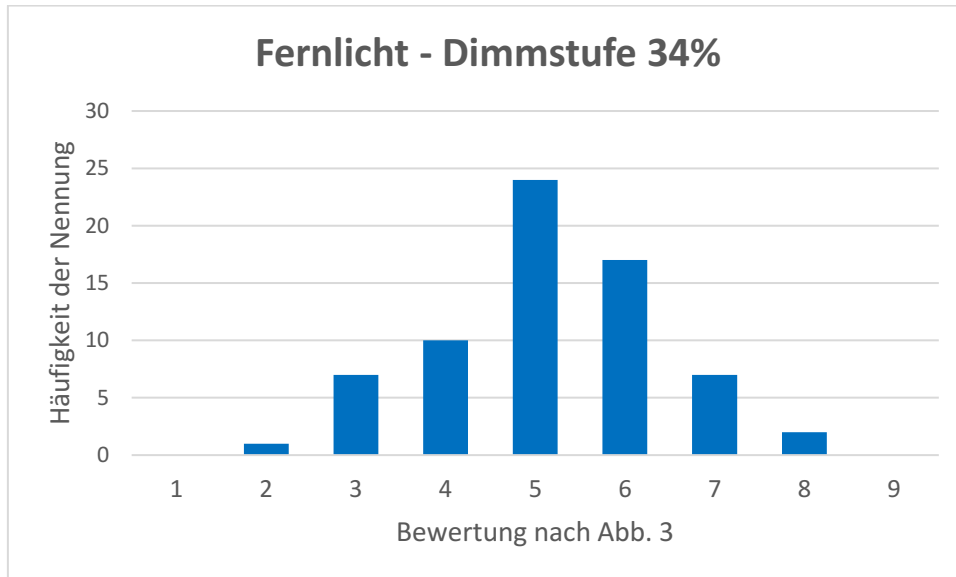


Abbildung 7: Bewertung der Fernlicht-Dimmstufe bei 34% des ursprünglichen Gesamtlichtstroms. Es ist die Häufigkeit der Nennungen über der Bewertung aufgetragen.

Bei dieser Stufe werden sowohl für das Abblend- als auch für das Fernlicht die gesetzlichen Werte gerade eben erreicht. Nach der ECE Regelung 8, werden explizit bei der nächsten Dimmstufe beim Abblendlicht der Messpunkt 50R und beim Fernlichtlicht der E_{max} -Wert von mind. 48 lx in 25m Entfernung nicht mehr erreicht [5].

3.3 Energieeinsparpotential

Durch die Probandenstudie haben sich mehrere sinnvoll umsetzbare Dimmstufen herausgestellt. Die Dimmstufen sind für die beiden Szenarien Abblendlicht und Fernlicht vergleichbar. Hierbei sind besonders die Dimmstufen bei ca. 80% des ursprünglichen Lichtstroms zu erwähnen, bei denen dem Fahrer nicht bzw. kaum auffällt, dass überhaupt etwas geändert wurde. Die nächsten Dimmstufen, die besonders hervorstechen, liegen bei ca. 51 – 55%, je nach Szenario. Hier wird die Lichtverteilung durchschnittlich als „akzeptabel“ bewertet, aber einzeln nicht schlechter als „gerade zulässig“. Die letzte zu betrachtende Dimmstufe liegt bei ca. 32 – 34%, mit einer durchschnittlich als „gerade zulässig“ bewerteten Lichtverteilung. Für diese Stützstellen ergeben sich folgende Stromaufnahmen am gesamten Experimentalsystem, bei jeweils einer Spannungsquelle von 12,5 V:

Bewertung	Ablendlicht			Fernlicht		
	Gesamtlichtstrom	Stromaufnahme		Gesamtlichtstrom	Stromaufnahme	
		absolut	prozentual		absolut	prozentual
(Referenz)	100 %	10,3 A	100 %	100 %	14,8 A	100 %
nicht unterscheidbar	80 %	9,2 A	89,3 %	80 %	12,9 A	87,2 %
akzeptabel	51 %	7,7 A	74,8 %	55 %	10,5 A	70,9 %
gerade zulässig	32 %	6,4 A	62,1 %	34 %	8,5 A	57,4 %

Tabelle 1: Stromaufnahme des gesamten Versuchsaufbaus im Vergleich der jeweiligen Szenarios und der besonderen Dimmstufen.

Aufgrund der weiteren Verbraucher im Scheinwerfer, neben den LEDs selbst, und der Modifizierung der Vorfeld-LEDs, ist der Stromverbrauch nicht gleich anteilig zum Gesamtlichtstrom gesunken. Die Proportionalität ist aber vorhanden.

Tabelle 1 macht deutlich, dass das Einsparpotential vorhanden ist. Bei Fernlicht ist es natürlich noch höher, da die Referenz-Fernlichtverteilung mit höheren Lichtströmen betrieben wird. Somit ist bei gleicher prozentualer Dimmung der Energieverbrauch geringer.

4 Fazit

Die Probandenstudie hatte das Ziel, die Fragen zu beantworten, wie weit man die LEDs im Scheinwerfer herunterdimmen kann, bis es der Fahrer bemerkt und bis es ihn stört. Diese Fragen konnten in dieser Studie beantwortet werden. Das Energieeinsparpotential der LEDs kann sinnvoll genutzt werden, um einen möglichen Energiesparmodus für zukünftige Elektrofahrzeuge zu nutzen. Denn das Licht lässt sich verhältnismäßig stark dimmen, bevor es „kritisch“ für das Empfinden des Fahrers wird. Um ca. 20 % lässt sich der Gesamtlichtstrom beider Scheinwerfer zusammen reduzieren, bevor es der Fahrer merken würde. Hier lässt sich schon bis zu 14 W bei Ablendlicht und 24 W bei Fernlicht an Energie einsparen. Das Licht kann sogar bis zu 50% reduziert werden, ohne dass es den Fahrer stört. Hierbei empfindet eine Mehrheit die Lichtverteilung noch als „akzeptabel“. Das Energieeinsparpotential liegt bei bis zu 32 W bei Ablendlicht und 53 W bei Fernlicht. Möchte man den Energiesparmodus ausreizen und bis an die gesetzlichen Grenzen verschieben, ist dies zwar möglich, aber nicht sinnvoll. Denn hier empfinden eine große Anzahl der Probanden bereits, dass die Lichtverteilung „nicht vertretbar“ ist.

Mit den Ergebnissen dieser Studie soll nun ein Eco-Modus in einen Serienscheinwerfer implementiert werden und die tatsächliche Energieersparnis evaluiert werden. Weiter ist eine dynamische Studie in Planung.

5 Literaturverzeichnis

- [1] M. Schratz, C. Gupta, T. J. Struhs and K. Gray, "A New Way to See the Light: Improving Light Quality with Cost-Effective LED Technology," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 55-62, July-Aug. 2016.
- [2] W. A. Rodrigues, L. M. F. Morais, P. F. Donoso-Garcia, P. C. Cortizo and S. I. Seleme, "Comparative analysis of power LEDs dimming methods," IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, VIC, 2011, pp. 2907-2912.
- [3] B. Schlag, I. Petermann, G. Weller, and C. Schulze, „Mehr Licht – mehr Sicht – mehr Sicherheit?“, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, pp. 69-70, 2009
- [4] J.B. de Boer, "Visual perception in road traffic and the field of vision of the motorist", Public Lighting, p. 44, 1967
- [5] UN Economic Commission for Europe: Regelung Nr. 8 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugscheinwerfern mit Halogenglühlampen (H1, H2, H3, HB3, HB4, H7, H8, H9, HIR1, HIR2 und/oder H11) für asymmetrisches Abblendlicht oder für Fernlicht oder für beides, 2010

Anwendung von Projektionstechniken im automobilen Interieurbereich

*Baumann, Maximilian; Helmer, Melanie; Neumann, Cornelius
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)
Engesserstraße 13, Geb. 30.34, 76131 Karlsruhe
Tel. 0721 608-47383, maximilian.baumann@kit.edu, www.lti.kit.edu*

Abstract

Scheinwerfer mit adaptiver Lichtverteilung und Matrixbeam sind mittlerweile als Serienstand anzusehen. [1] Die Anwendung verschiedener Projektionstechniken hingegen ist in der automobilen Lichttechnik noch in der Entwicklung. Da im Exterieurbereich die Nutzung von Projektionstechniken viele Vorteile, wie beispielsweise lichtbasierte Fahrerassistenz oder Kommunikation hinsichtlich autonomen Fahrens mit sich bringt, liegt die Überlegung nahe, diese auch im Interieurbereich zu nutzen.

Mit Monitoren können verschiedene Nutzeranwendungen an festen, ebenen Flächen im Fahrzeuginnenraum dargestellt werden. Inhalte wie Messenger-Dienste, Social Media Anwendungen, News-Feeds oder Streaming Dienste sind hier möglich. Mit Hinblick auf autonom fahrende Fahrzeuge werden Techniken benötigt, die es erlauben relevante Informationen ortsunabhängig darzustellen.

Dies ist bei der Verwendung von Monitoren durch die feste Einbauposition im Fahrzeug sowie die Flexibilität der Darstellung jedoch stark eingeschränkt. Der Einsatz von Projektionstechniken hingegen ermöglicht es, Informationen an beliebigen Positionen nutzerorientiert darzustellen und ist dabei nicht ausschließlich auf planare Oberflächen beschränkt. Theoretisch betrachtet kann jede beliebige Oberfläche im Fahrzeuginnenraum für die Projektionsdarstellung verwendet werden.



1 Motivation

Die Anwendung projektionsbasierter Leuchten im automobilen Interieur bringt neue Möglichkeiten zur Informationsdarstellung in den Innenraum. Informationen, wie Navigation, Geschwindigkeit, etc. werden bislang auf fest verbauten Anzeigen, wie beispielsweise auch Monitoren dargestellt [2]. Nachteilig ist hier jedoch, dass der Bereich der Informationsdarstellung fest und ortsgebunden ist. Hier stellt sich die projizierte Informationsdarstellung als vorteilhafter dar.

Im Vergleich zu herkömmlichen Monitorsystemen im Cockpit, liegt der Vorteil der Projektion darin, dass die Abbildung auf beinahe jeder beliebigen Oberfläche des Fahrzeuges zu jeder Zeit dargestellt werden kann. Die Information kann somit direkt im aktuellen Sichtfeld des Fahrers präsentiert werden. Dabei ist mit Hinblick auf autonomes Fahren ebenfalls die Informationsdarstellung unabhängig von Fahraufgaben denkbar. Auch anderen Passagieren können beispielsweise Informationen über die befahrene Stadt und deren Sehenswürdigkeiten dargeboten werden.

Um diese nutzerspezifischen Informationen genau an der Stelle darzustellen, auf die sich der Fahrzeuginsasse konzentriert oder gerade seinen Blick wendet ist eine Erfassung der Körperpose [3] nötig, um die Information gezielt und ortsgenau zu präsentieren.

Im Folgenden werden, neben einem kurzen Abriss über den Innenraum des Fahrzeuges, die Materialien und Methoden vorgestellt, die notwendig sind, um Informationen projektorbasiert auf einer Oberfläche darzustellen. Als Grundlage für weitere Forschung zum Thema ortsunabhängige projektorbasierte Informationsdarstellung muss es zunächst möglich sein, Information verzeichnungsfrei auf planaren Oberflächen darstellen zu können. Damit jede Oberfläche des Fahrzeuginnenraums als Projektionsfläche genutzt werden kann, sind mehrere Projektoren als System einzusetzen. Dieses muss zunächst kalibriert werden, dass die Bildausgabe in Abhängigkeit der Lage des Systems zur Projektionsfläche transformiert werden kann.

2 Stand der Technik

2.1 Ambiente Innenraumbeleuchtung

Ambiente Innenraumbeleuchtung in Form von Lichtleisten oder indirekter, farbiger Beleuchtung verschiedener Bereiche des Fahrzeuges sind derzeit bei vielen Automobilherstellern Serienstand und werden in vielen Fahrzeugen verbaut [4]. Neben der ästhetischen Aufwertung des Innenraums und der Schaffung einer Wohlfühlatmosphäre durch verschiedene, einstellbare Farbkombinationen unterstützt die Ambiente Innenraumbeleuchtung die Passagiere bei der Orientierung im Fahrzeug bei Nacht [5].



Abbildung 1 Lichtleiste im Cockpit des Fahrzeuges [4]

Diese lässt sich im Groben in zwei Bereiche aufteilen:

- **Selbstleuchtende Elemente:** Unter Selbstleuchtenden Elementen sind solche zu verstehen, deren Quelle oder lichtemittierende Fläche durch die Passagiere des Fahrzeuges direkt betrachtet werden können. Dabei gelangt das Licht ohne Reflektion auf direktem Wege in das Auge des Betrachters. Als Beispiel können hier leuchtende Zierleisten auf Lichtleiter-Basis genannt werden (vgl. Abbildung 1).
- **Beleuchtete Flächen:** Beleuchtete Fläche werden von einer oder mehreren Lichtquellen angestrahlt. Der visuelle Eindruck entsteht dabei durch das von der Fläche gestreute und reflektierte Licht, welches in Richtung des Betrachters gesandt wird. Dabei sind das Material, die Farbe sowie die Oberflächenbeschaffenheit maßgeblich dafür verantwortlich, wie die Fläche wahrgenommen wird. Beleuchtete Flächen sind beispielsweise Oberflächen des Fonds, die durch die Haltegriff- oder Leseleuchten angestrahlt werden oder der Fußraum des Beifahrers.

Durch die Verwendung von LEDs in Kleinleuchten im Innenraum bieten sich gestaltungstechnische Möglichkeiten, deren Realisierung mit Leuchten auf Glühlampenbasis in der Vergangenheit so nicht möglich gewesen sind. Durch die geringe Größe der LED, den schnellen Schaltzeiten und verschiedenen Farb- und Weißtönen, können Leuchten mit mehreren LED Chips auch unterschiedlicher Farbe gebaut werden.

2.2 Informationsschnittstelle

Informationen können den Insassen des Fahrzeuges unterschiedlich dargeboten werden. Eine der ältesten Darstellungsmöglichkeiten sind die analogen Instrumente zur Anzeige der Geschwindigkeit [2]. Auch Warn- und Signallampen, im Tachobereich

der Instrumententafel, zeigen dem Fahrer an, dass eine Fehlfunktion vorliegt oder sollen dessen Aufmerksamkeit auf ein bestimmtes Ereignis lenken.

Head-up-Displays (HUD) stellen eine modernere Variante der Informationsdarstellung für den Fahrer dar. Die Geschwindigkeit oder Navigationselemente werden direkt im Bereich dessen Sichtfelds in der Windschutzscheibe sichtbar gemacht [6]. Vorteil dieses Systems ist, dass die nutzerrelevanten Informationen dem Fahrer direkt ins Sichtfeld projiziert werden, sodass sich dessen Blick nicht übermäßig von der Straße abwendet.

Über einen oder mehrere Monitore werden derzeit überwiegend Informationen dem Fahrer oder anderen Insassen des Fahrzeuges präsentiert [1]. Dabei ersetzen diese, Stand heute immer öfter auch herkömmliche Rundinstrumente zur Anzeige der Geschwindigkeit oder der Drehzahl. Auch Displays mit Touch-Funktion, zur In-System-Navigation oder der Interaktion mit dem Fahrzeug, werden mittlerweile verbaut [7].



Abbildung 2 Monitorsysteme im Cockpit und Fond des Fahrzeuges [7]

Wie in Abbildung 2 zu sehen, sind Monitore sowohl im Cockpit als auch im Fond des Fahrzeuges zu finden. Neben der Funktion, Informationen zur Fahrt und zum Fahrzeug anzuzeigen, können diese im Fond auch als Infotainment-System zum Abspielen von Filmen oder Anzeigen von Nachrichten genutzt werden.

Eine neue Methode der Informationsdarstellung über Projektion, sowie deren Möglichkeiten und Vorteile gegenüber den beschriebenen Monitorsystemen wird im Folgenden präsentiert.

3 Material

3.1 Demonstratoraufbau

Zur Untersuchung der überlagerten Projektion und deren Einsatzmöglichkeiten wird ein Demonstrator aufgebaut. Bestandteil dessen sind zwei Kurzstanzprojektoren der Firma *Optoma*. Diese werden in definiertem Abstand zur Projektionsfläche montiert und ausgerichtet (vgl. Abbildung 3).

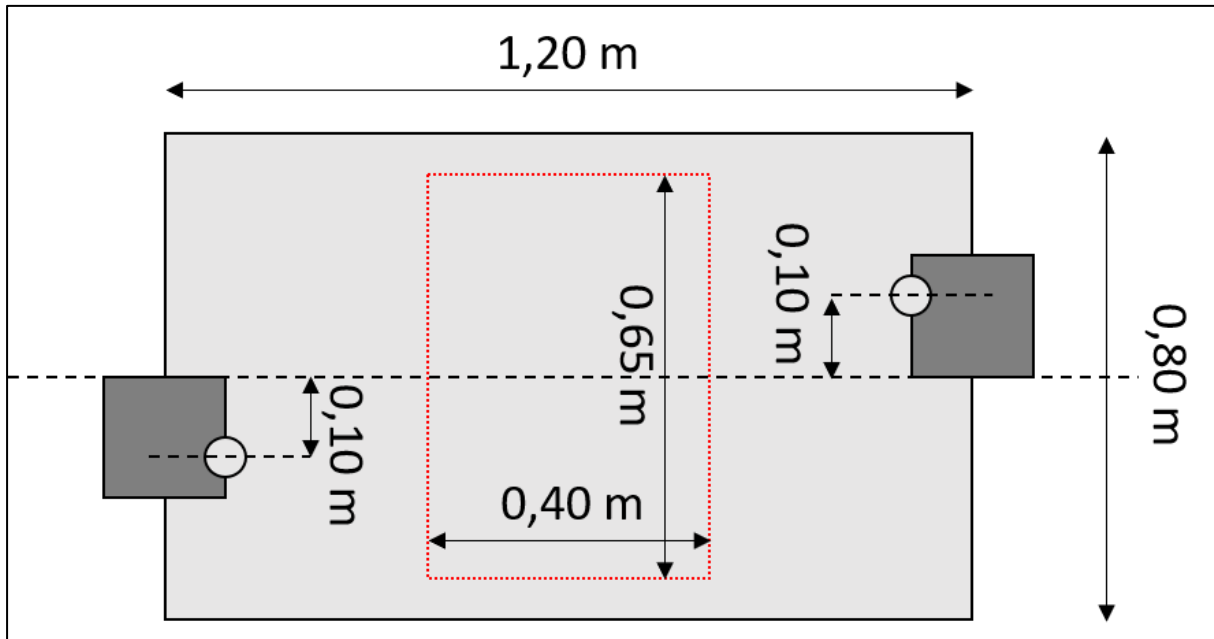


Abbildung 3 Maße des Demonstratoraufbaus

Um auch zukünftig Änderungen am Demonstrator ohne größeren Aufwand vornehmen zu können, erfolgt der Aufbau mit Aluminium-Profilstangen der Firma *Misumi*. Diese ermöglichen zudem einen teilmodularen Aufbau, sodass einzelne Module auch zu späteren Zeitpunkten noch verschoben oder ausgetauscht werden können.

In die Projektionsfläche aus Birkenmultiplex sind an den Eckpunkten, des in Abbildung 3 rot eingezeichneten, Projektionsbereichs Photowiderstände eingesetzt. Diese werden im kommenden Abschnitt zur Kalibrierung der Projektoren verwendet.

3.2 Kalibrierung der Projektionen

Um die Projektionen des Multiprojektorsystems präzise Überlagern zu können, müssen die Parameter der Projektoren bestimmt werden. Die Extrinsischen Parameter beschreiben die Position und die Orientierung des Projektors (also die Pose) im Raum. Die intrinsischen Parameter stellen die Parameter der inneren Orientierung dar, es handelt sich um konstante, projektorinterne Größen [8]. Diese werden zur Charakterisierung der Projektoren benötigt und müssen bestimmt werden.

Durch die zuvor beschriebenen Photowiderstände ist es möglich die Lage und Pose der Projektoren relativ zur Projektionsfläche mit Hilfe entsprechender Software zu bestimmen. Zu diesem Zweck werden von jedem Projektor nacheinander untenstehende Projektionsmuster (vgl. Abbildung 4) auf die Fläche projiziert. [9] Die Sensoren erfassen dabei den aktuell anliegenden Helligkeitswert auf der Sensorfläche.

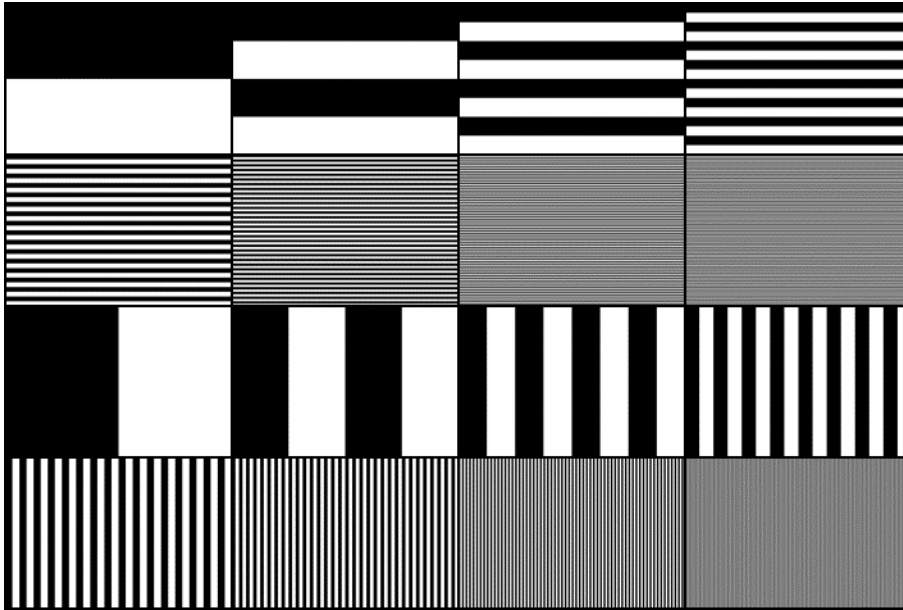


Abbildung 4 Streifenmuster zur Kalibrierung der Projektoren

Damit der gemessene Sensorwert dem entsprechenden Helligkeitswert (Hell oder Dunkel) zugeordnet werden kann, wird zunächst pro Beamer ein komplett weißes Bild auf die Fläche projiziert und der Wert von jedem Sensor als Referenzwert aufgenommen. Über diesen Wert wird ein Toleranzbereich für jeden Sensor definiert.

Zunächst werden die horizontalen Streifen nacheinander projiziert und die Sensorwerte bewertet als Null oder Eins gespeichert. Bei jedem Durchgang verdoppelt sich die Anzahl der Streifen. Nachdem sowohl die horizontalen als auch die vertikalen Streifenmuster projiziert wurden, liegen pro Sensor zwei Bitfolgen vor. Diese können im Anschluss dazu genutzt werden, um die Position des jeweiligen Sensors in der Abbildung auf der Projektionsfläche zu bestimmen.

Bitfolge Horizontale Streifen: Bin(01011011) → Dec(91)	Horizontale Bildkoordinate: $\frac{(91 + 1) \cdot \#Spalten\ Bild}{\#Streifen}$	(1)
Bitfolge Vertikale Streifen: Bin(11010111) → Dec(215)	Vertikale Bildkoordinate: $\frac{(215 + 1) \cdot \#Zeilen\ Bild}{\#Streifen}$	

Die Positionen der Sensoren werden im kommenden Abschnitt weiterverarbeitet. Zu beachten ist, dass die sich aus der binären Folge ergebende, dezimale Zahl um Eins erhöht werden muss, da die Zeilen und Spalten des Bildes nicht mit Null beginnen. Die resultierende Zahl muss anschließend mit einem Normierungsfaktor auf die Auflösung des darzustellenden Bildes angepasst werden.

4 Überlagerung

Problematisch bei überlagerten Projektionen ist, dass Lage und Pose der Projektoren im Weltkoordinaten genau bekannt sein müssen. Das Weltkoordinatensystem dient dabei als gemeinsamer Bezugspunkt, auf den sich alle Objekte im Raum referenzieren. Bereits kleine Abweichungen der Orts- und Posenangabe, sind im Projektionsbereich als Unschärfe oder sichtbare Abstand der jeweiligen Abbildungen zu erkennen (vgl. Abbildung 5).

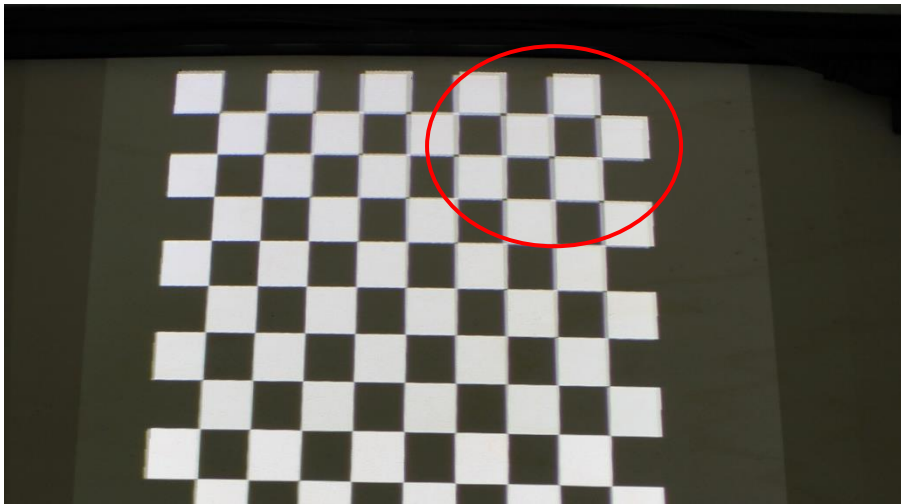


Abbildung 5 Fehler bei der Überlagerung der projizierten Abbildungen

Die Photowiderstände, welche in Abschnitt 3.2 bereits zur Kalibrierung der Projektoren verwendet wurden, sind dabei direkte Bezugspunkte zwischen Weltkoordinatensystem und dem physischen Demonstrator. Nachdem die Koordinaten der Sensoren im Projektorbild für jeden Beamer bestimmt wurden, kann die Bildausgabe dieser trapezförmig verzerrt werden. Die Sensoren befinden sich somit an den Eckpunkten der Abbildungen. Bei korrekter Kalibrierung werden die Abbildungen vollständig überlagert und Unterschiede zwischen den Projektionen sind nicht sichtbar. Abbildung 6 zeigt die Schritte, die zur Erzeugung der überlagerten Projektion gemacht werden müssen.

Der hier behandelte Aufbau beschränkt sich auf vier Photosensoren. Zukünftig sollen mehr Sensoren zum Einsatz kommen, um die überlagerte Projektion auch auf nicht-planaren Oberfläche darstellen zu können. In Bezug auf den Automobilen Innenraum ist es geplant, überlagerte Projektionen auf den Oberflächen und Armaturen des Fahrzeuges abzubilden.

Für den Fahrer relevante Informationen können somit ortsunabhängig im Innenraum dargestellt werden. Dies stellt gegenüber herkömmlichen Informationssystemen auf Monitorbasis den Vorteil dar, dass es nur wenige Beschränkung hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit der Projektionsfläche, des Bauraums oder des Einbauorts des Systems gibt.

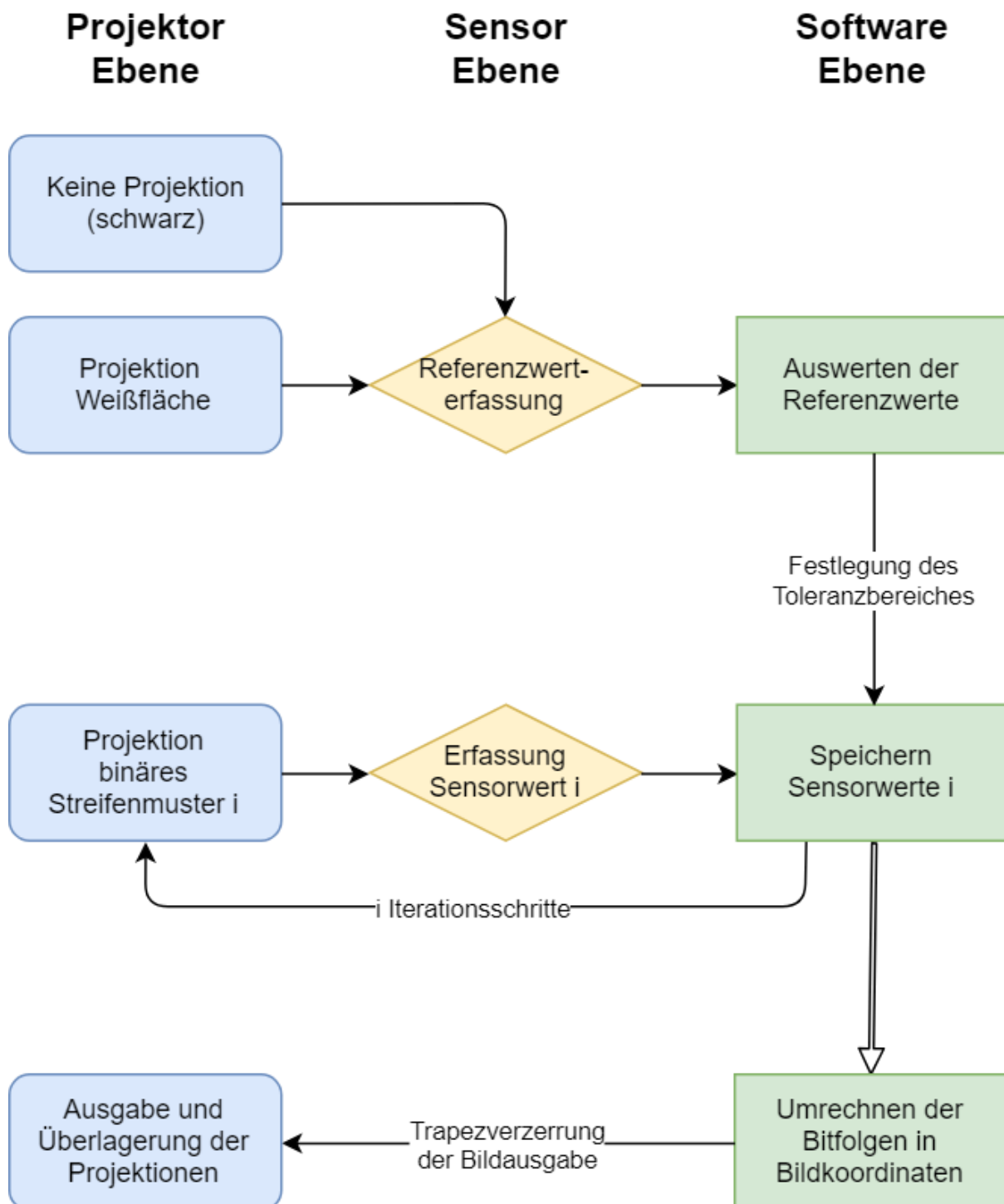


Abbildung 6 Ablaufdiagramm der Software

5 Fazit

Die sich durch die überlagerte Projektion ergebenden Möglichkeiten, bieten Raum für zukünftige Untersuchungen und Versuche an diesem Demonstrator. Durch Projektion kann Information an beliebigen Positionen dargestellt werden, um diese beispielsweise dem Fahrer in dessen Blickrichtung zu präsentieren oder seine Aufmerksamkeit auf ein Ereignis zu lenken.

Die vorgestellte Methode zur Kalibrierung des Systems lässt Raum für weitere Ansätze zur Verbesserung der Kalibrierergebnisse. Diese können durch das Hinzufügen besserer Hardware und das Modifizieren der Software noch weiter gesteigert werden, so dass die Überlagerung selbst im Worst-Case noch hinreichend gut ist.

Weiter können die Methoden der Überlagerung dahingehend erweitert werden, dass durch die Erhöhung der Anzahl der Sensoren, eine Darstellung der Projektion auf geschwungenen Oberflächen ermöglicht wird. Die Erkenntnisse und Ansätze des Demonstrators sollen in weiteren Projekten und Untersuchungen vertieft werden. Eine Implementierung der Technik in den Innenraum des Fahrzeuges wird langfristig als Ziel angesehen.

Literatur

- [1] Neumann, Cornelius Lichttechnisches Institut Karlsruhe, „Vorlesung: Optische Technologien im Automobil,“ Karlsruhe, 2017.
- [2] C. Neumann, „Vorlesung: Visuelle Wahrnehmung im KfZ,“ Lichttechnisches Institut Karlsruhe, 2017.
- [3] M. M., M. Voit, „Insassen-Körperposenerfassung für Innenraum-Assistenzsysteme der Zukunft,“ *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ*, p. 70ff, April 2017.
- [4] Mercedes Benz, „Das Interieur-Design der neuen A-Klasse,“ 25 06 2019. [Online]. Available: <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/design/>.
- [5] A. Vollmer, „Licht mit Funktion: Weit mehr als nur reines Ambiente-Licht,“ all-electronics, 09 10 2018. [Online]. Available: <https://www.all-electronics.de/> [Zugriff am 08 06 2019].
- [6] M. Hanischfeger, „Was können die Assistenzsysteme?,“ auto motor sport, 24 06 2019. [Online]. Available: <https://www.auto-motor-und-sport.de/>. [Zugriff am 28 06 2019].

- [7] Mercedes Benz, „Interieur: Next Level Interieur-Design,“ Daimler AG, [Online]. Available: <https://media.daimler.com/> [Zugriff am 18 06 2019].
- [8] S. K. P. G. Stefan Sollinger, „Masterarbeit: Kalibrierung und Implementierung eines Laserprojektors als Autopointer,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Hochschule Regensburg, Regensburg, 2012.
- [9] M. A. J.L. Posdamer, „Surface Measurement by Space-Encoded Projected Beam System,“ 1982.

Reflexionsverhalten von Interieur-Materialien im Kraftfahrzeug

Markus Schöneich; Vorentwicklung Innenlicht Daimler AG
Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer; IPeG - Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann; LTI - Karlsruher Institut für Technologie

Zusammenfassung

Die vom Kraftfahrzeuginsassen subjektiv wahrgenommene indirekte Beleuchtung ist das Resultat aus physio- und psychologischen Einflüssen des menschlichen Betrachters. Bei der Beleuchtungsvariante wird diese unter anderem von der Art der angeleuchteten Fläche und der Lichtquelle mitbestimmt. Zur Reduzierung der Variantenvielfalt bei der Fahrzeug-Innenlicht-Entwicklung werden oftmals baureihenübergreifende Leuchtmodule verwendet. Die emittierenden, leitenden und verteilenden Lichtmodule sind somit als annähernd konstant anzunehmen, währenddessen die angeleuchtete Fläche nahezu frei vom Kunden konfigurierbar ist und von der gewählten Interieur-Ausstattung abhängt.

Das nachfolgende Paper beschreibt eine mögliche Modellbildung für eine lichttechnische Oberflächencharakterisierung typischer texturierter Materialien im Fahrzeuginnenraum. Dabei setzt sich das Modell für die Oberfläche aus der spektralen Remissionseigenschaft, dem Streuverhalten sowie der Topologie zusammen. Der Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt auf der Erstellung der sog. Wellenlinie der Topologie von genarbttem bzw. texturiertem Leder. Zur objektiven Messdatengenerierung des Modells werden hierbei, angefangen bei der klassischen BRDF bis hin zu genormten Flächencharakteristika – wie dem Flächenrauheitswert –, bereits vorhandene und meist genormte Kenngrößen verwendet. Somit wird im Vergleich zu den bisherigen Möglichkeiten eine Übertragbarkeit des Modells mit geringen Einflussfaktoren bezüglich der Datenermittlung, der Datenverarbeitung und der Datenextrahierung erreicht.

Schlüsselwörter: Variantenvielfalt; indirekte Beleuchtung; Simulation & Modellbildung; Fahrzeuglichttechnik; BRDF; Topologie; Remissionsspektrum

1 Einleitung

Die Anzahl an Lichtquellen zur Fahrzeuginnenraumbeleuchtung erwartet in den nächsten Jahren erneut einen großen Anstieg. Während im Jahr 2016 lt. Decker [1]



noch im Durchschnitt ein Kraftfahrzeug mit 50 LEDs ausgestattet war, so wird bereits für das Jahr 2021 eine Anzahl von rund 300 LEDs pro Fahrzeug prognostiziert. Ein Hintergrund der Wachstumsrate ist die steigende Designmöglichkeit durch multiple Integration von mehrfarbigen Leuchten oder Beleuchtung und die hohe Kundennachfrage für diese Sonder- oder auch Standardausstattung. Währenddessen klar abgegrenzte leuchtende Linien (sog. direkte Ambientebeleuchtung) designcharakteristische Züge unterstreichen, akzentuiert die indirekte Ambientebeleuchtung durch das lokale (linienförmige) Beleuchten von meist natürlichen Materialien mit weichen Kanten.

Dabei ist die vom Kraftfahrzeuginsassen subjektiv wahrgenommene, indirekte Beleuchtung – im Gegensatz zur direkten Beleuchtung – von weiteren Faktoren abhängig. Die physio- und psychologisch geprägte Wahrnehmung wird unter anderem von der Art der angeleuchteten Fläche und der Lichtquelle definiert. Als Lichtquelle werden derzeit sogenannte Multichannel-LEDs eingesetzt, die schmalbandig im roten, grünen und blauen Bereich Licht emittieren. Mittels additiver Farbmischung können nun beliebige Mischfarben innerhalb des sich aufspannenden Farbgamuts durch prozentuale Anteilsmischung angesteuert werden. In Kombination mit einem Lichtleiter und einer Streuoptik bilden diese das Lichtmodul, das zur Reduzierung der Variantenvielfalt bei der Fahrzeug Innenlicht Entwicklung oftmals baureihenübergreifend verwendet wird. Im Gegensatz hierzu ist die angeleuchtete Fläche nahezu frei innerhalb der möglichen Interieur-Ausstattungsvariante vom Fahrzeugbesteller konfigurierbar. So kann beispielsweise aus beige, schwarzen, grauen oder auch gesättigten Farbtönen mit unterschiedlicher Narbung für die (Kunst-)Ledermaterialien gewählt werden. Die Folge ist ein ausstattungspezifisches, wahrnehmbares Erscheinungsbild der angeleuchteten Fläche trotz vergleichbarer Lichtquelle und Lichtleiter.

Damit für die indirekte Beleuchtung nicht sämtliche Varianten zur Bewertung und Validierung vollständig simulativ nachgestellt werden müssen, stellt sich die Frage, wie ein mögliches modulares Oberflächencharakteristikum für die angeleuchteten Flächen im Fahrzeuginnenraum aussehen könnte. Die folgenden Untersuchungen werden an verschiedenen Ledervarianten durchgeführt und sind auf Planware bzw. Folien übertragbar.

2 Stand der Technik

Heutzutage werden verschiedene Modelle eingesetzt, um die Reflexionen an Oberflächen zu beschreiben. Einige orientieren sich hauptsächlich am normativ gemessenen bidirektionalen Streuverhalten (BRDF) währenddessen andere anhand von werkzeugspezifischen Prozessmustern die Oberflächenkontur im CAD Modell abbilden. Ein Auszug derzeit gängiger Möglichkeiten wird im Folgenden diskutiert.

2.1 BRDF

Die Bidirektionale Reflektanz-Verteilungs-Funktion (engl.: bidirectional distribution function; kurz: BRDF) beschreibt das winkelabhängige Reflexionsverhalten eines elektromagnetischen Strahls. Der aus einem bestimmten Winkel auftreffende Strahl wird in verschiedene Richtungen anteilmäßig verteilt.

Diese Variante ist Stand der Technik und ermöglicht eine Beschreibung der globalen Streueigenschaften an der lokal gemessenen Oberfläche. Dabei kann zwischen Grauwert-BRDF und Farbwert-BRDF unterschieden werden. Die Farbwert BRDF inkludiert zusätzlich noch die spektralen Farbeigenschaften der gemessenen Oberfläche.

Nach Definition wird die BRDF für ein makroskopisch planares Material gemessen, wobei hierbei die BRDF nach [2] „weder allein auf Materialeigenschaften noch auf das Oberflächenrelief“ zurückzuführen ist. Die Diskussion, bei welcher Vergrößerung und unter welchen Voraussetzungen eine Flächenebene als planar angenommen werden kann, soll im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet werden.

Die Rahmenbedingungen zur Ermittlung der BRDF bieten folgende Möglichkeiten und sind nur begrenzt innerhalb einer übergreifenden Spezifikation oder Norm abgedeckt:

- Spektrum des einfallenden Strahls
- Auflösung der Winkel-Messrasterung
- Detektorgröße
- Größe und Intensität des einfallenden Strahls

Außerdem liegen noch technische und physikalische Rahmenbedingungen bei der realen Messung vor. So wird beispielsweise der aus dem Normal einfallende, kreisförmige Strahlkegel unter einem flachen Einfallswinkel zu einem Oval. Die einfallende Strahlungsleistung verteilt sich somit auf eine größere Fläche und variiert im flachen Winkel somit Axial.

Die folgende Abbildung zeigt den gleichen gemessenen lokalen Abschnitt eines Materials unter verschiedenen Größen des einfallenden Strahldurchmessers. Der Durchmesser der blau dargestellten BRDF liegt bei 8mm, der grauen bei 11mm und der roten bei 14mm.

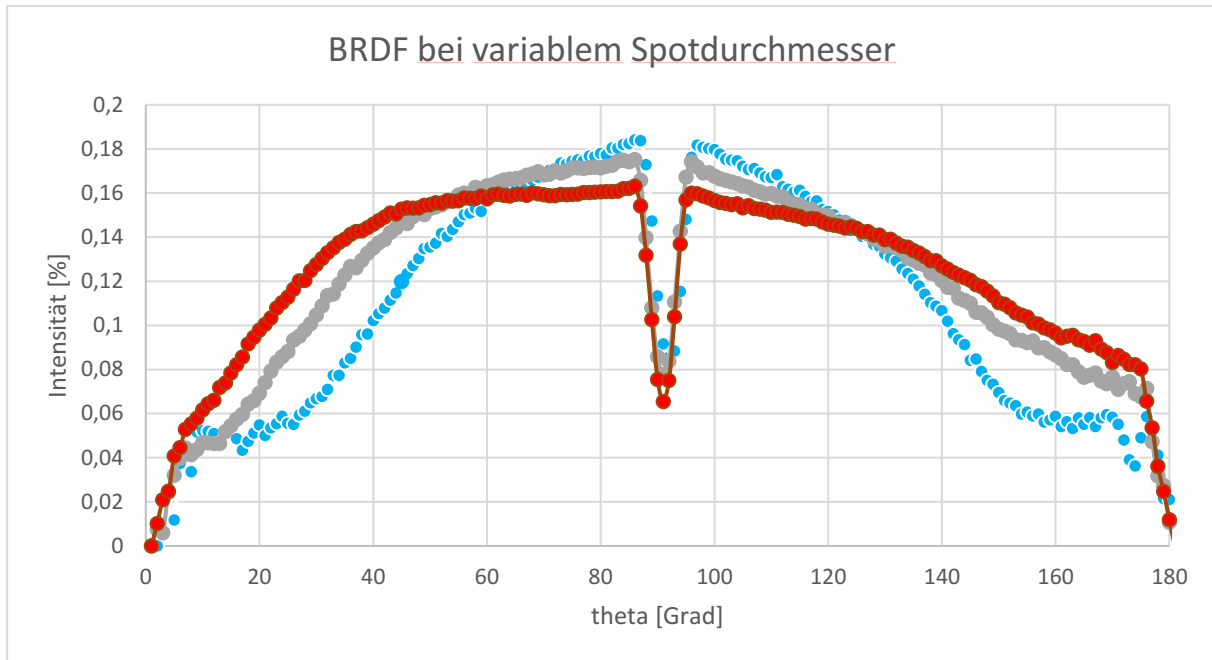


Abbildung 1: Schnittdarstellung BRDF eines Materials unter variablem Spottedurchmesser

Zu erkennen ist die deutliche Abweichung der gemessenen BRDF. Dabei wurde zur eindeutigeren Darstellung nur eine Schnittebene extrahiert. Eine Vergleichbarkeit einer Materialprobe bei Variation der Größe des Spottedurchmessers zeigt bereits den Einfluss einer einzelnen vorherig erwähnten Einflussgröße einer BRDF beispielhaft auf. Der Einschnitt (hier bei $\theta=90^\circ$) in den Messdaten ist bedingt durch die Abschattung des Sensors aufgrund der Lichtquellenposition.

2.2 VDI 3400

Anstatt das Reflektanz-Verhalten an einer Oberfläche zu messen und dem Oberflächenmodell anschließend diese Streueigenschaften zuzuweisen, gibt es die Möglichkeit die Oberflächenkontur in den CAD Daten anzupassen. Diese Variante basiert auf der Norm nach VDI 3400 [3]. Diese beschreibt typische Rauigkeiten, die hauptsächlich werkzeugtechnischen Ursprungs sind und aus der elektroerosiven Bearbeitung von metallischen Oberflächen hervorgegangen sind.



Abbildung 2: Referenzmusterplatte nach VDI 3400 [4]

Je nach Erfahrungswert des Simulations-Durchführenden nimmt dieser einen vergleichbaren Wert für die genarbte Oberfläche an, die aber mit den eigentlichen topologischen Eigenschaften der realen Textur nicht korreliert. Bisher konnten keine Überschneidungen festgestellt werden, um eine Systematik zu erkennen und zu definieren. Die wahrgenommene Farbe der Oberfläche wird mit dieser Methode nicht berücksichtigt und muss additiv berücksichtigt werden. Abbildung 2 zeigt eine Referenzmusterplatte zur Bewertung der Oberflächen.

Diese Möglichkeit ist somit mit einem subjektiven Einflussfaktor behaftet, der nicht numerisch beziffert werden kann. Eine Vergleichbarkeit anhand von Ziffern ist an dieser Stelle somit nicht zielführend.

Nachdem der aktuelle Stand der Technik vorgestellt wurde, soll nun im Folgenden eine weitere Möglichkeit mittels objektiver Modellbildung aufgezeigt werden.

3 Beschreibung des Reflexionsverhaltens

Als Grundgedanke sollen verschiedene Messverfahren genutzt werden, um das Reflexionsverhalten von genarbten Oberflächen abzubilden. Dabei werden verschiedene Messverfahren und Charakteristika fusioniert und in ein differenziertes Modell aus gewählten Merkmalen übertragen. Diese werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert. Zum einen soll die Körperfarbe, die Narbung der Oberfläche und die Streueigenschaften differenziert und unabhängig voneinander ermittelt werden.

3.1 Modellgrundgedanke

Die bisherigen Messmethoden und Modellvarianten haben meist keine Trennung der Eigenschaften ermöglicht, so dass beispielsweise bei der gewöhnlichen BRDF ebenfalls die Textur und die Farbe der Probe eine Rolle gespielt haben. Das neue Modell verfolgt folgenden schematisch aufgezeigten differenzierten Ansatz:

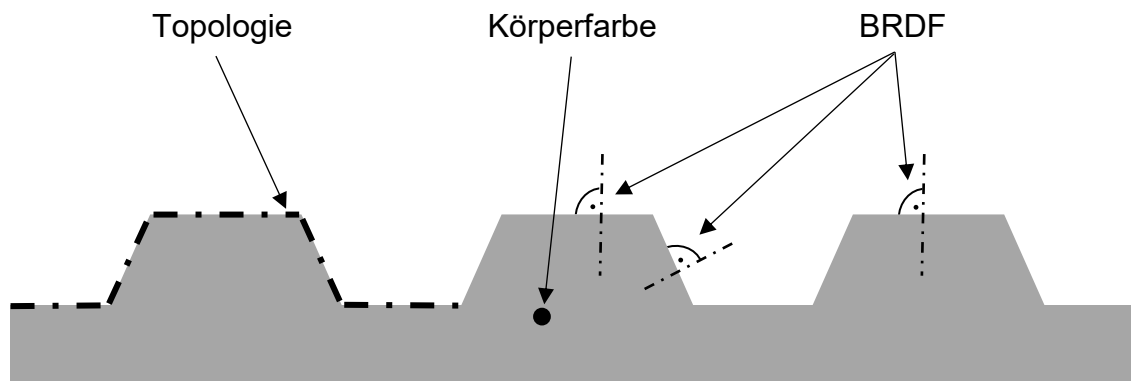


Abbildung 3: schematischer Aufbau Modellkonzept

Die Oberflächenkontur (Topologie) wird unabhängig von der BRDF und der Körperfarbe mit einem 3D Scanner gemessen. Die Körperfarbe wird als Remissionsspektrum winkelunabhängig gemessen und die Streueigenschaften (BRDF) entsprechen hauptsächlich dem des Grundmaterials und sind nicht durch die Topologie mitbestimmt.

3.2 Beschreibung der Körperfarbe

Im ersten Schritt soll die Körperfarbe des angeleuchteten Materials ermittelt werden. Gewöhnliche aktuelle Prozesse in der Automobilindustrie sehen diesbezüglich meist eine subjektive durch den menschlichen Betrachter durchgeführte Bewertung im Vordergrund. Hierzu wird ein Grundmuster erstellt, das unter bestimmten klimatischen Bedingungen vor äußeren und inneren Veränderungen möglichst konstant gehalten wird. Dieses Muster dient als Maßstab und somit hauptsächlich als Referenz zu einer anderen Probe. Unter definierten Winkeln wird das Referenzmuster mit der Probe in einer Abmusterungskabine verglichen. Innerhalb der Kabine wird die Musterplatte und die Referenzplatte beispielsweise von einer genormten D65 Lichtquelle beleuchtet. Der subjektive Einfluss durch die physiologische und psychologische, sowie zeitlich sich ändernde Leistungsfähigkeit des Bewerter bleibt bestehen und definiert die größten Einflussfaktoren der Variante.

3.2.1 Konventionelle Farbmessgeräte

Um Farben objektiv messen zu können, können Farbmessgeräte zur numerischen Klassifikation verwendet werden. Hierbei wird unter genormten Einfallswinkel- und Ausfallswinkeln die Lichtspektränderung durch den Einfluss der Probe ermittelt. Die gemessene Farbe bzw. der gemessene Farbort wird somit in Bezug auf ein Referenzlichtspektrum bewertet bzw. gewichtet.

Es kann beispielsweise der gemessene Farbort einer durchgängig eingefärbten Probe aufgrund einer Narbung oder des Glanzes zu einem lokal unterschiedlichen Farbort führen. Dabei spielt der Messfleckdurchmesser des analysierten Probenstücks ebenso eine Rolle, wie die Geometrie und Ausprägung der Narbstruktur innerhalb des Analysebereichs. Dieses Messsystem eignet sich vorrangig für topologisch planare Flächen, da in diesem Rahmen hohe Wiederholgenauigkeiten erreicht werden können. Je gröber die vorhandene Narbung ist, desto geringer wird die Wiederholgenauigkeit der durchgeführten Analyse. Ein Vergleich einer Probe mit Narbung und ohne Narbung würde trotz nahezu identischen Grundwerkstoff bei gerichteter Messbeleuchtung zu einem unterschiedlichen Farbort führen. Diffuse Messbeleuchtung könnte diesen Einfluss reduzieren.

3.2.2 Messung des Remissionsspektrums

Um eine Referenzlichtspektrun- und richtungsunabhängige Definition der Körperfarbe zu erhalten, soll das Remissionsspektrum ermittelt werden. Hierzu wird

die Probenoberfläche gleichmäßig aus allen Halbraumrichtungen mit einem möglichst vollständigen Lichtspektrum beleuchtet. So kann unabhängig von der beleuchtenden Lichtquelle ein sogenanntes Remissionsspektrum des Körpers ermittelt werden. Aufgrund der diffusen Beleuchtung besteht kein Topologieeinfluss.

Messtechnisch kann beispielsweise die Probenöffnung einer Ulbrichtkugel genutzt werden. Bei geschlossener Probenöffnung wird die Referenzlichtquelle eingeschaltet und auf einen Referenzwert gesetzt. Im zweiten Schritt wird der Probenöffnungsdeckel durch die Probenoberfläche ersetzt und die Referenzlichtquelle erneut eingeschaltet. Über die Differenzmethode aus geschlossener Kugel und Kugel mit Probenkörper wird nun das Remissionsspektrum ermittelt. Dieses Remissionsspektrum ist unabhängig von der Positionierung oder Ausrichtung der Probe, solange die Probenfläche sehr viel größer als die topologische Ausprägung ist.

3.2.3 Vergleich der Verfahren

Währenddessen konventionelle Farbmesssysteme eine Abweichung der Wiederholgenauigkeit der gemessenen Proben mit unterschiedlichen Narbausprägungen beim Normlichtspektrum D65 bei 10% erreicht haben, konnte bei den Remissionwertmessungen mittels der Ulbrichtkugel eine Abweichung von <1% erreicht werden. Die subjektive Bewertungsmethode lässt sich nicht in Zahlen fassen, ist aber mit einer nicht kalkulierbaren Abweichung der Wiederholgenauigkeit für das Farbmesssystem anzunehmen.

Es wird daher empfohlen das Remissionsspektrumverfahren als valides Klassifizierungsverfahren zu nutzen.

3.3 Ermittlung der Narbung/Textur

Ähnlich wie bei der Farbabmusterung steht bei der Narbabmusterung im Interieur aktuell der subjektive Vergleich in der Automobilindustrie im Vordergrund. Hintergrund ist erneut u.a. die Vergleichbarkeit gleicher numerischer Kennzahlen zweier Proben, die subjektiv wahrgenommen eine deutliche Varianz aufzeigen. Das zu untersuchende Interieur-Material ist Leder. Dieses wird je nach Ausstattungsvariante für unterschiedliche Bereiche im Fahrzeug verwendet. Das natürliche Material weist eine hohe Varianz auf, das unter anderem durch folgende Faktoren beeinflusst wird.

Einflussfaktoren des Grundmaterials:

- Rasse des Rindes
- Geschlecht
- Farbe des Felles
- Alter des Tieres

Einflussfaktoren bei der Verarbeitung:

- Absolute Schichtdicke
- Gleichmäßigkeit der Schichtdicke
- Temperatur
- Feuchtigkeit des Materials

Wiederum ergeben sich Faktoren, die eine Vergleichbarkeit zweier Proben untereinander im Fahrzeug oder als Probe zu einem Zeitpunkt begrenzen:

- (Luft-)Feuchtigkeitsgehalt
- Verbau-/Befestigungsvariante
- Umgebungshelligkeit
- Beleuchtungsrichtung u. -variante

Kunstledervarianten oder Planwaren als klassische Imitate des Leders orientieren sich hauptsächlich an der natürlichen Gestalt des Leders und dessen Verhalten. Die Einflussfaktoren sind reduziert, wodurch eine Übertragbarkeit auf diese Varianten ermöglicht wird. Zunächst soll auf die Vermessung der Oberflächenkontur eingegangen werden.

3.3.1 Datengenerierung

Die Fläche soll möglichst detailliert gemessen und klassifiziert werden. Da die verwendeten Materialien im Interieur meist eine weiche, haptische Eigenschaft aufweisen und eine Fläche und keine Kennlinie ermittelt werden soll, eignet sich ein taktiler Messverfahren nicht optimal.

Als Optimale Variante hat sich hierfür ein konfokales Laserscanning-Mikroskop ergeben. Aufgrund der hohen lokalen Auflösung, der Tiefenschärfe sowie der flächenhaften Betrachtung ermöglicht es das Messmittel in der 3D Ebene, präzisiert die Topologie zu scannen.

Folgende Abbildung zeigt die gescannte Aufnahme einer genarbten Struktur. Die Oberflächengeometrie setzt sich in diesem Zusammenhang aus einer Punktwolke zusammen. Die einzelnen Punkte sind das Resultat der detektierten Laserintensität.

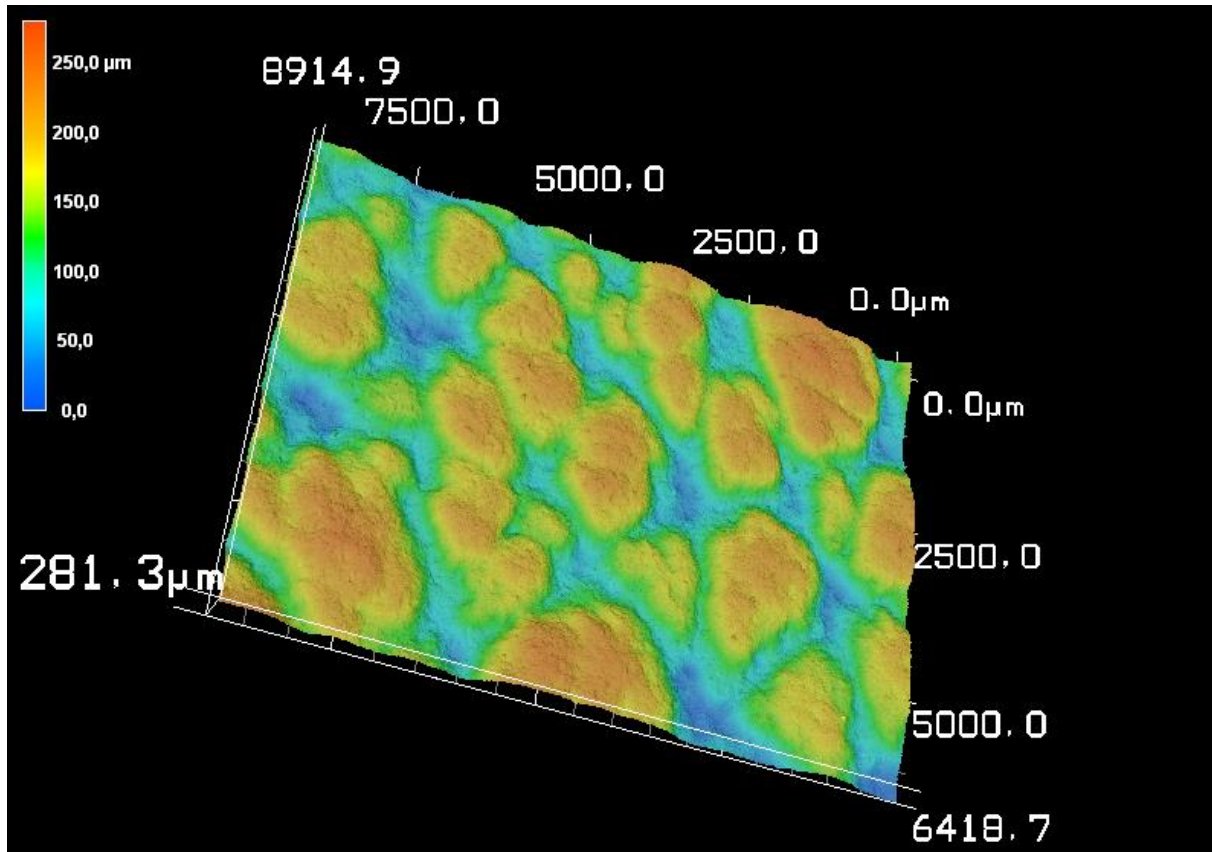


Abbildung 4: 3D Darstellung der Messdaten eines konfokalen Laserscanning-Mikroskopes

Die gemessenen Daten liegen somit als Rohdaten vor. Unter anderem bedingt durch die Einflussgrößen des Messinstrumentes und des Messprozesses ist eine Datenverarbeitung sowohl notwendig, um eine hohe Wiederholgenauigkeit der Messung zu erzielen, als auch um vergleichbare absolute Messdaten zu erhalten.

3.3.2 Datenverarbeitung

Trotz gleichem Messequipment entstehen große Varianzen, wenn die Messung wiederholt werden würde. So ist beispielsweise die zu untersuchende Probe möglichst planparallel gegenüber dem Messkopf auszurichten. Da sich die Messgrößen im Mikrometerbereich befinden, äußern sich auch bereits geringe Verunreinigungen in den Scanndaten. Außerdem zeigt sich bei dem natürlichen Material auch bereits der Effekt der Schichtdickenschwankungen. Das bedeutet, die Probe entspricht – übertrieben angenommen – einer Keilform, was es schwierig macht, diese parallel auszurichten.

Ein weiterer Effekt ist eine Wölbung oder Welligkeit der Probe. Diese Ausprägung kann bereits durch geringste Oberflächenspannungen entstehen, die u.a. durch einen Beschnitt der Probe oder durch Variation des Feuchtigkeitsgehaltes der Kollagenfasern ausgelöst werden kann.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, um diese Effekte softwaretechnisch auszugleichen. Mittels einer Ebenenneigungs- oder Welligkeitskorrektur wird die Hauptnormalfläche angepasst.

Die Anpassung der Fläche ist notwendig, da sich viele Flächencharakteristika auf die Grundflächenebene beziehen. Wurde die Grundebene vorab nicht richtig korrigiert oder liegt diese schief, kann kein reproduzierbares Kriterium ermittelt werden. Auch die absoluten Messwerte sind von der Grundebene abhängig.

Folgende Abbildung zeigt beispielhaft als Falschfarbenbild einer verkippten Oberfläche. Die in den dunkel hinterlegten Schnittdarstellungen abgebildete orangene Linie zeigt die Ebenenneigungskorrektur, auf die die gesamte Fläche adaptiert wird.

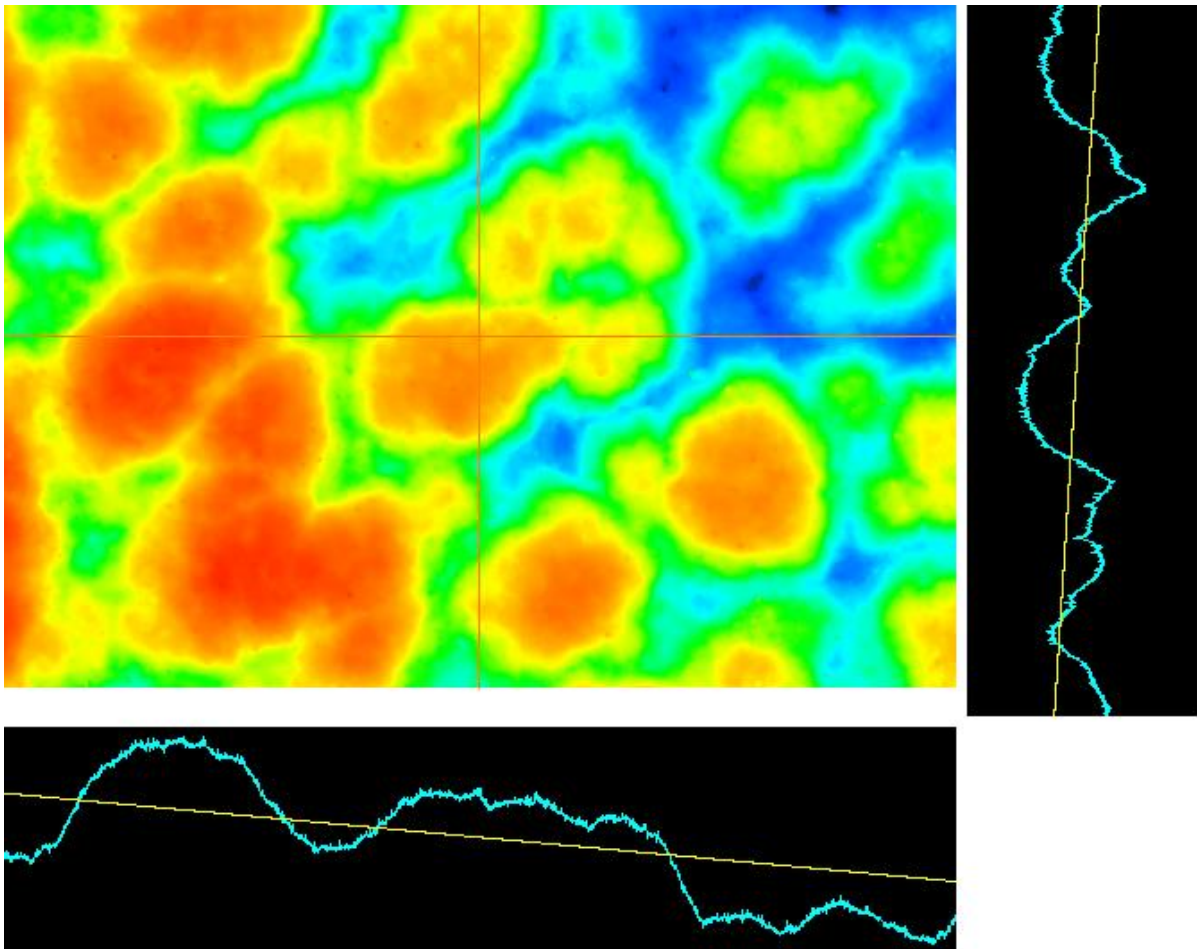


Abbildung 5: Ebenenneigungskorrektur über zwei Referenzlinien

Die Folge ist eine ausgerichtete Fläche. Für die analysierte Fläche kann nun eine Querprüfung durchgeführt werden. Prozessbedingt unterliegt die Narbung des Materials einem Walzprozess, der sich in einer Vorzugsrichtung der Flanken in eine Richtung äußert. Ist diese Vorzugsrichtung nicht mehr erkennbar, so kann durchaus die Korrektur nicht verbessernd ausgeführt worden sein.

Die Welligkeitskorrektur funktioniert nach dem ähnlichen Prinzip. Auf diese soll aber im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht weiter eingegangen werden.

3.3.3 Datenauswertung

Nachdem die Daten nun in einer vergleichbaren Ausgangsbasis vorliegen, kann mit der Auswertung begonnen werden.

Ziel ist es, gewöhnliche, bereits in der Norm definierte und beschriebene Messgrößen zu verwenden, um eine Übertragbarkeit auf andere Messsysteme zu ermöglichen. Einer der bekanntesten Kennwerte ist der sogenannte arithmetische Mittenrauwert R_a , der die Rauigkeit einer technischen Oberfläche beschreibt. Allerdings sind diese (Linien-)Werte, die beispielsweise aus der Abtastung einer Linie ermittelt werden, mit hoher Varianz behaftet. Mit steigender Analyse-Linienlänge kann über eine Mittelung der Kennwerte ein reproduzierbarer Wert ermittelt werden. Jedoch steigt mit der Länge wiederum die Varianz, die durch die Welligkeit bzw. Ebenenneigung nicht korrigiert werden konnte. Die Voraussetzungen hierzu sind – im Ideal – unendlich lange Analyselinien.

In der Praxis ist diese Anforderung aus wirtschaftlichen und technischen Gründen nicht umzusetzen. Erfahrungstechnisch hat sich gezeigt, dass die Flächenkenngrößen in diesem Zusammenhang die validere Messgröße darstellen. Der Vorteil liegt darin, dass nahezu beliebig viele Kennlinien diese Fläche beschreiben werden und hierdurch die Varianz im Vergleich deutlich geringer ist.

Die Oberflächenkontur kann durch verschiedene Charakteristika beschrieben werden. Um die optimalen Kriterien zu identifizieren, wurden speziell erstellte Proben genutzt. Diese Proben sind aus einer eng benachbarten, zusammenhängenden Fläche geschnitten worden, die gemeinsam allen Prozessschritten und sonstigen intrinsischen und extrinsischen Einflüssen ausgesetzt waren. Lediglich im letzten Prozessschritt wurden sie mit unterschiedlichen Narbungen versehen. Anhand der Proben ist es gelungen, den Freiheitsgrad der Narbung zu separieren. Die untersuchten drei Proben bestehen aus drei deutlich wahrnehmbar unterschiedlichen Narbungen.

Im ersten Schritt wurden die Kriterien ausgeschlossen, die aufgrund der Ebenenneigungsvarianz zu ähnliche Kennzahlen liefern. Im zweiten Schritt wurden die Einflüsse der Wellenkorrektur nach dem ähnlichen Verfahren analysiert und diese Kriterien ebenfalls ausgeschlossen. Anschließend wurden die Kriterien ausgewählt, die eine periodische Struktur am besten beschreiben. Dabei wurde berücksichtigt, dass zur Simulation CAD-Modelle mit periodischen Strukturen am einfachsten und somit am schnellsten darzustellen sind und am wenigsten Rechenkapazität benötigen. Folgende Abbildung zeigt das daraus resultierende Modell aus Darstellungsgründen im 2D Schnitt.

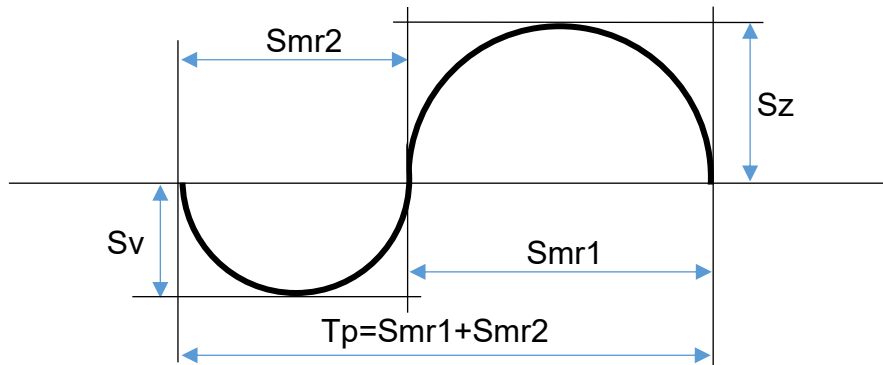


Abbildung 6: periodisches Modell der Topologie einer (Leder-) Narbung

Das Modell ermöglicht es, eine materialseitige Eigenabschattung auch unter flachen Einfallswinkeln zu berücksichtigen. Des Weiteren werden durch die Sinus- oder Cosinus-ähnliche, periodische Formgebung lokale, planare Plateaus vermieden, die bei der Narbung der Materialien nicht vorkommen. „Tp“ beschreibt die ermittelte Periodenlänge und definiert die absolute Länge aus Smr1 und Smr2.

3.4 Messung der Streueigenschaften

Im letzten Abschnitt werden nun die Streueigenschaften einer Oberfläche bzw. Grenzfläche zwischen zwei Medien ohne den Einfluss der soeben ermittelten genarbten Ausprägung ermittelt. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Als erste Option kann beispielsweise die BRDF des Grundmaterials (falls verfügbar) ohne der Narbung gemessen werden. Das heißt, das Grundmaterial wird vor dem Prozessieren der Narbung analysiert bzw. gemessen. Die Vermessung ist stark von der Auflösung bzw. Rasterung abhängig. Je höher die Auflösung, desto mehr Messpunkte definieren das BRDF-Modell. Zwischenwinkel werden anschließend interpoliert.

Eine weitere Option ist es, den BRDF Einfallspottdurchmesser so gering zu wählen, dass nur eine Fläche, die möglichst senkrecht zur Messanordnung steht, Bestandteil der BRDF-Messung ist. Wie im vorherigen Kapitel erwähnt, ist diese Möglichkeit nur subjektiv möglich und mit einer hohen Varianz verbunden. Die weitere technische Herausforderung besteht darin, dass der BRDF Spot nicht beliebig klein gewählt werden kann.

Es wird sich an dieser Stelle für die erste Option entschieden, die bezüglich Wiederholgenauigkeit und absoluter Vergleichbarkeit die beste Möglichkeit darstellt.

Nachdem nun die drei Eingangsparameter ermittelt wurden, kann das modulartige Modell erstellt werden.

3.5 Modellierung der Oberfläche

Die Oberflächen können nun bezüglich ihrer Körperfarbe mit dem Remissionsspektrum unabhängig vom einfallenden Lichtspektrum definiert werden. In der Simulation kann hierfür das Volumen mit diesem Kurvenverlauf belegt werden. Auf der anderen Seite muss die Narbung durch die aufgezeigte Oberflächenkontur in den Geometriedaten berücksichtigt werden. Mittlerweile gibt es vorgegebene, Standard Texturen/Narbungen in den verschiedenen Simulations- oder CAD-Tools die ebenfalls eine Darstellung ermöglichen. Allerdings ähneln diese Varianten oftmals nicht den gewünschten Designmustern und sind daher für den Entwicklungsprozess nicht optimal. Im letzten Schritt wird die Oberflächenkontur bezüglich des variierenden Normals mit den ermittelten Streueigenschaften der BRDF belegt.

4 Zusammenfassung

Das modulartige Modell ermöglicht auf Basis von bisherigen Kenngrößen die genarbte Oberfläche abzubilden, insofern die Farbe der Oberfläche als gleichmäßig anzunehmen ist und die Narbung einer gewissen Systematik/Gleichmäßigkeit folgt. Somit können genarbte und gegerbte Lederarten genauso wie Planwaren oder Ledernachbildungen modelliert werden. Die Nachstellung von beispielsweise Holzzeichnungen mit lokalen Farbunterschieden aufgrund einer Maserung ist mit dem vorhandenen Modell somit nicht möglich.

Ein großer Vorteil ist die Reduzierung der Varianten bei der simulativen Bewertung vor allem im Entwicklungsprozess oder der frühzeitigen Interpretationsmöglichkeit von Messdaten im frühen Entwicklungsstadium ungenarbter Oberflächen (siehe auch die Veröffentlichung [5]). Hierbei werden oftmals nur einzelne Charakteristika einer Interieurausstattung geändert. So wird beispielsweise die Art der Narbung in nur einer Variante angeboten, währenddessen die Farbauswahl über mehrere Töne variieren kann. Die Modellierung ermöglicht damit eine Trennung von Körperfarbe und Textur und reduziert die Anzahl der Varianten zur Simulation. Des Weiteren wird durch die Minimierung der subjektiven Einflüsse und Parametrisierung der Eingangsgrößen ein übertragbares, stabiles Modell aufgestellt. Mit diesem Verfahren wird eine Simulation von natürlichen Texturen mit geringeren Abweichungen zur Realität als der gewöhnliche BRDF und der VDI-Ansatz ermöglicht.

5 References

- [1] Detlef Decker: „Innovationspotenzial in der automobilen Lichttechnik“; Beitrag zur Tagung - Optische Technologien in der Automobilindustrie; Karlsruhe; 2018
- [2] Jürgen Beyerer et al.: „Automatische Sichtprüfung“; Kapitel 4; ISBN 978-3-642-23965-6
- [3] VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren; Band 2: Elektroerosive Bearbeitung; Begriffe, Verfahren, Anwendung (VDI 3400: 1975-06)
- [4] CAD Forum; <https://ww3.cad.de/foren/ubb/Forum2/HTML/019829.shtml>; 03.04.2019
- [5] Markus Schöneich; „Auswirkungen von Mesostrukturen im Fahrzeuginnenraum auf die Reflexionseigenschaften“; Tagung Optische Technologien in der Automobilindustrie; Karlsruhe; 2018

Laserscheinwerfer im Automobil – Scannendes Lasersystem mit eindimensionalem Facettenreflektor

Jan Müller, Marcel Bursy, Jörg Wallaschek

Karlsruher Institut für Technologie; L-LAB, Lippstadt; Leibniz Universität Hannover
uxdrs@student.kit.edu, marcel.bursy@l-lab.de

Abstract/Zusammenfassung

Eine Möglichkeit hochauflösende Scheinwerfer im Automobil umzusetzen, sind scannende Systeme. Scannen bedeutet, dass ein Strahl von einer Ablenkeinheit umgelenkt wird, sodass ein Winkelbereich beleuchtet wird. Durch Modulation der Lichtquelle werden aus dem Winkelbereich nur die Winkel ausgewählt, die zur Erzeugung der Ziellichtverteilung beitragen. Damit die Lichtverteilung als statisch wahrgenommen wird, muss sich der Strahl ausreichend schnell bewegen.

Das vorliegende Konzept verfolgt eine Ablenkung in einer Dimension. Der Strahl bewegt sich entlang einer Linie. Eine facettierte Optik verteilt das Licht, sodass die Ziellichtverteilung entsteht. Durch die Ablenkung in nur einer Dimension fallen die Anforderungen an das mechanische System und die Modulation der Lichtquelle moderater aus als bei vergleichbaren 2D-Scannern.

Hauptaufgabe ist das Design der facettierten Optik. Weiterhin muss eine geeignete Lichtquelle gefunden und ein Beleuchtungspfad entworfen werden.

Index Terms: Automobilbeleuchtung, Facettenreflektor, Laser, Scannende Systeme

1 Einleitung

Hochauflösende Scheinwerfer werden im Automobil zur Umsetzung adaptiver Lichtfunktionen genutzt. Die aktuellen technischen Realisierungsmöglichkeiten umfassen LCD, DMD, LED und Scanner [1]. Dieses Paper befasst sich mit der Umsetzung der Scanner-Technologie. Hierbei wird ein Laser mithilfe eines beweglichen Spiegels so schnell abgelenkt, dass die Ablenkbewegung nicht mehr wahrgenommen werden kann.

Ziel der Arbeit ist es, ein System aufzubauen, das den Laserstrahl nur in einer Richtung ablenkt und mithilfe einer facettierten Optik eine zweidimensionale Beleuchtung generiert. Die Lichtverteilung soll durch Modulation des Lasers angepasst werden. Die Herausforderung ist es, nachzuweisen, dass dieses Vorhaben technisch umsetzbar ist. Dabei kommt es auf die Wahl der Lichtquelle und die Auslegung der Optiken an.



2 Scannende Systeme

Um Scannende Systeme zu beschreiben, werden diese zuerst von anderen Technologien für hochauflösende Scheinwerfer abgegrenzt. Kauschke, Götz und Gut [1], [2], [3] unterscheiden im Wesentlichen vier Technologien: LCD (LCoS), Mirror Devices (AMD und DMD), Matrix-LED (μ AFS) und Scanner. Drei Eigenschaften zeichnen in der Regel scannende Systeme aus [1]:

- additives Prinzip,
- strahlgeführte Modulation,
- kontinuierliche Ansteuerung.

Scanner und LED basieren im Gegensatz zu LCD und DMD auf dem additiven Prinzip. Das heißt es wird nur Licht erzeugt, wo es gebraucht wird. Wird der zu beleuchtende Bereich mit ausreichend hoher Geschwindigkeit abgescannt, nimmt der Betrachter die dynamische Ablenkung nicht wahr. Dieser kontinuierliche Ablenkprozess führt auch dazu, dass es keine Pixel gibt.

Ein Scannendes System ist mindestens aus zwei Elementen aufgebaut: einer Lichtquelle und einer Ablenkeinheit. Zusätzliche optische Elemente dienen der Fokussierung und Verteilung des Lichtes. Die Lichtquelle besteht meist aus einem oder mehreren Lasern, da nur Laser eine Étendue haben, die es erlaubt die benötigten kleinen Optiken auszuleuchten. Um weißes Licht zu erzeugen gibt es die Möglichkeit blaues Licht mit Hilfe des Stokes Shift in einem Leuchtstoff teilweise umzuwandeln, sodass weißes Licht durch additive Farbmischung resultiert. Alternativ führt die Kombination aus einem roten, einem grünen und einem blauen Laser ebenfalls zu weißem Licht durch additive Farbmischung [1]. Die RGB Variante hat den Vorteil einer besseren Strahlqualität und einer variablen Lichtfarbe. Ein Polygonrad oder ein Galvanometer besitzen drehende spiegelnde Flächen und lenken damit Licht in einer Dimension ab. Eine Ablenkung in zwei Richtungen ist mit Hilfe eines MOEMS-Spiegels möglich. Die Ablenkeinheiten sind in Abbildung 1 dargestellt.

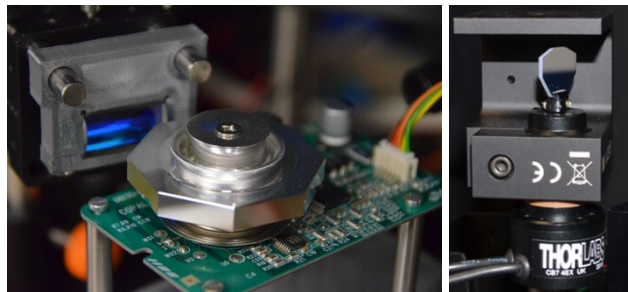


Abbildung 1: Ablenkeinheiten: Polygonrad und Galvanometer.

2.1 Vorteile

Durch das additive Prinzip haben Scanner grundsätzlich das Potential effizienter als Mirror Devices und LCD zu sein. Licht wird dabei nur an den Stellen generiert, wo es gebraucht wird. Mirror Devices lenken Licht auf einen Absorber. LCDs bestehen aus einem Polarisator und einem Analysator an denen Licht selektiert und absorbiert wird.

Die Arbeit mit einem Laser ermöglicht die Verwendung kleiner Optiken aufgrund der hohen Strahlqualität. Bedeutung haben kleine Optiken als Designmerkmal und im Package.

2.2 Nachteile

Die Ablenkeinheit kann sich durch mechanische Einwirkungen, zum Beispiel beim Fahren, dejustieren. Stöße können eine Rejustage notwendig machen.

Die Ablenkung in zwei Dimensionen hat neben dem Nachteil einer zweiten oder komplizierten Ablenkeinheit den Nachteil einer größeren Scanfrequenz in der zweiten Dimension. Durch Anlegen zweier Harmonischen mit unterschiedlicher Frequenz entstehen Trajektorien in Form von Lissajous Figuren. Andere Anregungen werden durch Bézier Kurven beschrieben. Daraus ergeben sich zwei Herausforderungen: Erstens muss der gesamte Bereich abgedeckt sein. Zweitens darf kein Flimmern entstehen. Das heißt, das gesamte Bild muss sich mit einer Frequenz von mindestens 30 Hz wiederholen. Diese 30 Hz gelten für statische Anordnungen. Bei dynamischen Anwendungen, wie beim Fahren, tritt der Perlschnureffekt auf, das heißt es muss eine höhere Frequenz von mindestens 200 Hz erreicht werden [4]. Um beide Bedingungen zu erfüllen, müssen die Ablenkfrequenzen hoch gewählt werden [5].

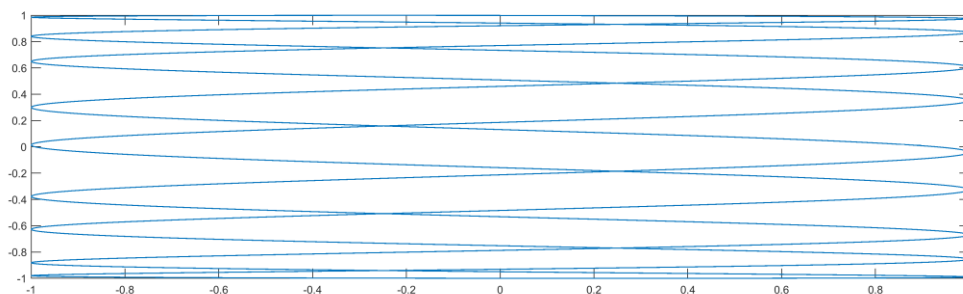


Abbildung 2: Lissajous Figur mit $f_1/f_2 = 9$, $\varphi = \pi/2$.

2.3 Stand der Technik

Das iLaS-Projekt ist eines der vorreitenden Projekte im Bereich Laser Scanning. Im Projekt wurde ein System aus sechs Laser-Dioden, einer eindimensionalen Ablenkeinheit und einem Phosphor-Konverter aufgebaut. Die Laser-Strahlen werden im Beam Combiner parallel ausgerichtet und vertikal angeordnet. Sie durchlaufen ein optisches System und werden von einem MOEMS-Spiegel eindimensional gescannt. Der Phosphor wandelt das blaue Licht teilweise um, sodass weißes Licht entsteht. Das Modul hat insgesamt 16.5 W optische blaue Leistung und erreicht nach der Weißlichtkonvertierung einen Lichtstrom von 1920 lm [6].

3 Eindimensionaler Scanner

Im Folgenden wird das neue System beschrieben. Es werden Konzept und Aufbau eines eindimensionalen Scanners mit facetierter Aufweitungsoptik vorgestellt, dazu werden die verwendeten Baugruppen beschrieben und ihre Bedeutung für die Funktion des Konzepts wird erläutert.

3.1 Konzept

Ziel ist es, ein scannendes System möglichst einfach zu gestalten. Dabei wird eine Ablenkung in einer Dimension genutzt, sodass die Nachteile der Ablenkung in zwei Dimensionen umgangen werden, vergleiche Abschnitt 2.2.

Die Umsetzung gestaltet sich wie folgt: Der Strahl aus einer Lichtquelle wird durch einen Beleuchtungspfad geformt und trifft auf die Ablenkeinheit. Da eine hohe Strahlqualität benötigt wird, kommt als Lichtquelle nur ein Laser in Frage. Die eindimensionale Ablenkeinheit, der Galvanometer, formt den Strahl dynamisch zu einer Linie. Dabei scannt die Ablenkeinheit so schnell, dass die einzelnen Punkte nicht mehr voneinander unterscheidbar sind. Der aufgeweitete Strahl trifft auf eine

letzte Optik, den Facettenreflektor, die den Strahl aufweitet und in verschiedene Richtungen ablenkt. Dabei leuchtet jede Facette einen einzelnen Winkelbereich aus, deren Summe die gesamte Lichtverteilung ergibt.

Die Stärken des Aufbaus liegen in der effizienten Verarbeitung des eindimensional gescannten Lichtes. Die eindimensionale Ablenkung erlaubt es dem Aufbau mit nur einer, weniger komplizierten Ablenkeinheit im Vergleich zum Scannen in zwei Dimensionen auszukommen und die Lichtquelle hat nur eine Lichtaustrittsfläche, sodass eine Ausrichtung mehrerer Lichtstrahlen entfällt. Hinzu kommt, dass beim eindimensionalen Scannen eine Ablenkfrequenz ausreicht, die kleiner ist als beim zweidimensionalen Scannen. Die Frequenz ergibt sich aus der Ablenkeinheit. Wenn die Ablenkeinheit den Facettenreflektor einmal abscaant, wird die Lichtverteilung einmal aufgebaut. Da der Galvanometer den Facettenreflektor zwei Mal in einer Periode abfährt, ist seine Ablenkfrequenz um den Faktor zwei kleiner als die Bildwiederholungsrate.

3.2 Aufbau

Der Aufbau besteht aus vier Baugruppen, die in Abbildung 3 dargestellt sind. Diese sind die Lichtquelle, der Beleuchtungspfad, der Galvanometer und der Facettenreflektor.

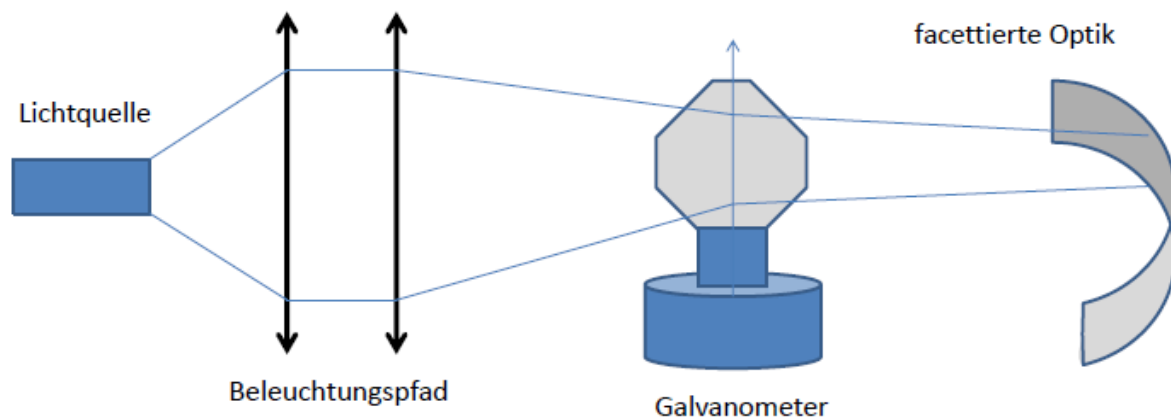


Abbildung 3: Aufbau bestehend aus einer Lichtquelle, dem Beleuchtungspfad, einem Galvanometer und einem Facettenreflektor.

3.2.1 Facettenreflektor

Das Ziel des Aufbaus ist es, eine Lichtverteilung mit horizontalem Winkelbereich von $[-20, +20]$ Grad und vertikalen Winkelbereich von $[-5, +5]$ Grad zu generieren.

Aus Bauraumvorgaben, Produktionsvoraussetzungen und Design wird eine erste Vorstellung von der Geometrie des Facettenreflektors abgeleitet. Die Länge soll 100 mm und die Höhe 1 mm betragen.

Generell gibt es die Möglichkeiten, das optische Element reflektiv mit einem Spiegel oder transmittiv mit einer Linse auszulegen. Daneben kann die Oberfläche kontinuierlich oder facettiert sein. In dem System wird ein facettierter Reflektor verwendet. Gründe sind zum einen die Erfahrung mit der Auslegung facettierter Reflektoren, zum anderen die Herstellungsmöglichkeiten von Reflektoren und das Fehlen chromatischer Effekte im Vergleich zu transmittiven Optiken.

Der Facettenreflektor hat zwei Aufgaben, zum einen die Umverteilung des Lichtes und zum anderen die Anpassung des Ausleuchtbereiches oder Raumwinkels. Das Licht muss umverteilt werden, da aus der Linie eine Fläche generiert werden soll. Die Umverteilung erfolgt durch Verkippung der Facetten. Um die Anpassung des Ausleuchtbereiches zu verstehen, muss der Winkel betrachtet werden, den die Lichtquelle samt Beleuchtungspfad mit einer Facette aufspannt, siehe Abbildung 4.

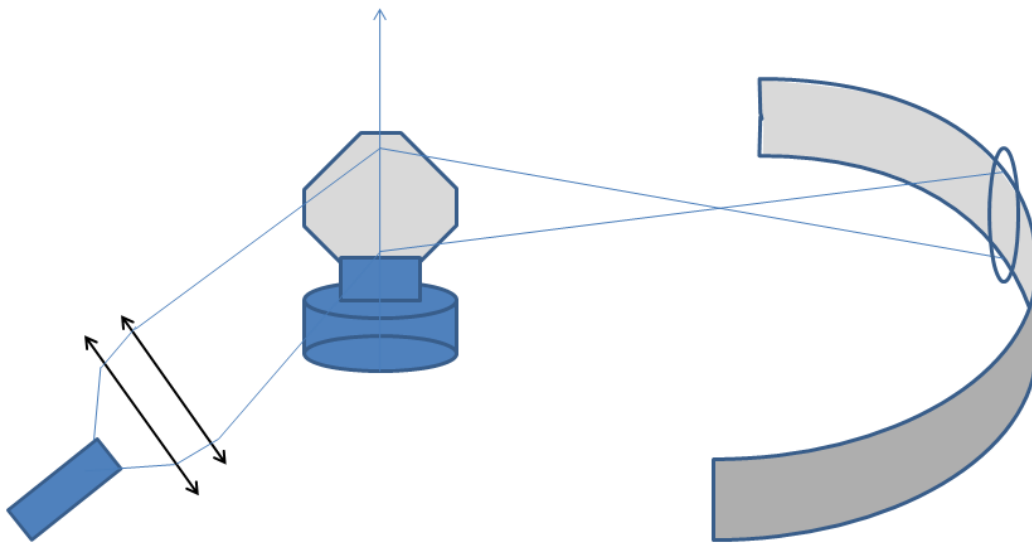


Abbildung 4: Raumwinkel, den der Laser samt Beleuchtungspfad aufspannt und der auf den Facettenreflektor trifft.

Integriert man über alle Winkel, resultiert die gesamte Lichtverteilung. Um den Ausleuchtbereich eines Pixels zu erhalten, passt der Facettenreflektor den Ausleuchtbereich durch gekrümmte Oberflächen an.

Das *Macro Focal Reflector* Modul in *LightTools* ist ein Werkzeug, um einen Facettenreflektor zu designen. Aus

- Lage der Lichtquelle,
- Anzahl der Facetten in horizontaler und vertikaler Richtung,
- Größe der Facetten in horizontaler und vertikaler Richtung,
- dem rechteckigen Ausleuchtbereich jeder Facette
- und der Krümmung

berechnet das Tool den Reflektor. Im Folgenden werden die oben genannten Einstellungen Schritt für Schritt beschrieben.

Das Programm berechnet den Facettenreflektor ausgehend von einer Punktlichtquelle. Das heißt für das Design des Reflektors muss der Lichtschwerpunkt gefunden werden. Der Galvanometer verschiebt beim Scannen die virtuelle Position der Lichtquelle entsprechend Abbildung 5. Damit wandert auch der Lichtschwerpunkt. Eine Approximation an den Lichtschwerpunkt stellt der Galvanometer dar, da sich an der Stelle alle Strahlbündel schneiden. Deswegen scheint es sinnvoll, die Punktlichtquelle an die Stelle des Galvanometers zu legen.

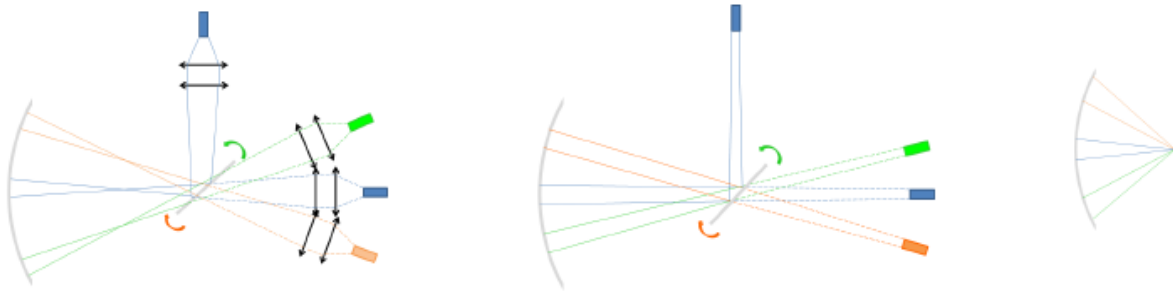


Abbildung 5: Links und in der Mitte sind zwei Beispiele für die scheinbare Verschiebung der Lichtquelle gezeigt. Das Tool berechnet den Reflektor nach der Lichtquelle rechts.

Der Galvanometer wird mit 100 Facetten in einer Zeile designt. Eine Facette soll eine Kantenlänge von 1 mm haben.

Immer vier Facetten werden zusammengefasst und leuchten eine Spalte aus, siehe Abbildung 6. Der Ausleuchtbereich einer Facette beträgt so 0,8 auf 2,5 Grad. Entscheidend ist dabei eine scharfe Abbildung der einzelnen Facetten. Dies ermöglicht, in Kombination mit Ablenkeinheit, Beleuchtungspfad und Lichtquelle, eine gezielte Anpassung der Lichtverteilung.

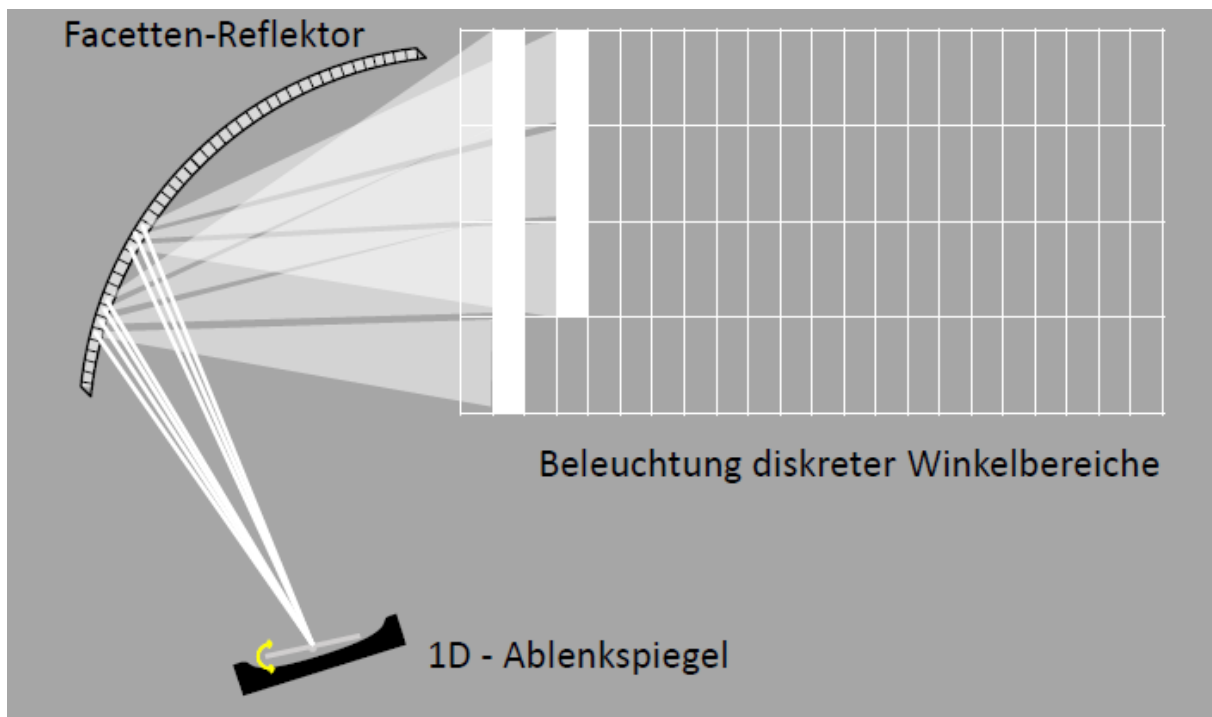


Abbildung 6: Ausleuchtbereich des Facettenreflektors.

Weiterhin gibt es die Möglichkeit, den Facettenreflektor gekrümmt oder gerade auszulegen, das heißt Strahlen nach dem Facettenreflektor konvergieren oder divergieren zu lassen. Konvergierende Strahlen führen zu einem gekrümmten Reflektor, dessen Form sich einer Kreisbahn um den Galvanometer annähert, siehe Abbildung 7. Eine Kreisbahn ist geschickter als eine lineare Anordnung, da die Weglänge von Ablenkeinheit zu Facettenreflektor für jeden Strahl gleich ist. So wäre bei der Anpassung des Strahls der Strahldurchmesser auf dem Facettenreflektor immer gleich. Außerdem sind beim Abfahren einer Kreisbahn die lineare Geschwindigkeit auf dem Kreisbogen und die Winkelgeschwindigkeit proportional.



Abbildung 7: Krümmung des Facettenreflektors. Je nach Gestaltung des Facettenreflektors verlassen entweder konvergierende Strahlenbündel (Abbildung links) oder divergierende Strahlenbündel (Abbildung rechts) die Anordnung [7].

3.2.2 Galvanometer

Ein Galvanometer ist ein Spiegel, der sich spannungsgesteuert um seine Achse drehen kann. Die Bewegung wird durch einen Elektromotor mit einer Rückstellfeder ausgeführt. An zwei Umkehrpunkten wird die Bewegung unterbrochen. Der Weg zwischen den Umkehrpunkten kann durch die Spannung angepasst werden, das heißt zum Beispiel sinus- oder dreieckförmig sein, wobei die mechanische Trägheit berücksichtigt werden muss. Ein Spannungswert gibt kontinuierliche Rückmeldung über die Winkelposition. Dies ist von Vorteil für die Lasermodulation, da einem Winkelintervall Facetten zugeordnet sind. Durch die Rückmeldung der Position ist eine genaue Ansteuerung möglich.

Eine Alternative zum Galvanometer stellt ein Polygonrad dar. Da es sich hier um eine kontinuierliche Bewegung handelt, können die Ablenkgeschwindigkeiten höher sein und die Winkelgeschwindigkeit ist konstant.

3.2.3 Beleuchtungspfad

Die Aufgabe des Beleuchtungspfades ist die Abbildung des Laserstrahls auf den Facettenreflektor. Die Höhe des Spots kann aus der Geometrie des Facettenreflektors entnommen werden, sie beträgt 1 mm. Die Breite des Spots soll möglichst gering sein, dass bei einem Übergang von einer zur nächsten Facette beide Facetten für eine möglichst kurze Zeit gleichzeitig beleuchtet werden, vergleiche Abbildung 8. Je ausgedehnter der Spot, desto länger werden beide gleichzeitig beleuchtet. Soll nun eine Facette beleuchtet werden, die andere aber nicht, bestimmt dies den Kontrast in der resultierenden Lichtverteilung. Neben der Größe des Spots sind Form und Füllung relevant.

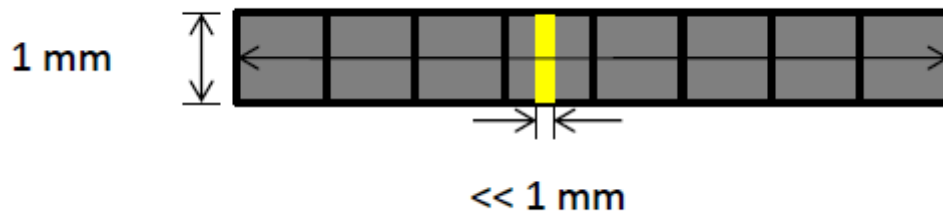


Abbildung 8: Anforderungen an den Beleuchtungspfad.

Im Abschnitt Facettenreflektor wird die Punktlichtquelle an die Stelle des Galvanometers gesetzt. Nun muss der Winkel, den der Strahl aufspannt, an die Punktlichtquelle angepasst werden. Anpassung von Größe des Spots und aufgespanntem Winkel erfolgt mit einem System aus Linsen. Dabei kommt Fokussieren und Parallelisieren in Betracht.

Laserstrahlen lassen sich als Gauß-Strahlen beschreiben. Ein wesentliches Merkmal von Gauß-Strahlen ist die ausgedehnte Strahltaile. Wird die Strahltaile mit dem Divergenzwinkel multipliziert, resultiert das Beam-Parameter-Produkt. Das Beam-Parameter-Produkt bleibt unter Anwendung optischer Elemente für den Strahl konstant und sagt etwas über die Strahlqualität aus. Je kleiner es ist, desto besser ist ein Strahl fokussierbar. Das Beam-Parameter-Produkt leitet sich aus der Étendue ab, vergleiche [8], [9].

Fokussieren bedeutet demnach die Strahltaile in einer bestimmten Entfernung zu minimieren. Beim Parallelisieren wird der Divergenzwinkel minimiert, indem der Fokus ins Unendliche gesetzt wird. Durch Betrachtung des Aufbaus, die an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt wird, kann eine Anforderung an die Strahlqualität abgeleitet werden, für die Fälle, dass auf den Galvanometer fokussiert wird, dass auf den Facettenreflektor fokussiert wird, und dass das Licht parallelisiert wird. Je näher am Galvanometer fokussiert wird, desto größer die Anforderungen an die Strahlqualität aber desto besser ähnelt der aufgespannte Winkel dem der Punktlichtquelle.

Form und Homogenität können mit verschiedenen Elementen angepasst werden. Ein Mikrolinsenarray (MLA) besteht aus vielen rechteckigen Linsenpaaren. Die Linsenpaare unterteilen das einfallende Licht in einzelne rechtwinklige Teile. Durch eine Überlagerung wird die Füllung homogenisiert. Eine Blende kann ebenfalls einen rechteckigen Spot formen, allerdings hat die Blende keine homogenisierende Wirkung und bringt Verluste, da sie Bereiche der Verteilung abschattet.

3.2.4 Lichtquelle

Die Anforderungen des Beleuchtungspfades an die Strahlqualität setzen eine Laserlichtquelle voraus. Für die Anwendung kommen zwei Techniken in Betracht: Eine Glasfaser, die mit Diodenlasern gespeist wird oder ein Dioden-Freistrahl-Laser. Beide erzeugen weißes Licht, indem die Farben rot, grün und blau gemischt werden. Die Strahlqualität wird mit dem Beam-Parameter-Produkt beschrieben. Hier ist der Freistrahl-Laser besser als die Glasfaser. Mehr Leistung ist bei der Glasfaser verfügbar, allerdings sind für hohe Leistungen Multimode-Fasern mit hohem Durchmesser nötig, die eine schlechtere Strahlqualität haben. Bei Freistrahl-Lasern werden die einzelnen Strahlen mit dichroitischen Spiegeln überlagert, was anfällig gegen Winkelfehler ist. Bei einer Glasfaser wird Licht durch Totalreflexion in der Faser gemischt. Daher gibt es bei Glasfasern weniger Farblichtheitsfehler. Bei der Glasfaser kann das eigentliche Lasermodul an einer Stelle abseits des Scheinwerfers platziert werden. Ein Kühlkörper hat somit ausreichend Platz. Beim Freistrahl-Laser muss der Kühlkörper im Bauraum des Scheinwerfers untergebracht werden.

4 Bewertung des Systems

Das Prinzip mit einer eindimensionalen Ablenkeinheit und einer Lichtaustrittsfläche hat das Potential einer einfacheren Montage und höherer Stabilität im Betrieb im Vergleich zu anderen scannenden Systemen. Die Reduktion der Komplexität geht auf Kosten der Auflösung. Die Lichtverteilung ist nun pixeliert.

Die Auslegung des Facettenreflektors muss im Simulationstool für eine Punktlichtquelle erfolgen, daher ist das Design als eine Mittelung für alle Winkelpositionen des Galvanometers zu sehen und der Reflektor kann nicht direkt auf den vorliegenden Beleuchtungspfad mit Ablenkspiegel angepasst werden. Der Beleuchtungspfad nähert die Punktlichtquelle allerdings, nach ersten Simulationsergebnissen zu urteilen, ausreichend an. Als Lichtquelle kommen ein RGB-Freistrahllaser oder ein fasergekoppelter Laser in Frage, die sich in Lichtqualität und Farbmischung unterscheiden.

4.1 Simulation

Die Abbildungen 9, 10 und 11 zeigen die Simulation einer Testlichtverteilung, ähnlich einem Abblendlicht, mit dem Facettenreflektor. In Abbildung 9 ist der Aufbau gezeigt. Eine rechteckige Lichtquelle stellt Galvanometer, Beleuchtungspfad und Laser dar. Der Facettenreflektor wird vollständig beleuchtet, so wird die Beleuchtung über eine Scanperiode approximiert. In den Abbildungen 10 und 11 sind die simulierten Intensitätsverteilungen dargestellt. Die dargestellten Simulationen unterscheiden sich durch die Kantenlänge der verwendeten Lichtquelle und veranschaulichen so die Auswirkungen des Beleuchtungspfades auf die Lichtverteilung.

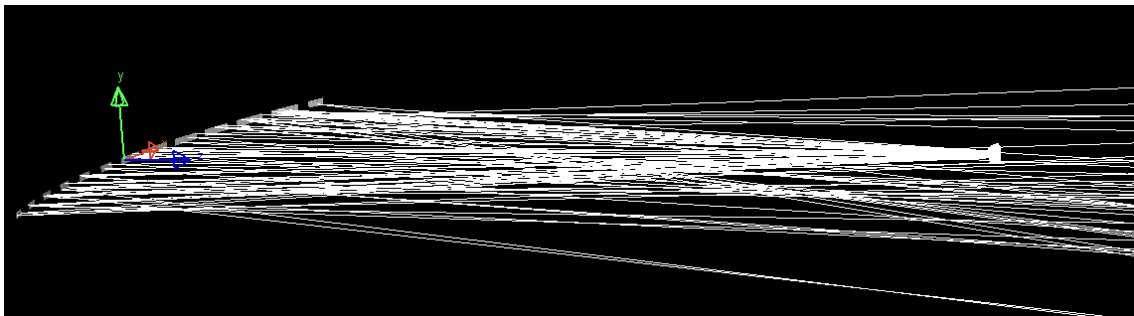


Abbildung 9: Aufbau zur Generierung der Testverteilung.

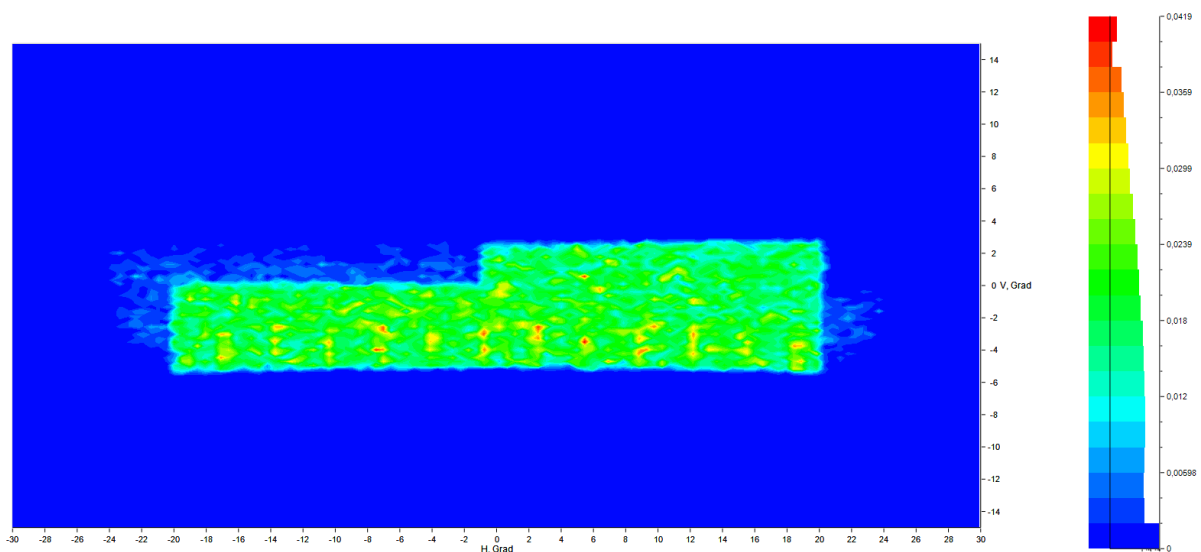


Abbildung 10: Lichtstärkeverteilung des Aufbaus in Abbildung 9. Die Lichtquelle hat eine Kantenlänge von 1 mm.

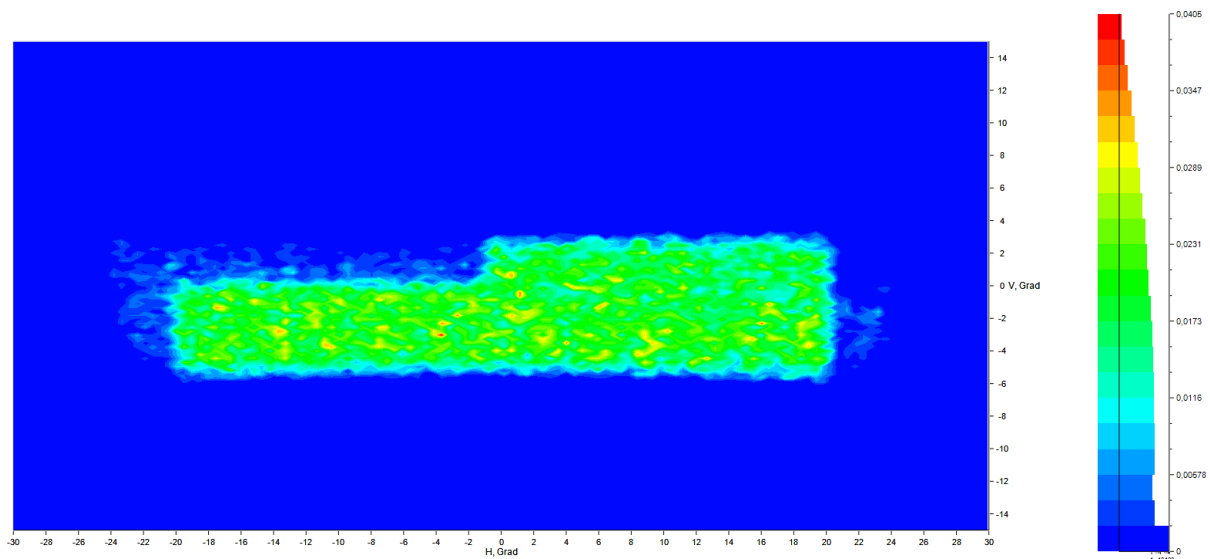


Abbildung 11: Lichtstärkeverteilung des Aufbaus in Abbildung 9. Die Lichtquelle hat eine Kantenlänge von 3 mm.

Die Abbildungen zeigen die Testlichtverteilung als Lichtstärkeverteilung. Bei einer Lichtquelle mit einer Kantenlänge von 1 mm ist die Abbildung schärfer als bei einer Lichtquelle mit einer Kantenlänge von 3 mm.

Das Ergebnis zeigt, dass der von der Lichtquelle und dem Beleuchtungspfad aufgespannte Winkel einen Einfluss auf die Schärfe der Abbildung hat.

5 Ausblick

Die Auslegung des Reflektors ist erfolgt und wird unter Berücksichtigung verschiedener Lichtquellen und Beleuchtungspfade validiert. Die Überprüfung erfolgt zuerst simulativ und dient auch der Prüfung verschiedener mechanischer Varianten. Ziel ist es, die beschriebenen Bauelemente so anzuordnen, dass mechanische und optische Eigenschaften optimiert werden. Die Variante, die in der Simulation gute Ergebnisse zeigt, soll in Zukunft in einem Laboraufbau realisiert werden. Dazu ist in erster Linie die Fertigung des designten Facettenreflektors in ausreichender Präzision und Oberflächenqualität erforderlich. Die experimentelle Überprüfung wird zeigen, ob der realisierte Reflektor den Anforderungen genügt und inwieweit die Ergebnisse der Simulation erreicht werden. Der Laboraufbau bietet weiterhin die Möglichkeit den Beleuchtungspfad und den Galvanometerscanner anzupassen. Als folgender Schritt wird eine Laseransteuerung realisiert, um durch Modulation der Lichtquelle die resultierende Lichtverteilung zu verändern. Anschließende Messungen des Auflösungsvermögens und des Kontrasts schließen die Validierung des Gesamtsystems ab.

6 Literatur

- [1] Carsten Gut, Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme, Dissertation, 2018.
- [2] Rainer Kauschke, Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern, Dissertation, 2006.
- [3] Mirco Götz und Karsten Eichhorn, "Optical Technologies for Future Headlamps", In: International Symposium on Automotive Lightning – ISAL 2005 – Proceedings of the Conference, Herbert Utz Verlag, 2005.
- [4] Steffen Strauß, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung, Dissertation, 2007.
- [5] Joscha Roth, Untersuchung von elektrodynamischen Mikroscoannern zur Darstellung von Lichtsymbolen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung, Dissertation, 2016.
- [6] Jürgen Hager, Oliver E. Woisetschläger, "iLaS - Laserbasierte Hochluminanz-Lichtquelle mit dynamischer Leuchtdichteverteilung für adaptive Scheinwerfer-Systeme", Schlussbericht, 2018, Hrsg. von Osram GmbH
- [7] LightTools, Advanced Design Module User's Guide, 2018.
- [8] J. Chaves, Introduction to Nonimaging Optics, Optical Science and Engineering, CRC Press, 2008, ISBN: 9781420054323.
- [9] Dietrich Gall, Grundlagen der Lichttechnik: Kompendium, Pflaum, 2004.

High-Resolution Laser Scanning Systems with Acousto-Optic Deflectors and Optimised Optics Design

Aysenur Alp, Marcel Bursy, Jörg Wallaschek

L-LAB, Lippstadt; Leibniz Universität Hannover
aysenur.alp@rub.de, marcel.bursy@l-lab.de

Abstract

In recent years, automotive headlight systems have been improved in a considerable extent for a safer drive. In this paper, an optical design is presented for scanning headlight systems with an alternative deflection unit and an RGB laser source to optimise the light distribution and create desired illumination patterns adapting to the driving situation. Recently developed scanning lighting systems incorporate mechanical deflection systems. Here, since the redistribution of the light is mostly depending on the fixed deflection pattern, several drawbacks are emerging. As an alternative method, acousto-optic deflection technology can deflect the light without any mechanical displacement. They offer high-flexibility to redistribute the light in the desired intensity. Thus, the main role can be undertaken by acousto-optic deflectors as laser scanners and illumination units. However, although they have a mechanic-free deflection mechanism, their narrow deflection range causes difficulties in realising the desired illumination and scanning applications. An optics design to enlarge the deflection range for Acousto-Optic Deflectors (AODs) is required. In this project, an optical system is purposed for high resolution and contrast illumination in automotive lighting using acousto-optic deflectors.

Index Terms: Acousto-optic deflector, Laser, Scanner, Automotive, Lighting

1 Introduction

Over the last years the rapid development in automotive headlights, has led to technology capable of adaptive lighting. Lasers were brought to the stage to make major progress due to their small size and power for high range lighting. Moreover, as an advanced step, these light sources were combined with scanning systems in headlights. Laser scanning systems controls the deflection of the laser beam to create the desired illumination area depending on the use-case. The advantage is their potential to redistribute the light. Light can be deflected in the desired intensity to the desired angle and thus the illumination can be actively formed according to the use-case. Nevertheless, laser scanning headlamps have not been introduced yet, while research and development are still ongoing.

The aim of this project is to show an innovative setup for scanning headlight systems and its promising features. A deflector of a mechanical free configuration based on the acousto-optic effect carries out the deflection of light. The goal is hereby to realise high-dynamic and high-resolution light distributions with two acousto-optic devices deflecting in the horizontal and vertical direction. The challenge is the trade-off between high resolution and wide field of view (FOV). To optimise the relation between resolution and FOV, an optical system has been designed amplifying the FOV as well as maintaining the high resolution.

© 2019 by the authors. – Licensee Technische Universität Imenau, 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/).
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

2 Possible applications for acousto-optic deflectors

Depending on the use-case, acousto-optic deflectors can be used in automotive lighting systems. The working principle and the functionality of the acousto-optic deflection mechanism will be introduced in this chapter for varied applications.

2.1 Introduction into the acousto-optic principle

An acousto-optic device includes a crystal and a piezoelectric transducer attached to the crystal. By driving the piezo device with an RF amplifier, sound waves are applied to the AOD's crystal. A sound wave travelling through a medium, creates a mechanical (tensile or compressive) stress in the medium. Due to this stress, the refractive index of the medium changes. A change in the refractive index of an environment with an acoustic wave is called the "acousto-optic effect". Because of the periodic change in the refractive index of the medium, an AOD acts like an optical grating device, moving at the speed of the sound, diffracting the incident laser beam. The deflection of the light via this diffraction phenomena is called "Bragg's diffraction". According to Bragg's diffraction every wavelength λ is diffracted in a different angle. Therefore, if the angle of the incident laser beam is fixed to the Bragg angle, the deflection angle θ_d can be expressed by the frequency of the acoustic wave f_a the acoustic velocity v_a and the refractive index n of the material [1].

$$\theta_d = \frac{\lambda f_a}{2n v_a} \quad (1)$$

We can express the acoustic wavelength as Λ [2].

$$\Lambda = \frac{v_a}{f_a} \quad (2)$$

According to the relation (1) and (2), the dependency of the deflection angle to the acoustic and optical wavelengths can be clearly observed.

$$\theta_d \propto \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (3)$$

This dependency plays a crucial role for AODs to have a small deflection angle range. Because the sound wavelength is usually greater than the optical wavelength. If the oscillation frequency of the piezo electric transducer, or in other words the frequency of the acoustic wave, is varied the deflection of the diffracted beams varies. This sweep from the initial frequency of the sound wave to the final frequency is expressed by the frequency bandwidth Δf , of the transducer, which is an important property and has a strong effect on the efficiency of the deflection. Besides, depending on the wavelength every colour will have a different deflection angle offset. This chromatic dependency leads to a limited deflection range for white light which is produced by additive colour mixing of different wavelengths [6].

2.2 Deflector Specifications

The specifications of the deflectors used in the experimental setup, which will be presented afterwards, are shown in the table below. These are typical values for deflectors optimised for the visible wavelength range.

Material	TeO ₂
Acoustic velocity	650 m/s
Wavelength range	350 – 1600 nm
Optical transmission	> 90 %
Aperture	7.5 x 7.5 mm ²
Scan angle	41 mrad ~ 2.3° @532 nm
RF frequency, power	50 – 110 MHz, 1 W

Table1. Technical specifications of AO deflectors, AA Opto-Electronic [8].

The mechanism offered by acousto-optic deflectors differs from other deflection devices due to their mechanical-free principle. This can be a great advantage in many applications, since only altering the frequency of the device will provide desired deflection patterns. However, there are also certain challenges regarding to the AOD's nature and mechanism such as its narrow scan range.

2.3 Projection Applications

Adaptive and automated lighting systems in car headlights have led to a safer and more comfortable drive. High-resolution headlight systems are believed to improve that further. There are still ongoing developments for high-resolution scanning systems to realise, for example, projections for communication between the car and the driver.

In order to generate intense and possibly coloured projections, a combination of an RGB laser and Acousto-optic Deflectors can offer promising performance. It is possible to direct only one colour to the AODs from the laser and deflect it in the desired angle. For symbol projections desirable deflection range is approximately $\pm 4^\circ$ in the vertical direction and $\pm 6^\circ$ in the horizontal direction. Besides the deflection range, another important parameter to realise high resolution symbol projections is the laser beam divergence. The scanning resolution can be explained as the ratio of the scan angle to the beam divergence. That is the number of different directions that can be addressed by the projection system. Therefore, laser beam divergence must be maintained at its minimum for the system to address as many directions as it can [6].

2.4 Illumination

Usage of an RGB laser with AODs provides white light generation by additive colour mixing [3]. However, this requires a more sophisticated configuration, especially for the optics design to illuminate the road in wider angles compared to projections and with a good contrast. The desirable area for illumination applications is $\pm 5^\circ$ in vertical plane and $\pm 20^\circ$ in horizontal plane.

An optical system combined with the AODs, can give attractive features for road illumination. The mechanism free deflection of the AODs leads to high degrees of freedom for the deflection patterns. The deflection pattern can be adjusted to the desired light distribution. Redistribution of the light can be used, for instance, to generate low beam, glare-free high beam and bending light.

3 Optics Design

The implementation of Acousto-optic deflectors in automotive headlights, as indicated before, offers a great potential in terms of adaptive lighting systems. The basic principle of this project is sketched below.

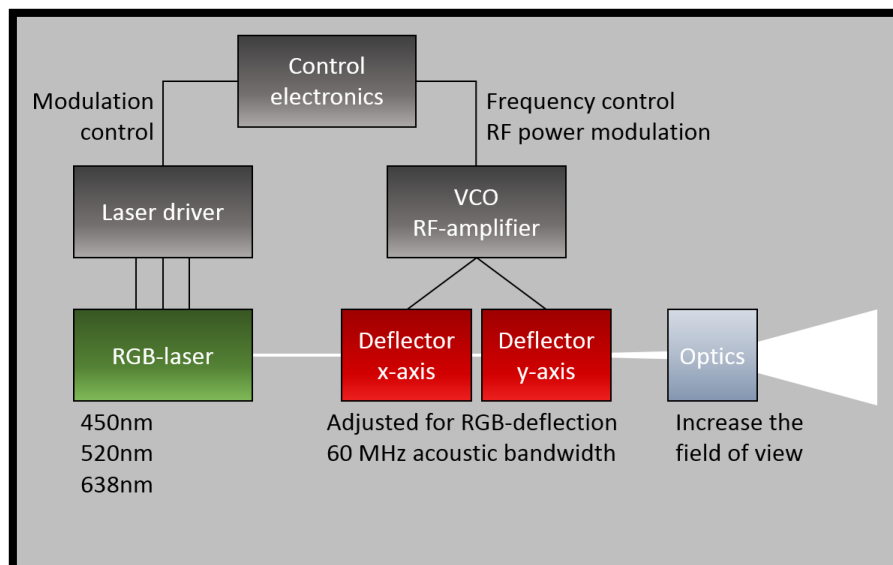


Fig.1. The working principle of the headlight system.

The laser beam from an RGB laser source is sent to two acousto-optic deflectors deflecting the light beam in horizontal and vertical directions. From equation (3), the wavelength dependency of the deflection angle can be seen. Since all three wavelengths will end up in different deflection areas, the longer the wavelength the higher the deflection angle, only the intersection of these three deflection ranges can be used for white light illumination. Thus, the deflection of the generated white light results in a relatively small deflection range. This range of chromatic overlap of three wavelengths was measured to 19,6 mrad, hence the total scan range is determined to approximately $1^\circ \times 1^\circ$. Deflected light must pass an optical system which is increasing the field of view of the illumination in the desired area. The trade-off is clear: the larger the field of view the larger the beam divergence. The resolution of the whole system is directly depending on the single beam divergence. Minimisation of the divergence of the beam is the requirement to realise adaptive high-resolution scanning applications.

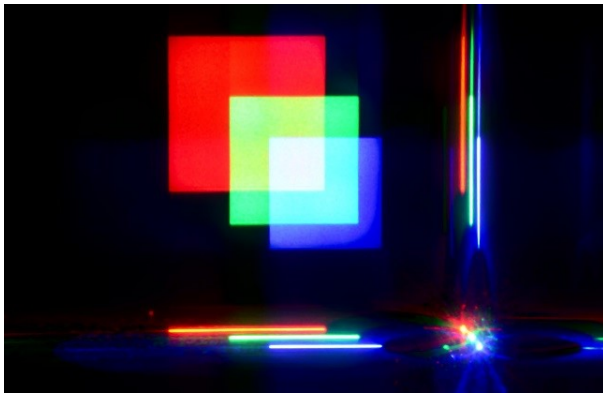


Fig.2.a

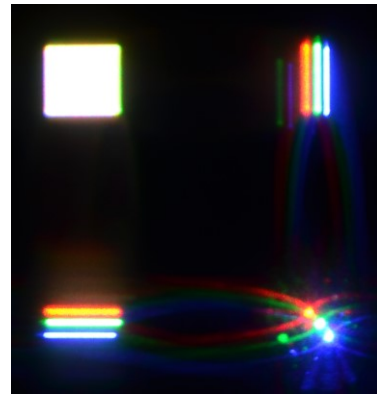


Fig.2.b

Fig.2. a. Simultaneous deflection and the chromatic overlap of the wavelengths and b. white light generated by the colours and cut-off by serial deflection via electronic control [10].

3.1 Amplification of the angular range versus resolution

Obviously, increasing the field of view is possible by using additional optics, however, as they increase the single beam divergence at the same time, more sophisticated lens configurations are required. The narrow angular range of the AODs must be increased up to $\pm 5^\circ$ in the vertical plane and $\pm 20^\circ$ in the horizontal plane for illumination applications.

Initial FOV	H, V: 1°
Targeted FOV	H: $\pm 20^\circ$, V: $\pm 5^\circ$
Aspect Ratio	4:1

Table.2. Illumination window for automotive illumination.

Resolution is the number of resolvable spots and it is given by the total scan angle of the AODs divided by the single beam divergence. A minimum beam divergence is achieved by maximising the beam radius of the collimated input beam. Therefore, a low divergence and highly collimated input beam is ideal for the optical system.

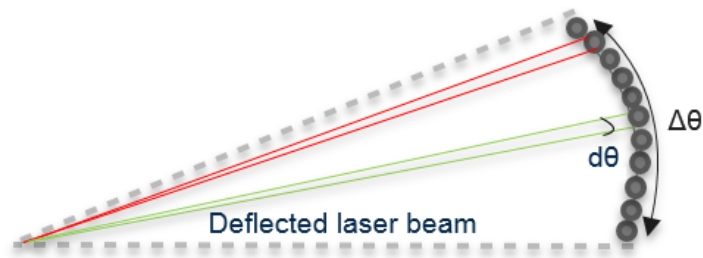


Fig.3. Illustration of different points addressed by the deflectors.

Where $\Delta\theta$ is the total scan angle, $d\theta$ is the single beam divergence and the resolution is N [7].

$$N = \frac{\Delta\theta}{d\theta} \quad (4)$$

Initially the RGB laser source used, has a full angle beam divergence of 1 mrad (0.06°), which is highly collimated and will further increase after passing through the optical system.

The optical assembly was set up right after the deflectors, based on imaging optics. Two crucial properties were considered: minimum beam divergence and target field of view (FOV). Two different approaches were realised. Principally, both approaches are telescopic systems, however, to reach the target aspect ratio, the second system was improved by implementing special curved surfaces when designing the lenses. With the first basic telescopic system a squared pattern was achieved, which can be used for symbol projection, however for illumination usage the pattern must have an aspect ratio of 4:1.

3.2 Basic Telescope

One of the advantages using a laser light source in automotive lighting is that their high range to illuminate the road with highly collimated light. To maintain this property of the laser beam, imaging optics such as telescopes, can be helpful. A system without focus or an infinite focal length is called afocal system. Such a system produces an image at infinity just as what an optical telescope can produce. An image at infinity means the output of the system is collimated, and that is the target to be achieved as an output in the proposed headlight system [4] [5].

Galilean telescopes and Kepler telescopes are examples for afocal systems including two lenses. Their distance equals to the sum of their focal lengths. The first lens is called objective lens having lower refractive power and the second lens is called eyepiece or ocular lens with greater refractive power. Below, both telescopic systems have illustrated and compared.

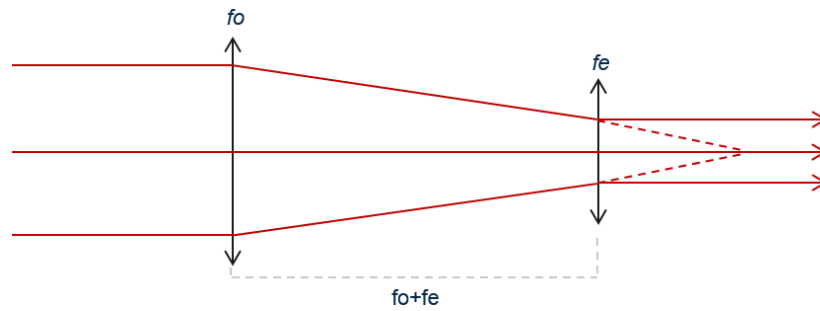


Fig.4. Galilean Telescope

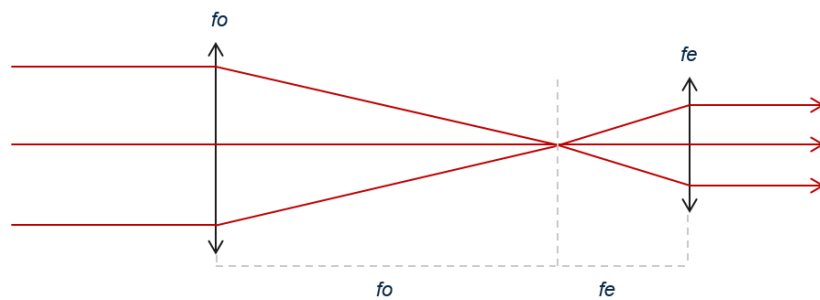


Fig.5. Keplerian Telescope

In both telescopic systems the angular magnification is calculated by the ratio of the power of the eyepiece lens and the power of the objective lens.

$$M = \frac{f_o}{f_e} \quad (5)$$

In Galilean telescopes the eyepiece lens has a negative focal length which is generating an upright image, while in Kepler telescopes the eyepiece is a focusing lens, resulting in a reversed image [5].

To simulate telescopic systems, LightTools optical design, simulation and optimisation software was used. In order to evaluate the illumination and scanning applications at the same time, the illumination window (FOV) and the divergence of a single beam must be observed. Therefore, several rays were simulated, especially the ones reaching to the edges, sides and the centre. The configuration of the deflection has been simulated in a 1° total scan range just as the output deflection range of the deflectors. So, the centre beams were deflected $\pm 0.5^\circ$ horizontally and vertically. Since the RGB laser source has a 0.06° divergence angle, the same property was assigned to every simulated beam. The profiles of the scan beams are shown in fig. 7.



Fig.6. Simulation of Keplerian Telescope

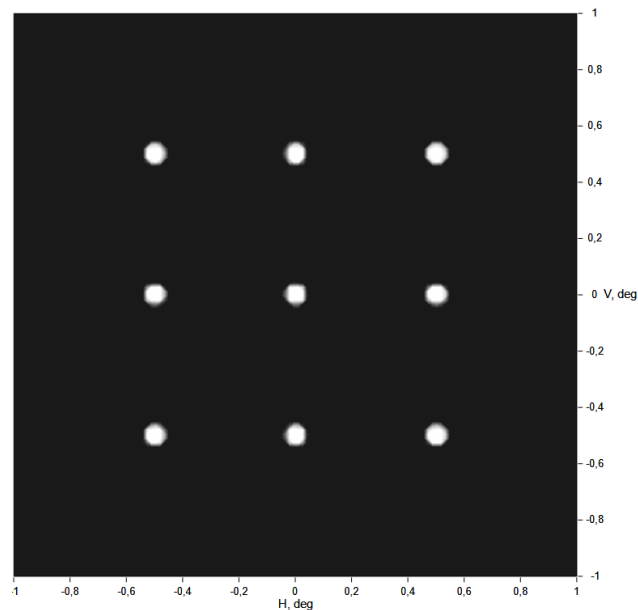


Fig.7. Simulation of deflectors' output indicating the initial FOV in both horizontal and vertical directions in degrees.

As a next step by using two convex lenses a Keplerian telescope was simulated. The lenses were selected to obtain a magnification factor of 10, so that the initial 1° full angle FOV can be expected to reach up to 10° . The eyepiece lens was selected to have an aspherical surface to reduce spherical aberrations. The telescope and simulation results are shown in fig.6. and fig.8. Figures are shown in grayscale indicating the intensity information. The contrast ranges from black at the lowest intensity to white at the highest [9]. Approximately, $\pm 5^\circ$ FOV are obtained in horizontal and vertical direction, which is applicable for on-road symbol projections.

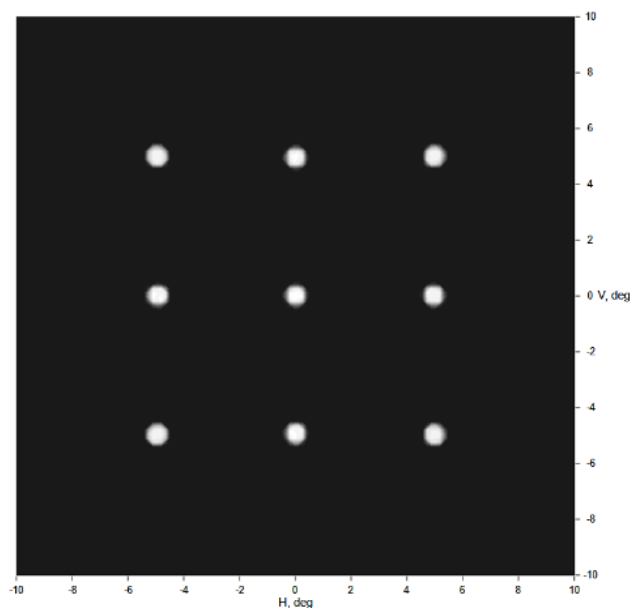


Fig.8. Simulated output of the Keplerian Telescope. The angular intensity distribution is shown in a grayscale plot.

3.3 Toroidal Telescope

There are certain requirements for automotive lighting. Several optical requirements have been already mentioned in the previous chapters including the FOV range for illumination applications. However, there are other aspects regarding to automotive lighting including mechanical requirements, complexity and costs. As a mechanical requirement, the system's overall length, is limited to approximately 120 – 200mm. Respectively, in vertical and horizontal directions, the angular range of $\pm 4^\circ$, $\pm 6^\circ$ for projection and the angular range of $\pm 5^\circ$, $\pm 20^\circ$ for illumination applications are the optical requirements for automotive lighting.

Although the Keplerian telescope system can be quite suitable for projection applications, the illumination window must be squeezed in the vertical direction and stretched in the horizontal direction for illumination applications. At this point cylindrical lenses can help, however as the system requires more compactness, useful lenses were designed to combine the properties spherical and cylindrical lenses in one element.

To achieve such a compact system the number of the optical elements can be reduced just by designing their optical properties. A toroid lens, for instance, shows different refracting powers in perpendicular planes. In this step, the lenses used in the first setup were replaced by two toroid lenses to achieve the targeted aspect ratio.

For the objective lens a focal length of around 100mm is considered to make the length of the system shorter. For both lenses aspherical surfaces are selected to minimize the spherical aberrations. The refractive powers of the toroid lenses have been chosen in order to achieve the target field of view. Curvatures of the torus were calculated in both planes, to reach a magnification factor of 40 in the horizontal plane and 10 in the vertical plane.

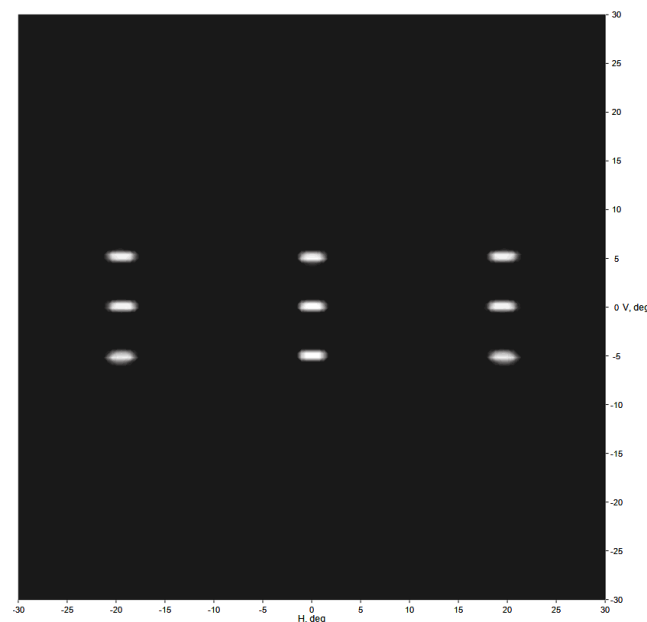


Fig.9. Output of the toroidal telescope.

3.4 Experimental Evaluation

An experimental setup was built to demonstrate the headlight system including an RGB laser source, two AODs and optics. In fig.10. the illustration of the setup can be seen. In the experimental part, the realisation of optics for projection applications showed results that are well matching the simulation.

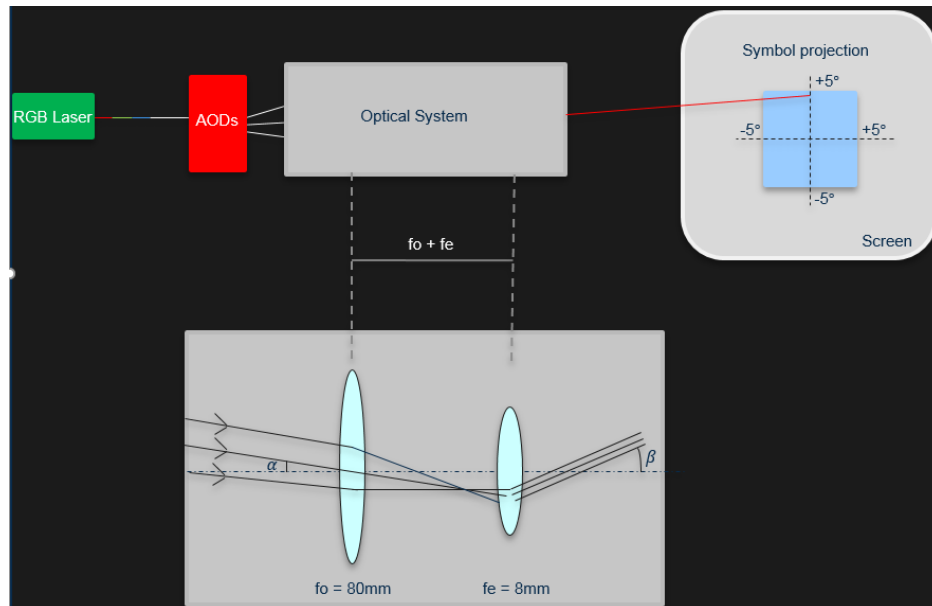


Fig.10. Principle of the experimental setup. Keplerian telescope has been sketched to show the principle rays, hence the relation between input angle α , and the output angle β .

As in simulations, two convex lenses were used to build the Keplerian telescope. The results proved that the optical system is suitable for realising coloured symbol projections. In fig.12. the experimental deflection patterns are shown. The first pattern is the output of the deflectors deflecting green light in 1° full scan angle. The second is the final deflection pattern of the light passing the telescope. The magnification factor is 10, hence the total deflection is $\pm 5^\circ$ in both directions.

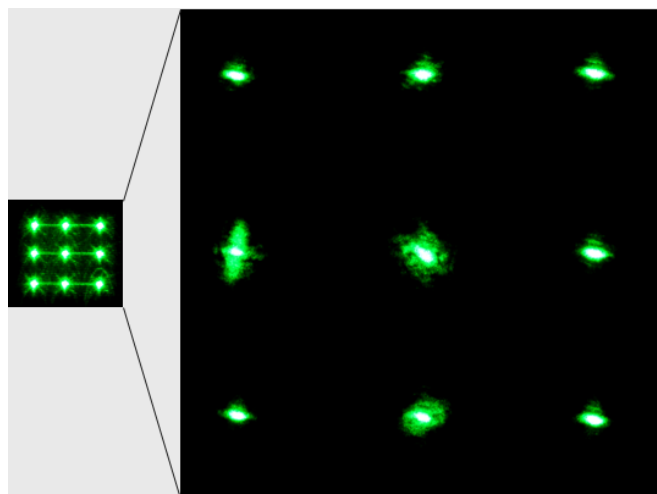


Fig.11. Experimental results.

However, there is still ongoing research to achieve the desired FOV for illumination applications. At this point the manufacturability and expense of toroidal lenses are the debate topics. Yet, as they showed satisfying results for the desired FOV and the system's compactness, it is worth to proceed further to evaluate the potential of toroidal lenses in real applications.

4 Conclusion

The potential of an alternative deflection unit included in a headlight system has been presented in this paper. Acousto-optic deflectors offer promising features to the automotive lighting technology, since they have certain advantages compared to other deflection mechanisms. Any deflection pattern with the desired intensity distribution can be created by acousto-optic deflectors for scanning and illumination applications. It was shown that their scan range can be enhanced and optimised for a variety of automotive lighting applications. In the simulations, the targeted FOV for both projection and illumination applications was achieved by implementing toroidal lenses in a telescopic setup, while in the laboratory a Keplerian telescope was built showing results which are matching prior simulations. In both configurations, the restriction of the imaging system showed the same effect for the beam divergence, which still needs to be reduced for high-resolution applications. Another approach to increase the resolution or to decrease the divergence of the beam, the efficient use of the deflector's active aperture. Herein, beam expanders can play a crucial role. Nevertheless, these approaches are included in further steps to be evaluated.

5 References

- [1] AA Opto-Electronic, Acousto-Optic Theory Application Notes, 2013, <http://www.aaoptoelectronic.com/>
- [2] D.C. Cassidy, G.J. Holton, F.J. Rutherford, Understanding Physics, Springer, New York, 2002.
- [3] Julien Hansen, M. Kaup, "Next Generation of Digital Light - Remote-Laser-Light Source supports DLP", ISAL, Darmstadt, 2017
- [4] D. Malacara-Hernández, Z. Malacara-Hernández, Handbook of optical design, Boca Raton, 2013
- [5] M.V. Klein, T.E. Furtak, Optik, Springer, Berlin, 1988
- [6] Dr. Paschotta, RP photonics Encyclopedia, RP Photonics Consulting GmbH, <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
- [7] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics, WILEY-WCH, 2008
- [8] Technical Data Sheet of AO Deflectors, DTSX-xx, DTSXY-xx, AA Opto-Electronic, 2014
- [9] Stephen Johnson on Digital Photography, Johnson Stephen, O'Reilly Media, Incorporated, 2006.
- [10] M. Bursy, J. Wallaschek, "Acousto-optics in headlamps - A new application in automotive laser lighting", LDC2019, Yokohama, Japan, 2019

DOI: [10.22032/dbt.39621](https://doi.org/10.22032/dbt.39621)

Simulation und Design mikrostrukturierter Linsen für automobiler Scheinwerfer

Dennis Zimmermann¹, Cornelius Neumann²¹HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt, E-Mail: dennis.zimmermann@hella.com²Lichttechnisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Zusammenfassung

Der Übergang des hellen in den dunklen Bereich einer Scheinwerferlichtverteilung unterliegt gesetzlichen Auflagen. Bei Scheinwerfer-Projektionssystemen wird der Übergang durch eine streuende Struktur auf der Linsenfläche aufgeweicht. Bisher erfolgte die Auslegung manuell. Diese Arbeit befasst sich mit der Auslegung strukturierter Flächen unter Anwendung von genetischen Algorithmen. Die Anforderungen an die Hell-Dunkel-Grenze eines Scheinwerfers werden erläutert. Es werden Verfahren dargestellt, um CAD-Flächen mit einer streuenden Struktur zu überlagern. Damit die Auslegung strukturierter Linsenflächen durch Optimierungsalgorithmen ermöglicht werden konnte, musste die Zeit für eine lichttechnische Simulation der Fläche reduziert werden. Die verwendete Simulationsmethodik wird erklärt und erste Ergebnisse diskutiert.

1 Einleitung

Aufgrund der größer werdenden Individualität von Scheinwerfern müssen deren Entwicklungskosten und -zeiten immer weiter reduziert werden, um einen wirtschaftlichen Prozess zu erreichen. Einerseits müssen die Kundenanforderungen erfüllt, andererseits Gesetzesvorgaben wie ECE oder FMVSS eingehalten werden [1, 2]. Unter anderem definieren diese Vorschriften das Verhalten des Übergangs von dem hellen in den dunklen Bereich der Scheinwerfer-Lichtverteilung, der sogenannten Hell-Dunkel-Grenze (HDG). In Abbildung 1 sind Lichtverteilungen mit unterschiedlichen HDGs dar-

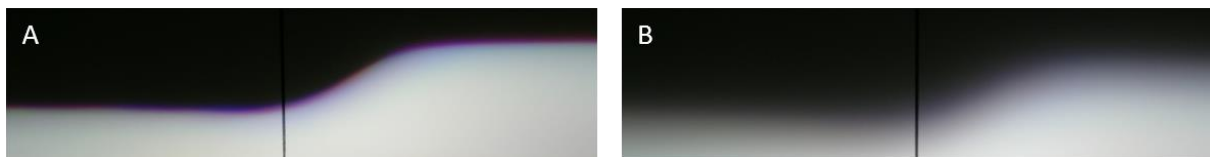


Abbildung 1: Lichtverteilung von Scheinwerfern auf einer Wand. A: Verteilung mit zu harter HDG. B: Verteilung mit weicher, gesetzeskonformer HDG.

gestellt. Die Verteilung in Abbildung 1A hat im Vergleich zur Abbildung 1B eine zu harte, nicht-gesetzeskonforme HDG. Bei Projektionssystemen, wie in Abbildung 2 skizziert, wird die Härte der HDG durch eine Strukturierung der Lichtaustrittsseite der Linse angepasst. Durch die Struktur wird ein Teil des austretenden Lichtes gestreut,

© 2019 by the authors. – Licensee Technische Universität Imenau, 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/).
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

wodurch die HDG aufweicht. Da die Amplituden der Strukturen im Bereich weniger Mikrometern liegen, wird der Begriff Mikrostruktur verwendet.

Ein Prozess, um Linsenflächen mit einer Mikrostruktur zu überlagern und Stahlwerkzeug für ein Spritzgussverfahren herzustellen, wurde im Rahmen des Förderprojektes

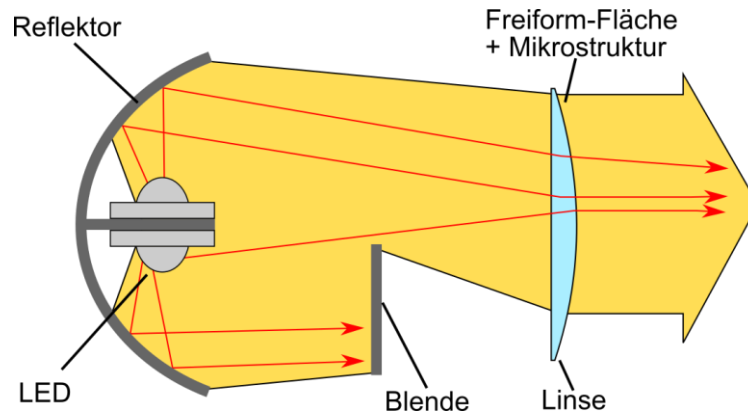


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Projektionsscheinwerfers.

ePiTec aufgesetzt [3, 4]. Die Auslegung der Struktur erfolgte dabei durch ein erfahrungsbasiertes „Try-And-Error“-Verfahren. Diese Arbeit befasst sich mit der automatisierten Auslegung mikrostrukturierter Linsen unter Verwendung von Optimierungsalgorithmen. Es werden die Anforderung an die Struktur erläutert und das mathematische Modell zur Beschreibung mikrostrukturierter Linsen erklärt. Um eine Auslegung via Optimierungsalgorithmus zu ermöglichen, musste die Simulationszeit stark reduziert werden. Die neue Simulationsmethodik wird erläutert und erste Ergebnisse werden präsentiert.

2 Anforderungen

Der Gradient der HDG ist gegeben durch [1]

$$G(\beta) = \log(E(\beta)) - \log(E(\beta + 0.1^\circ)), \quad (1)$$

wobei E die Lichtstärke bei dem vertikalen Winkel β angibt. In den ECE-Regelungen ist vorgegeben, dass die Gleichung (1) bei einem horizontalen Winkel von -2.5° ausgewertet wird. Die sich ergebene Kurve muss ein eindeutiges Maximum mit einem Wert zwischen 0,13 und 0,4 haben. In Abbildung 3 sind Beispiele von Gradientenkurven dargestellt.

3 Strukturierung von optischen Flächen

Sowohl die verwendete CAD-Software zur Auslegung von optischen Flächen, als auch die zur Simulation verwendete Ray-Tracing-Software basierte auf Non-Uniform Rational Basic Spline (NURBS)-Flächen [5]. Daher musste die strukturierte Linsenfläche in NURBS beschrieben werden. Zwei verschiedene Verfahren wurden angewandt, um

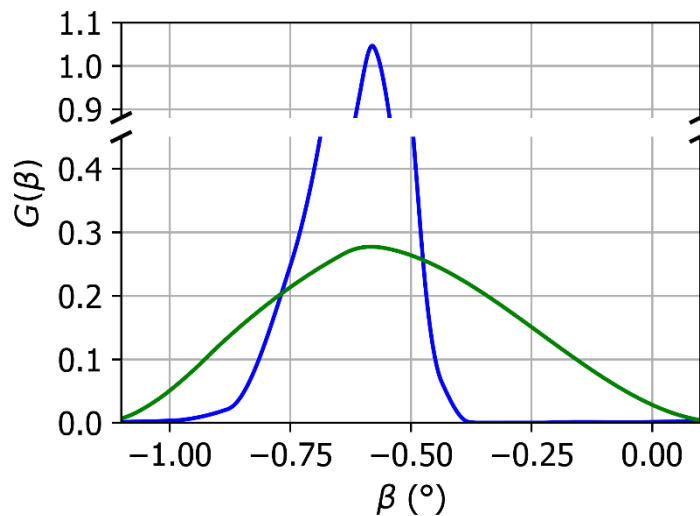


Abbildung 3: Beispiele für Gradienten-Kurven. Blau: Linse ohne Struktur. Grün: Linse mit Struktur.

eine optische Fläche mit einer Mikrostruktur zu überlagern. Beide Verfahren sind in Abbildung 4 skizziert. Ausgehend von der unstrukturierten Fläche (vgl. Abbildung 4A) wurde ein äquidistantes Punktgitter auf der Ausgangsfläche berechnet (vgl. Abbildung 4B). An den Positionen des Punktgitters wurden die Normalenvektoren berechnet und die Punkte entlang der Normalenvektoren verschoben, wodurch sich ein Punktgitter (vgl. grüne Kreuze in Abbildung 4B) ergab, das die strukturierte Fläche repräsentierte. Durch Interpolation der Punkte mit einem kubischen B-Spline wurde die mikrostrukturierte Fläche erstellt (vgl. Abbildung 4C) [5].

Bei der zweiten Methode zur Strukturierung einer Fläche wurde ebenfalls ein Punktgitter der Ausgangsfläche berechnet (vgl. Abbildung 4D). Anstatt die Punkte zu verschieben, wurde ein interpolierender kubischer B-Spline auf Basis dieser Punkte bestimmt. Die neue Fläche ist geometrisch nahezu identisch mit der alten Fläche, enthält jedoch eine höhere Anzahl an Kontrollpunkten (vgl. Abbildung 4D). Die Strukturierung der Fläche wurde erzeugt, indem die Kontrollpunkte verschoben wurden (vgl. Abbildung 4E).

Bei der ersten Methode wirkte sich die Verschiebung der Punkte direkt auf die Geometrie der Fläche aus, da die Fläche die Punkte interpolierte. Eine Verschiebung eines Punktes um einen bestimmten Versatz verschob die Fläche um den Gleichen. Da bei der zweiten Methode die Kontrollpunkte verschoben wurden, war diese direkte Abhängigkeit nicht gegeben. Die zweite Methode hat die Vorteile der schnelleren Strukturierung der Fläche. Bei dem Optimierungsprozess wurden fortlaufend neue Strukturen generiert. Bei der ersten Methode musste dazu ein lineares Gleichungssystem gelöst werden, um die strukturierte Fläche zu bestimmen, wohingegen bei der zweiten Methode nur der Versatz zu den Koordinaten der Kontrollpunkte hinzuaddiert werden musste [5].

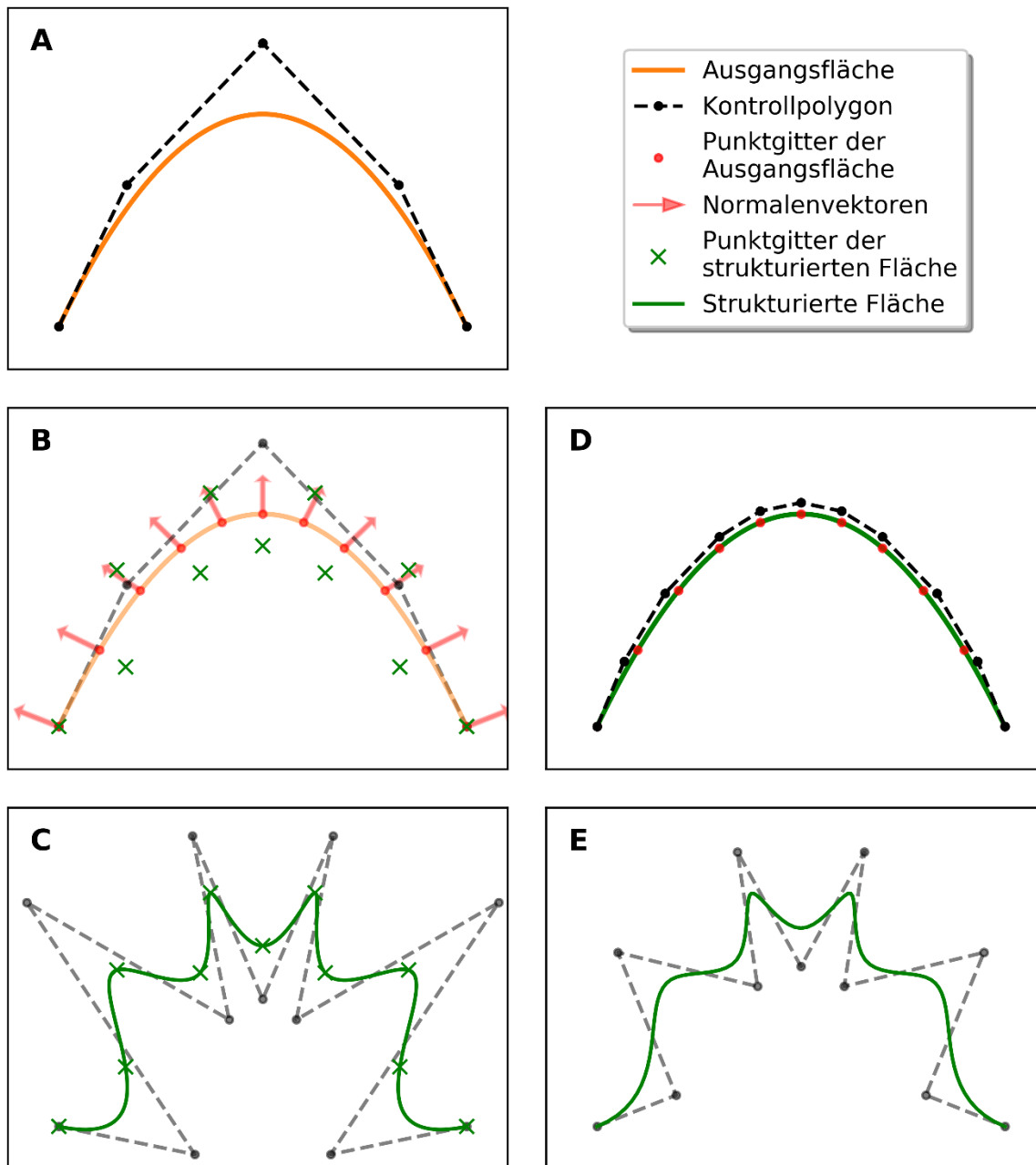


Abbildung 4: Schematische Darstellung von zwei Methoden zur Strukturierung einer Linsenfläche.

4 Simulation mikrostrukturierter Flächen

Zur Simulation der Lichtstärkeverteilung wurde das „Monte Carlo Ray Tracing“-Verfahren angewandt [6]. Das Licht wird dabei in Form von Strahlen modelliert, wobei jeder Strahl einen Lichtstrombetrag sowie eine Wellenlänge enthält. Der Weg der Strahlen wird ausgehend von einer Lichtquelle durch eine virtuelle Szenerie verfolgt, bis die Strahlen in einem Lichtstärkedetektor registriert werden. Ein Nachteil des „Monte Carlo

Ray Tracing“ besteht in der Simulation schwach beleuchteter Bereiche in der Lichtstärkeverteilung. Diese Bereiche werden im Verhältnis zu stärker ausgeleuchteten Bereichen von nur wenigen Strahlen getroffen, wodurch sich ein starkes Simulationsrauschen ergibt. Die Lichtstärkeverteilung oberhalb der HDG wird zur Berechnung der Gradienten-Kurve nach Gleichung (1) benötigt. Um eine verwendbare, das heißt nicht zu stark verrauschte, Gradienten-Kurve zu erhalten, mussten zur Simulation eines Scheinwerfers mehrere hundert Millionen Strahlen verwendet werden. Dadurch ergaben sich Simulationszeiten, die im Bereich mehrerer Minuten lagen. Bei einer Auslegung mikrostrukturierter Flächen durch einen Optimierungsalgorithmus mussten fortlaufend Simulationen durchgeführt, Gradienten-Kurven berechnet und bewertet werden. Simulationszeiten von mehreren Minuten würde zu einer Optimierungszeit von mehreren Monaten führen.

Zur Reduzierung der Simulationszeit wurde im ersten Schritt mit dem Aufbau aus Abbildung 5 simuliert. Der Aufbau entspricht dem kompletten Scheinwerfersystem aus-

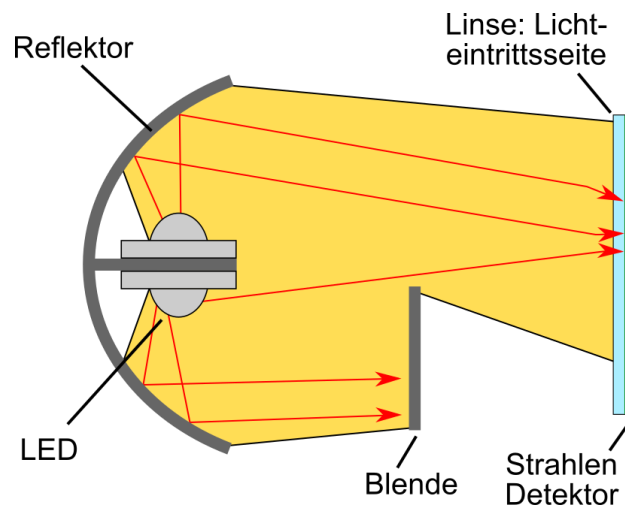


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Vorbereitung des Optimierungsprozesses.

schließlich der Lichtaustrittsseite der Linse sowie eines zusätzlichen Strahlendetektors hinter der Lichteintrittsseite der Linse. In dem Detektor wurden alle Strahlen gespeichert, die die Lichteintrittsseite der Linse passiert haben. Es werden die Koordinaten der Schnittpunkte mit der Detektorfläche, die Richtungsvektoren, die Wellenlänge und der Lichtstrom der Strahlen gespeichert. Durch diesen Schritt wurde eine Lichtquelle erstellt, die den Scheinwerfer ausschließlich der Lichtaustrittsseite der Linse modellierte. Im zweiten Schritt wurde eine Simulation mit der zuvor erstellten Strahlen-Lichtquelle und der Lichtaustrittsseite der unstrukturierten Linse durchgeführt (siehe Abbildung 6). Erreichten die Strahlen nach Brechung durch die Linse einen zuvor festgelegten Bereich (weißes Rechteck in Abbildung 6) in der Nähe der HDG, so wurden die Strahlen und die Koordinaten ihres Schnittpunktes mit der Linse abgespeichert. Das

Ergebnis war eine Strahlen-Lichtquelle, die nur die Strahlen enthält, die nach Brechung durch die Linse die HDG erzeugen.

Bei der Optimierung wurde die Strahlen-Lichtquelle verwendet, die nur die HDG-Nahen-Strahlen beinhaltet. Dadurch konnte die zur Simulation der Gradienten-Kurve benötigte Strahlenanzahl von mehreren hundert Millionen auf wenige Millionen herabgesetzt werden. Die Schnittpunkte zwischen Strahlen und den strukturierten Flächen

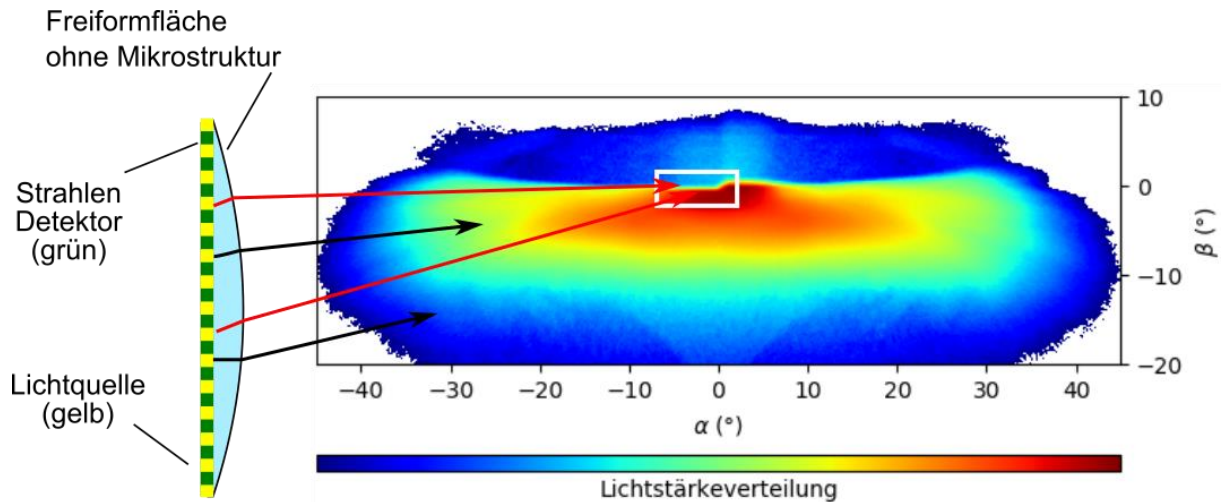


Abbildung 6: Zweiter Schritt zur Vorbereitung der Optimierung. Es wurde nach Strahlen gefiltert, die in der Lichtstärkeverteilung in der Nähe der HDG auftreffen.

wurden durch das Newton-Verfahren berechnet [7]. Zur weiteren Verkürzung der Simulationszeit wurden die zuvor abgespeicherten Koordinaten der Schnittpunkte als Startwerte für das Newton-Verfahren verwendet. Bei der Berechnung der Schnittpunkte und bei der Berechnung der Richtung der gebrochenen Strahlen mussten die B-Spline-Flächen ausgewertet und die Tangentialvektoren der Fläche berechnet werden. Anstatt den üblich verwendeten Cox-de-Boor Algorithmus zu verwenden, wurden die Basis-Funktionen durch „Single Instruction Multiple Data“-Anweisungen berechnet, wodurch die Auswertung der kubischen B-Spline-Flächen und die Berechnung beider Tangentialvektoren um einen Faktor 6 beschleunigt werden konnten [5, 8].

Insgesamt konnte durch die neue Simulationsmethodik unter Ausnutzung von Parallelisierung auf einem Intel Xeon E5-1650 v3 bei einer Simulation mit zehn Millionen Strahlen umgerechnet eine Simulationszeit von 1,8 Sekunden pro Struktur erreicht werden.

5 Auslegung von Mikrostrukturen durch Optimierungsalgorithmen

Zur Optimierung der Strukturen wurde ein genetischer Algorithmus verwendet [9]. Es wurden für jede in Kapitel 3 vorgestellte Methode zur Strukturierung eine Optimierung durchgeführt. Bei der ersten Methode wurden die Amplituden durch Normalverteilungen bestimmt. Dazu wurde das Punktgitter (vgl. Abbildung 4B) in Zellen der Größe

zwei mal zwei (vgl. Abbildung 7) eingeteilt. Jedem Punkt einer Zelle wurde eine Normalverteilung zugewiesen, sodass die Mikrostruktur durch vier Normalverteilungen bestimmt wurde. Die vier Standardabweichungen der Verteilungen waren die Parameter der Optimierung.

Wie in Kapitel 4 beschrieben, wurde zunächst eine Simulation des Scheinwerferaufbaus mit 500 Millionen Strahlen durchgeführt. Die Strahlen wurden gefiltert, sodass zur Optimierung eine Strahlen-Lichtquelle zur Verfügung stand, die sechs Millionen Strahlen enthielt und deren Strahlen in der Lichtstärkeverteilung in dem Bereich von -5° bis 1° horizontal und -1.25° bis 1° vertikal auftrafen. Das Punktgitter (vgl. Abbildung 4B und 7) hatte eine Rasterung von $100\ \mu\text{m}$. Für den genetischen Algorithmus wurde eine Populationsgröße von 42 verwendet, wobei die Elite sechs Kandidaten

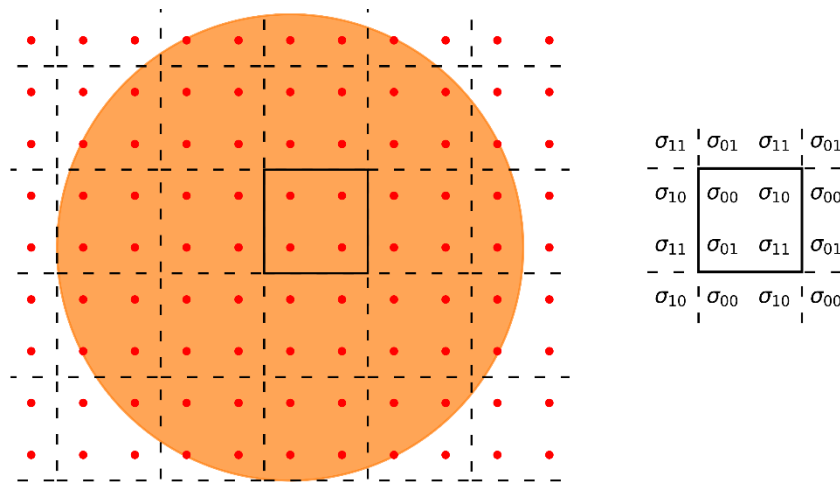


Abbildung 7: Draufsicht zur Abbildung 4B. Die Gitterpunkte wurden in Zellen (schwarze Rechtecke) zusammengefasst.

umfasste. Als Zielfunktion wurde der summierte quadratische Abstand zu einer Ziel-Gradienten-Kurve verwendet. Nach 140 Generationen wurde die in Abbildung 8A dargestellte Lichtstärkeverteilung generiert. In Abbildung 8B ist die Zielkurve und die Ergebniskurve dargestellt. Ein eindimensionaler Ausschnitt aus der erstellten Mikrostruktur ist in Abbildung 8C aufgezeigt. Die Struktur erzeugte eine HDG, deren Gradienten mit der Zielkurve im Rahmen des Simulationsrauschen übereinstimmt.

Zur Anwendung der zweiten Methode aus Kapitel 3 wurde der gleiche Scheinwerferaufbau wie bei der Anwendung der ersten Methode verwendet. Es wurden die Strahlen gefiltert, die in der Lichtstärkeverteilung in dem Bereich von -5° bis 1° horizontal und -3° bis 1° vertikal auftrafen. Da hier dem genetischen Algorithmus mehr Freiheitsgrade zur Verfügung standen, musste der vertikale Bereich vergrößert werden. Aus diesem Grund wurde eine Lichtquelle mit zehn anstatt sechs Millionen Strahlen erstellt. Ein Punktgitter mit $200\ \mu\text{m}$ Abstand wurde bestimmt und zur Berechnung einer Fläche verwendet (vgl. Abbildung 4D). Der genetische Algorithmus konnte zur Optimierung die Koordinaten der Kontrollpunkte (vgl. Abbildung 4E) in vertikaler und axialer Richtung der Linse verschieben. Durch den Linsendurchmesser von $70\ \text{mm}$ ergaben sich

700 Freiheitsgerade. Auf Grund der hohen Anzahl an Freiheitsgerade wurde eine Populationsgröße von 240 Kandidaten und eine Elite, die 12 Kandidaten umfasste, verwendet. Es wurden 1400 Generationen mit dieser Population simuliert und ausgewertet. Anschließend wurde die Populationsgröße auf 24 Kandidaten mit einer 12 Kandidaten großen Elite verringert, um eine schnellere Konvergenz zu erzielen und erneut 1400 Generationen simuliert und ausgewertet. Das Maximum der Zielkurve wurde im Vergleich zum ersten Versuch in negativer Richtung verschoben und die abfallende

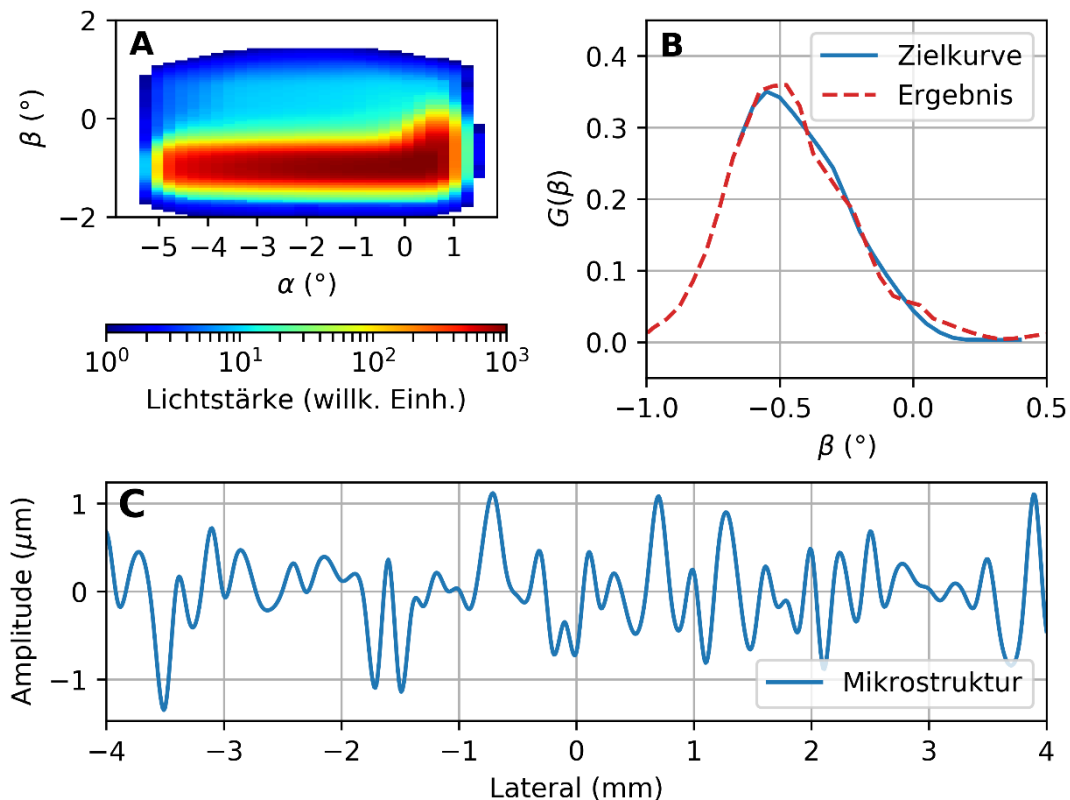


Abbildung 8: Ergebnisse der ersten Methode aus Kapitel 3. A: Finale Lichtstärkeverteilung. B: Vergleich zwischen Ziel- und Ergebnis-Gradient. C: Eindimensionale Darstellung der generierten Mikrostruktur. Die Grundfläche wurde durch eine Kurvenanpassung entfernt.

Flanke steiler gewählt (vgl. Abbildung 8B mit Abbildung 9B). Dadurch sollten die Werte der Lichtstärkeverteilung, die bei einem horizontalen und vertikalen Winkel von 0° liegen (sogenannter HV-Wert), reduziert werden [10]. Die finale Lichtstärkeverteilung ist in Abbildung 9A, die Ziel- und die Ergebniskurve in Abbildung 9B und ein Ausschnitt der Mikrostruktur in Abbildung 9C dargestellt. Die Zielkurve wurde ausschließlich des Bereiches nahe der Nulllinie gut reproduziert. Es zeigte sich bei einer Simulation der gesamten Scheinwerfer-Lichtstärkeverteilung, dass der HV-Wert 1270 cd betrug und damit deutlich über dem gesetzlichen Höchstwert von 625 cd war [10].

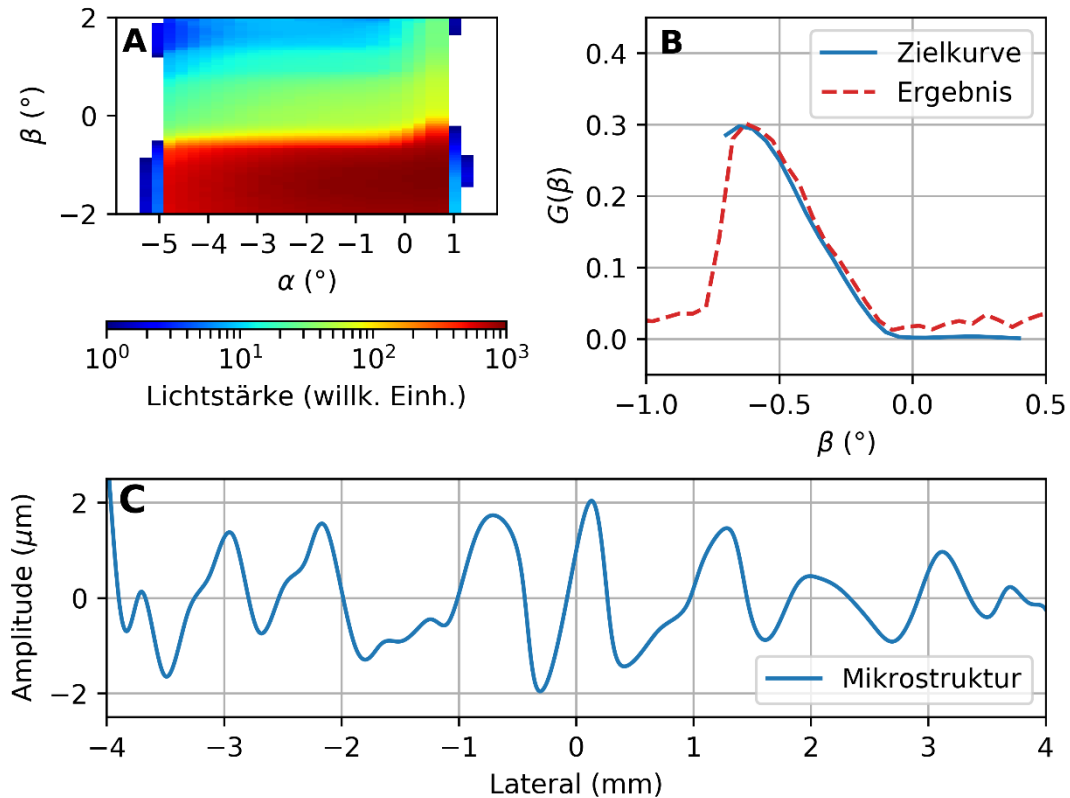


Abbildung 9: Ergebnisse der zweiten Methode aus Kapitel 3. A: Finale Lichtstärkeverteilung. B: Vergleich zwischen Ziel- und Ergebnis-Gradient. C: Eindimensionale Darstellung der generierten Mikrostruktur. Die Grundfläche wurde durch eine Kurvenanpassung entfernt.

6 Fazit und Ausblick

Mit der aufgezeigten Simulationemethodik konnte die Simulationszeit von ungefähr 10 Minuten auf wenige Sekunden reduziert werden. Dadurch wurde es ermöglicht, Mikrostrukturen unter Verwendung von genetischen Algorithmen auszulegen. Beide in Kapitel 3 vorgestellten Verfahren eignen sich, um Mikrostrukturen zu finden, die die vorgegebenen Gradienten gut reproduzieren. Jedoch wurde bei der zweiten Variante deutlich ein zu hoher HV-Wert erzielt. Daher müssen zukünftig nicht nur die Gradienten-Kurven beachtet werden, sondern auch Werte wie HV in der Zielfunktion berücksichtigt werden. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die optimalen Parameter für den genetischen Algorithmus zu finden, damit Optimierungszeiten weiter reduziert werden können.

Danksagung: Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ (Förderkennzeichen 02P14A103) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

7 Referenzen

- [1] Economic Commission for Europe, „ECE/TRANS/WP.29 /2007/77,“ 2007.
- [2] U.S. Department of Transportation, „FMVSS 108,“ 2007.
- [3] D. Zimmermann, A. Beutler, M. Brozio, S. Freutel, P. Kosse und C. Neumann, „A procedure for designing and manufacturing microstructured lenses used in automotive headlamps,“ *Advanced Optical Technologies*, (Wird Veröffentlicht).
- [4] C. Wenzel, A. Stockfisch, T. Weske und D. Zontar, „Effiziente Produktion von komplexen Kunststoffoptiken,“ *wt Werkstattstechnik online*, Nr. 5, pp. 388-393, 2019.
- [5] W. Tiller und L. Piegl, *The NURBS Book*, Springer, 1995.
- [6] M. Pharr und G. Humphreys, *Physically based Rendering*, Morgan Kaufmann, 2010.
- [7] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling und B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, 1999.
- [8] O. Abert, M. Geimer und S. Müller, „Direct and Fast Ray Tracing of NURBS Surfaces,“ in *IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, Salt Lake City, UT, 2006.
- [9] S. Luke, *Essentials of Metaheuristics (Second Edition)*.
- [10] Economic Commission for Europe, „Regulation No. 123, Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles,“ 2013.

Lichttechnische Eignungsprüfung von Retrofit-LEDs als Ersatz für Halogenglühlampen in Kfz-Scheinwerfern

Anil Erkan, M.Sc., Dr.-Ing. Jonas Kobbert, Dr.-Ing. Kiriakos Kosmas, Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Abstract

Die Licht-emittierende Diode (LED) gewinnt sowohl in der Haushalts- als auch in der Kfz-Beleuchtung stetig an Bedeutung. Der Umstieg von konventionellen Glühlampen zu LED-Leuchtmitteln erfolgt bereits seit einigen Jahren durch die Verwendung von sogenannten Retrofit-LEDs im Haushalt. Auch in der Kfz-Frontbeleuchtung wäre solch ein Wechsel technisch möglich. In Deutschland und Europa fehlen derzeit jedoch die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Zulassung von Retrofit-LEDs.

Dabei könnten sich durch die Verwendung von Retrofit-LEDs sowohl Vor- als auch Nachteile bezüglich der Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr ergeben. So könnte der mögliche höhere Lichtstrom und die kältere Lichtfarbe der Retrofit-LEDs zu einer höheren Leuchtweite und somit einer größeren Sichtbarkeitsweite führen. Diese Eigenschaften könnten jedoch ebenfalls für ein erhöhtes Blendpotential sorgen.

Mit der durchgeführten Untersuchung wird eine Aussage bezüglich der Sicherheitserhöhung im nächtlichen Straßenverkehr durch die Verwendung von aktuell verfügbaren Retrofit-LEDs getroffen. Hierfür werden sowohl photometrische Messungen im Labor als auch ein Feldtest durchgeführt und ausgewertet.

Index Terms: Kfz-Lichttechnik, Retrofit-LEDs, Messtechnik

1 Einleitung

Im Straßenverkehr stellt das visuelle System die Hauptinformationsquelle für den Kraftfahrzeugführer dar [1]. Dabei hat es die Aufgabe wichtige Informationen und Gefahren frühzeitig zu erkennen und zu verarbeiten. Hierfür ist eine geeignete Beleuchtungssituation von essentieller Bedeutung. Um diese Beleuchtungssituation bei Nacht zu erreichen, werden Beleuchtungssysteme wie Straßenleuchten und Kfz-Scheinwerfer verwendet. Die Frontscheinwerfer in Kraftfahrzeugen haben die Aufgabe die Fahrbahn vor dem Fahrzeug auszuleuchten und somit dem Fahrzeugführer eine hohe Sichtweite zu bieten. Hierzu sind in Scheinwerfern aktuell mindestens zwei



Lichtfunktionen integriert. Das Fernlicht für Fahrten ohne andere Verkehrsteilnehmer für eine maximale Sichtweite und das Abblendlicht um Gegenverkehr und vorrausfahrende Fahrzeuge nicht zu blenden. Um die Abblendlichtfunktion im Scheinwerfer zu realisieren, werden die optischen Elemente innerhalb des Scheinwerfers so optimiert, dass das vom Leuchtmittel emittierte Licht bei einer gewissen Sichtweite die Blendung des Gegenverkehrs auf ein Minimum reduziert. Dabei werden verschiedene Leuchtmittel in Scheinwerfern eingesetzt. Das am weiteste verbreitete Leuchtmittel ist die Halogenglühlampe. Laut einer statistischen Untersuchung im Jahr 2009 waren 80 % aller Fahrzeuge in Deutschland mit Halogenscheinwerfern ausgestattet [14]. Weitere Leuchtmittel sind Xenon-Lampen, LEDs sowie vereinzelt im Fernlichtbereich Leuchtstoff-konvertierte Laser.

Durch die stetige Weiterentwicklung der LED und ihrer höheren Effizienz im Vergleich zu Halogenleuchtmitteln steigt ihre Relevanz für Beleuchtungszwecke. Dies ist sowohl im Kfz-Bereich als auch im Haushalt zu beobachten [3]. Im Haushalt erfolgt der Umstieg von Halogenglühlampen auf LED-Leuchtmittel zum Teil durch sogenannte Retrofit-LEDs, LEDs die in den standardisierten Fassungen herkömmlicher Glühlampen eingesetzt werden können, wie in Abbildung 1 links angedeutet [4,13]. Diese Art des Wechsels von Halogen- auf LED-Leuchtmittel wäre durch bereits verfügbare Retrofit-LEDs im Kfz-Bereich ebenfalls möglich. Jedoch wird die Verwendung solcher LED-Leuchtmittel durch gesetzliche Regelungen verboten. In der ECE Regelung R 37 wird vorgeschrieben, dass der Glühfaden das einzige Element der Glühlampe sein darf, das Licht erzeugt und abgibt, wenn es unter Spannung gesetzt wird [2].



Abbildung 1: Glühlampen und die zugehörigen Retrofit-LEDs, während im Haushalt der Wechsel von Glühlampen auf Retrofit-LEDs bereits möglich ist, ist im Kfz-Bereich dieser Wechsel aufgrund gesetzlicher Regelungen untersagt [6, 9-12]

Dabei besteht die Möglichkeit, dass die Verwendung von Retrofit-LEDs in Kfz-Frontscheinwerfern zu einer höheren Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr führt, da durch einen potentiell höheren Lichtstrom eine höhere Leuchtweite erreicht werden könnte. Ebenfalls sind durch diese höhere Leuchtweite und die kältere Lichtfarbe bessere Detektionsmöglichkeiten vorstellbar [13]. Gleichzeitig könnten diese Eigenschaften der Retrofit-LEDs zu einem höheren Blendpotential führen. Um die Eignung der Retrofit-LEDs als Ersatz für Halogenglühlampen in Kfz-Scheinwerfern zu überprüfen, werden die Leuchtmittel zunächst photometrisch untersucht. Diese

Untersuchungen gliedern sich dabei in eine Betrachtung des Leuchtmittels und eine Betrachtung des Gesamtscheinwerfersystems, in das die Leuchtmittel eingesetzt werden, da sich hier durch die optischen Elemente wie Linsen bei einem Projektionscheinwerfer oder Reflektoren bei Reflektorscheinwerfern durchaus andere Effekte ergeben können.

2 Photometrische Betrachtung des Leuchtmittels

Für die photometrische Betrachtung wird eine Stichprobe von 17 Leuchtmitteln (6 Halogenleuchtmittel, 11 Retrofit-LEDs) mit H7-Sockel untersucht. Dabei werden verschiedene Ausführungsformen der erwerbbaaren Leuchtmittel betrachtet. Die verschiedenen Ausführungsformen der Halogenglühlampen sind in Abbildung 2 dargestellt.

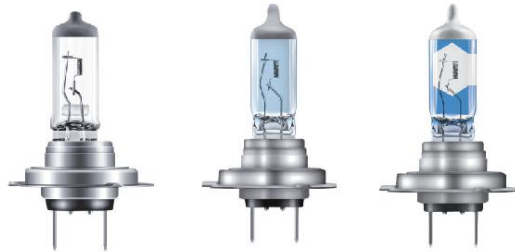


Abbildung 2: Standard-H7 Glühlampe (links), „Xenon-Effekt“-H7 Glühlampe (mittig), H7 Glühlampe „erhöhte Leuchtweite“ (rechts) [6-8]

Die verwendeten Retrofit-LEDs in Abbildung 3 unterscheiden sich ebenfalls in ihren Ausführungsformen. Sie unterscheiden sich sowohl in der Anzahl der genutzten Leuchtfächen als auch im Vorhandensein einer Kühlung sowie in der Nutzung von optischen Elementen.



Abbildung 3: Verschiedene Ausführungen von Retrofit-LEDs, v.l.n.r. Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen, Retrofit-LED mit vier Abstrahlrichtungen, Retrofit-LED mit sieben Abstrahlrichtungen, Retrofit-LED mit Reflektor- und Linsenanordnung.

Die photometrischen Labormessungen werden mit der durch die ECE Regelung R37 vorgeschriebenen Prüfspannung von 13,2 V durchgeführt [2].

2.1 Gesamtlichtstrom

Zur Bestimmung des Gesamtlichtstroms wird ein Nahfeldgoniophotometer verwendet. Hierbei wird der Photometermesskopf auf Kreisbahnen um das Leuchtmittel verfahren

und die winkelabhängige Beleuchtungsstärke gemessen. Anschließend wird integrativ der Gesamtlichtstrom bestimmt.

Die Halogenglühlampen weisen im Mittel einen Gesamtlichtstrom von 1522,10 lm auf. Die Standardabweichung beträgt 63,93 lm. Somit erfüllen die untersuchten Halogenleuchtmittel den von der ECE geforderten Wert von 1500 lm \pm 10 % [2]. Mit der durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 57,12 W ergibt sich eine Lichtausbeute von 26,65 lm/W. Der Gesamtlichtstrom bei den verschiedenen Retrofit-LEDs befindet sich in einem Bereich von 126,10 lm bis 2656,88 lm. Dabei fällt auf, dass die Retrofit-LEDs ohne Kühlung sehr geringe Werte für den Gesamtlichtstrom aufweisen. Es liegt die Vermutung nahe, dass diese LEDs falsch gekennzeichnet wurden und ursprünglich für Signaleinrichtungen gedacht sind. Daher werden diese Retrofit-LEDs im weiteren Verlauf nicht näher betrachtet. Außerdem ist auffällig, dass der Gesamtlichtstrom der restlichen Retrofit-LEDs deutlich höhere Lichtstromwerte von 2087,62 lm im Mittel erreichen und somit deutlich mehr Licht liefern als die Halogenglühlampen.

Durch die deutlich geringere Leistungsaufnahme von 29,8 W im Mittel erreichen die Retrofit-LEDs Lichtausbeuten von bis zu 88,96 lm/W. Damit wird die Annahme der höheren Effizienz der Retrofit-LEDs gegenüber den Halogenglühlampen bestätigt.

2.2 Lichtstärkeverteilungskurve (LVK)

In Abschnitt 2.1 wird deutlich, dass die Retrofit-LEDs teilweise einen deutlich höheren Gesamtlichtstrom aufweisen als die Halogenglühlampen. Neben dem Gesamtlichtstrom spielt jedoch die Lichtverteilung des Leuchtmittels eine entscheidende Rolle für die Verwendung in Kfz-Frontscheinwerfern.

Daher wird mit dem Nahfeldgoniophotometer die LVK der verschiedenen Leuchtmittel ermittelt. Als Referenz dient dabei die LVK der H7-Halogenglühlampe, die in Abbildung 4 dargestellt ist.

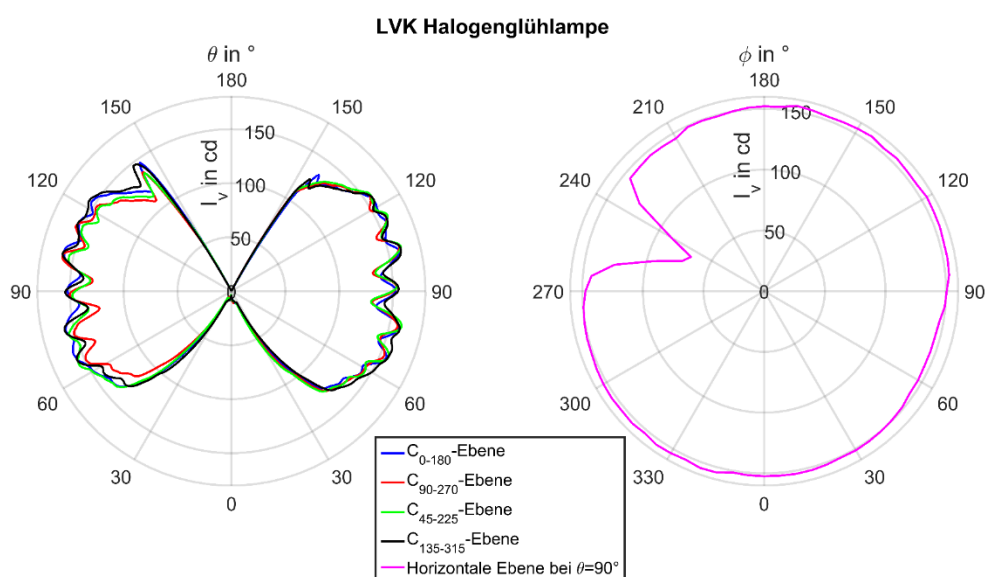


Abbildung 4: Lichtstärkeverteilung der H7-Halogenglühlampe

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, weist die H7-Halogenglühlampe eine nahezu rotationssymmetrische LVK auf. Diese hat lediglich einen Einbruch an der Stelle der Elektrodenführung (siehe Abbildung 4 rechts). Die Einkerbungen, die in Abbildung 4 auf der linken Seite zu sehen sind entstehen durch die Glühwendelwindungen.

Als nächstes wird eine Retrofit-LED mit zwei Leuchtf lächen und damit zwei Hauptabstrahlrichtungen betrachtet. Die LVK dieser Retrofit-LED ist in Abbildung 5 dargestellt. Zum Vergleich ist die LVK der H7-Halogenglühlampe ebenfalls zu sehen.

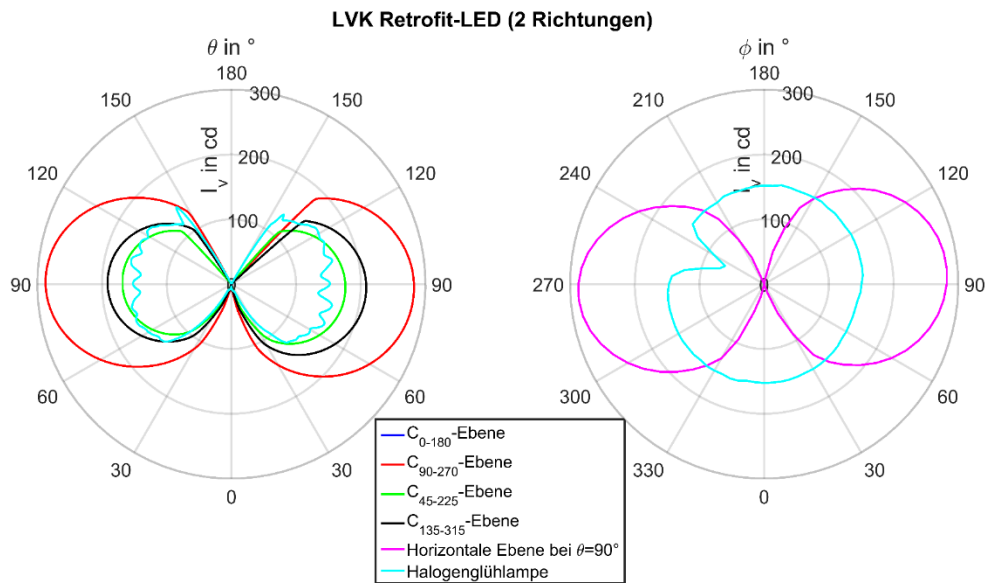


Abbildung 5: Lichtstärkeverteilung der Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen

In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass die Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen einen großen Raumbereich mit einer höheren Intensität ausleuchtet als die Halogenglühlampe. Auf der rechten Seite der Abbildung ist jedoch deutlich zu erkennen, dass Teilbereiche, die durch die Halogenglühlampe ausgeleuchtet werden, durch die Retrofit-LED nicht erfasst werden können. Dies könnte beim Einsatz im Scheinwerfer dazu führen, dass Teilbereiche auf der Fahrbahn deutlich heller und andere Bereiche auf der Fahrbahn kaum ausgeleuchtet werden.

Zuletzt wird die in Abbildung 6 dargestellte LVK der Retrofit-LED mit vier Abstrahlrichtungen betrachtet.

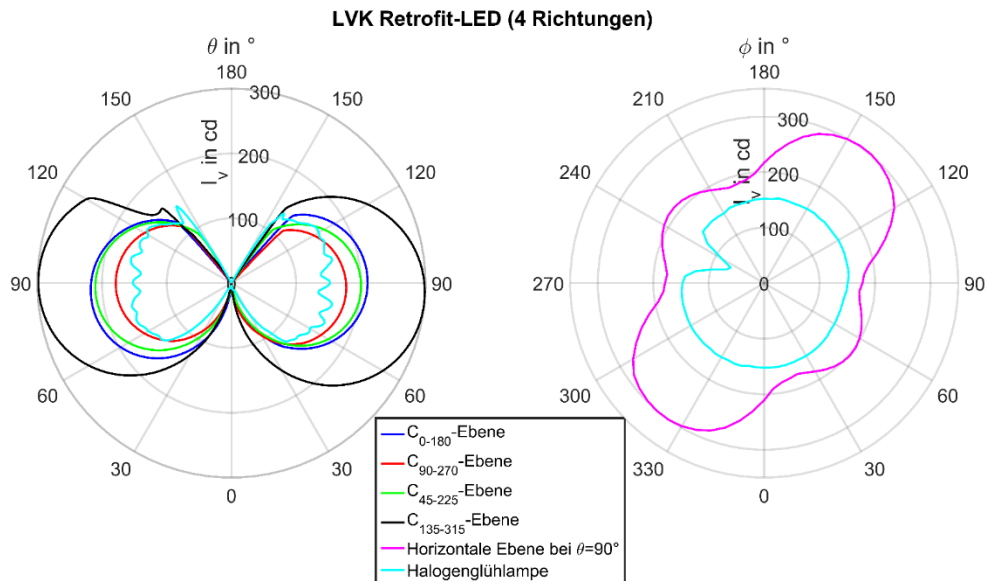


Abbildung 6: Lichtstärkeverteilung der Retrofit-LED mit vier Abstrahlrichtungen

Im Vergleich zur LVK der Retrofit-LED aus Abbildung 5 weist diese LVK in der horizontalen Ebene keine Lücken auf. Dies resultiert aus den zwei zusätzlichen Leuchtflächen. Es ist deutlich zu sehen, dass der gesamte durch die Halogenglühlampe ausgeleuchtete Bereich auch von der Retrofit-LED ausgeleuchtet wird. Zudem ist die Intensität der Retrofit-LED im ausgeleuchteten Bereich höher als die der H7-Halogenglühlampe. Dies sollte im Gesamtscheinwerfersystem dazu führen, dass die zu beleuchtenden Bereiche auf der Fahrbahn durch den Einsatz dieser Retrofit-LED mit einer höheren Intensität beleuchtet werden.

Um die aus der LVK-Betrachtung abgeleiteten Hypothesen zu überprüfen wird im nächsten Abschnitt die photometrische Betrachtung des Gesamtscheinwerfersystems vorgestellt und analysiert.

3 Photometrische Betrachtung des Gesamtscheinwerfersystems

Die photometrische Betrachtung des Gesamtscheinwerfersystems dient dazu die Auswirkungen der Leuchtmittleigenschaften auf das Lichtbild des Frontscheinwerfers zu bestimmen. Hierzu wird die LVK des Gesamtscheinwerfersystems mit den verschiedenen eingesetzten Leuchtmitteln gemessen. Diese Messung wird sowohl mit Reflexions- als auch mit Projektionsscheinwerfern durchgeführt, da die Scheinwerfertechnologie neben dem verwendeten Leuchtmittel einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Lichtverteilung hat.

3.1 Reflexionssystem

Für die Untersuchung des Reflexionssystems wird ein Freiflächenreflektor-Scheinwerfer genutzt. Dies bedeutet, dass wie in Abbildung 7 dargestellt, jede Reflektorteilfläche für einen Bereich der LVK zuständig ist.

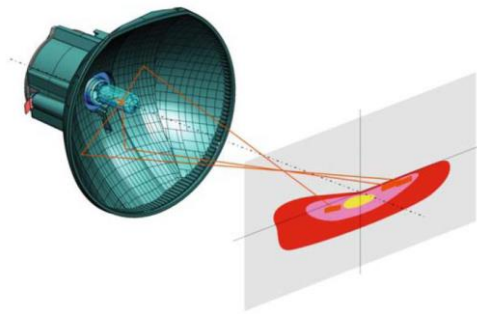


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Reflexionsscheinwerfers, jeder einzelne Reflektorbereich ist für die Ausleuchtung eines bestimmten Bereichs der Fahrbahn zuständig [5]

Für die Messung der LVK wird ein Kfz-Goniophotometer verwendet. Der Reflexionsscheinwerfer wird mit eingesetzter Halogenleuchte eingestellt und bei einer Prüfspannung von 13,2 V die LVK bestimmt. Anschließend wird die Messung mit den eingesetzten Retrofit-LEDs wiederholt ohne dass der Scheinwerfer hierbei neu eingestellt wird. Dies wird explizit unterlassen um das Verhalten bei einfachem Leuchtmittelwechsel zu untersuchen. In Abbildung 8 sind die aufgenommenen LVKs dargestellt. Die LVKs mit den eingesetzten Retrofit-LEDs sind um bis zu $16,05^\circ$ nach links und $6,25^\circ$ nach oben verschoben. Ein einfacher Leuchtmittelwechsel ist somit definitiv nicht möglich. Für Darstellung in Abbildung 8 wurden die LVKs mathematisch korrigiert und neu ausgerichtet.

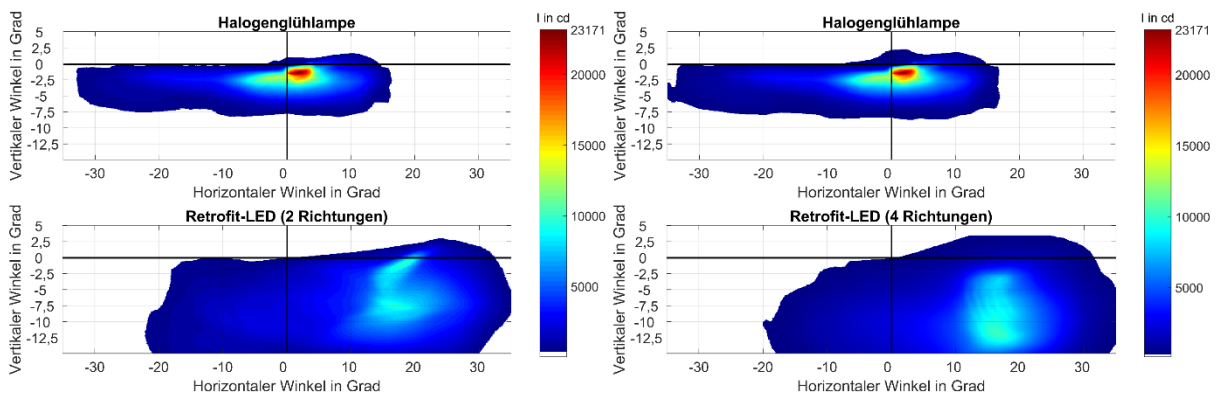


Abbildung 8: LVKs des Reflexionsscheinwerfers: Halogenleuchte (oben), Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen (links, unten), mit vier Abstrahlrichtungen (rechts, unten)

Aus den in Abbildung 8 dargestellten LVKs wird deutlich, dass die Verwendung von Retrofit-LEDs mit starken Veränderungen des Scheinwerferlichtbilds einhergeht. So ist deutlich zu erkennen, dass die LVKs mit eingesetzten Retrofit-LEDs keinen „Hotspot“ aufweisen, wie es bei Verwendung der Halogenleuchte der Fall ist (siehe Abbildung 8 oben). Außerdem wird deutlich, dass trotz höherem Lichtstrom die Maximalintensität der LVKs bei eingesetzten Retrofit-LEDs deutlich geringer ist als bei eingesetzter Halogenleuchte. Diese beträgt bei der Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen

9879,5 cd (42,53 %), bei vier Abstrahlrichtungen 10298 cd (44,44 %) und bei der Halogenglühlampe 23171 cd.

Diese LVK-Messung hat gezeigt, dass ein deutlich höherer Lichtstrom und eine ausreichende Lichtverteilung der Retrofit-LED nicht ausreicht, um die gleiche Scheinwerferlichtverteilung zu erzeugen, wie eine Halogenglühlampe.

3.2 Projektionssystem

Das schematisch in Abbildung 9 abgebildete Projektionssystem beinhaltet im Vergleich zum Reflexionssystem eine zusätzliche Blende und eine Linse. Die Blende beinhaltet bereits die Form der Hell-Dunkel-Grenze, sodass die durch das Projektionssystem erzeugte Lichtverteilung für alle verwendeten Leuchtmittel eine vorgegebene Form erhält. Dies hat den Vorteil, dass bei Wechsel des Leuchtmittels keine größeren Verschiebungen des Lichtbilds auftreten.

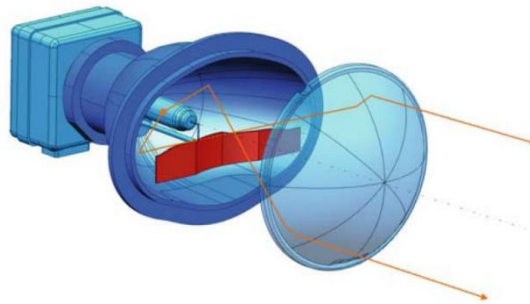


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Projektionsscheinwerfers, im Gegensatz zum Reflexionssystem wird die Form der Lichtverteilung durch den Einsatz einer Blende im zweiten Brennpunkt erzeugt [5]

Die Messung der LVKs wird analog zur Messung der LVKs des Reflexionsscheinwerfers durchgeführt. Die ermittelten LVKs sind in Abbildung 10 dargestellt.

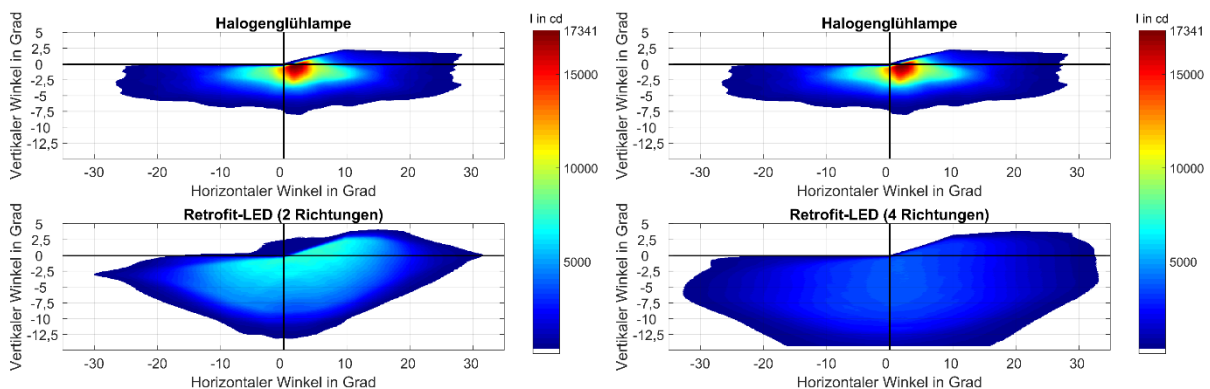


Abbildung 10: LVKs des Projektionsscheinwerfers: Halogenglühlampe (oben), Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen (links, unten), mit vier Abstrahlrichtungen (rechts, unten)

Aus den dargestellten LVKs wird deutlich, dass trotz Verwendung der Blende teilweise Licht in den Blendbereich gestreut wird (Abbildung 10 links unten). So ist zu erwarten,

dass die Verwendung von Retrofit-LEDs in Projektionssystemen zu einem erhöhten Blendpotential führt. Außerdem wird erneut deutlich, dass trotz des höheren Lichtstroms der Retrofit-LEDs die Maximalintensität der Lichtverteilung deutlich geringer ist als bei Verwendung der Halogenglühlampe. Diese beträgt bei der Retrofit-LED mit zwei Abstrahlrichtungen 7486,2 cd (43,17 %), bei vier Abstrahlrichtungen 3897,4 cd (22,47 %) und bei der Halogenglühlampe 17341 cd.

Die Ergebnisse des Projektionsscheinwerfers zeigen ebenfalls, dass es neben der Lichtverteilung und des Gesamtlichtstroms der Leuchtmittel weitere Faktoren gibt, die für die Erzeugung einer geeigneten und nach ECE zulassungsfähigen Lichtverteilung essentiell sind.

Zur Bestimmung eines Faktors, der einen großen Einfluss auf die Lichtverteilung hat, werden die geometrischen Abmessungen der einzelnen Leuchtmittel genauer betrachtet. Dabei wird festgestellt, dass die Abmessungen der Halogenglühlampe in der ECE Regelung R37 genormt ist. So ist die Länge der Glühwendel und somit der leuchtenden Fläche auf 4,1 mm genormt. Der Abstand zwischen der Glühwendel und dem Lampensockel ist auf 25 mm genormt. Bei Betrachtung der Retrofit-LEDs fällt auf, dass keine der Retrofit-LEDs diese Abmessungen erfüllt. Der Vergleich der geometrischen Abmessungen ist in Abbildung 11 dargestellt.

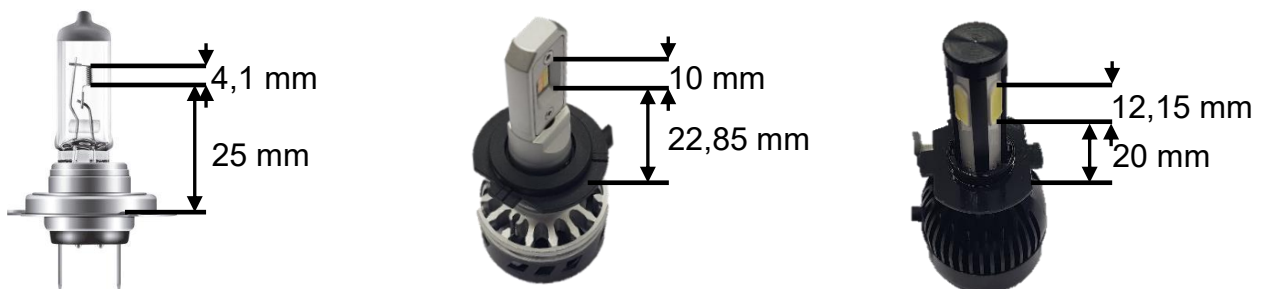


Abbildung 11: Vergleich der geometrischen Abmessungen der Halogenglühlampe mit den Retrofit-LEDs

Diese Abweichung von der genormten Geometrie sorgt dafür, dass die Lichtverteilung des Scheinwerfers deutliche Unterschiede aufweist. Dieser Einfluss entsteht dadurch, dass die Reflektoren und weitere optische Elemente auf diese genormte Geometrie der Halogenglühlampe rechnergestützt optimiert werden. In Abbildung 12 wird der Einfluss der Geometrieabweichungen auf die Lichtverteilung anhand einer Simulation eines einfachen Paraboloid-Reflektors und einer Punktlichtquelle verdeutlicht. Dabei wird die Punktlichtquelle einmal im Brennpunkt des Reflektors positioniert und anschließend entweder um 5 mm nach vorne oder nach hinten verschoben.

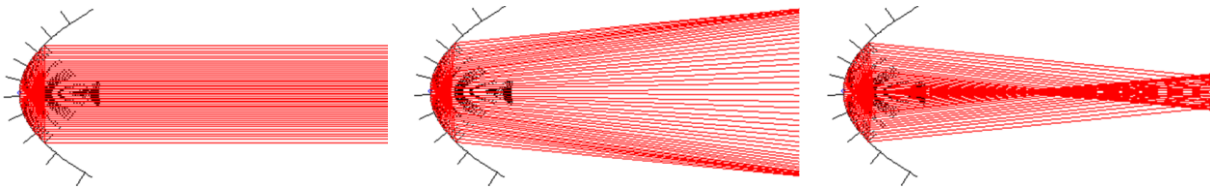


Abbildung 12: Strahlengang an einem Paraboloid-Reflektor, links: Lichtquelle befindet sich im Brennpunkt des Reflektors, mittig: Lichtquelle befindet sich zwischen dem Reflektor und dessen Brennpunkt, rechts: Lichtquelle hat einen größeren Abstand zum Reflektor als dessen Brennweite

Es ist zu sehen, dass die Positionierung der Lichtquelle im Brennpunkt des Reflektors zu einem parallelen Lichtaustritt aus dem Reflektor führt. Wird die Lichtquelle von diesem Brennpunkt entfernt divergieren oder konvergieren die Lichtstrahlen. Dies hat zur Folge, dass die Intensität des austretenden Lichtes bei größeren Entfernungen deutlich geringer sein wird.

4 Feldtest

In einem abschließenden Feldtest werden die Vermutungen des erhöhten Blendpotentials validiert. Hierzu wird der Projektionsscheinwerfer verwendet, da hier die Veränderung der Lichtverteilungsform vernachlässigbar ist.

Für die Durchführung des Feldtests wird ein Versuchsfahrzeug mit Projektionsscheinwerfern ausgestattet und mit insgesamt vier verschiedenen Leuchtmitteln verwendet. Dabei handelt es sich um zwei verschiedene Halogenglühlampen und zwei Retrofit-LEDs. Zur Bestimmung des relativen Blendpotentials wird in einem Messfahrzeug ein Photometerkopf auf Fahreraugenposition positioniert. Mit jedem Leuchtmittel werden 10 Versuchsfahrten mit 70 km/h durchgeführt und die Beleuchtungsstärke am Fahrerauge in Abhängigkeit des Abstandes gemessen. Die erhaltenen Beleuchtungsstärkeverläufe werden auf den Beleuchtungsstärkeverlauf der Standard-Halogenglühlampe normiert, um einen Vergleich anzustellen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.

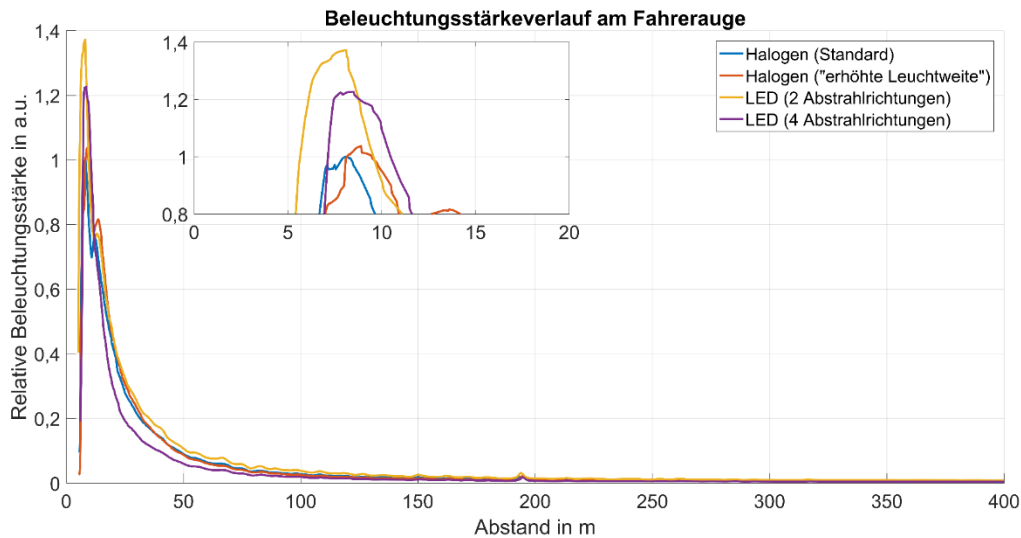


Abbildung 13: Gemittelte Beleuchtungsstärkeverläufe der vier Leuchtmittel bei einer Geschwindigkeit von 70km/h

Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Retrofit-LEDs eine 20 bis 40 % höhere Beleuchtungsstärke hervorrufen als die Halogenglühlampen. Dies bestätigt die Vermutungen aus den Laboruntersuchungen. Die Verwendung von Retrofit-LEDs führt zu einer relativen Erhöhung des Blendpotentials für den Gegenverkehr.

5 Fazit

Die durchgeführte Untersuchung hat gezeigt, dass bei der Verwendung aktuell verfügbarer Retrofit-LEDs keine Erhöhung der Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr gegeben ist und die Verwendung nicht zu empfehlen ist. Dies liegt an der geringeren Reichweite beim Einsatz im Gesamtscheinwerfersystem und an der Erhöhung des Blendpotentials im Vergleich zu Halogenglühlampen. Der Hauptgrund für diese Veränderungen des Scheinwerferlichtbilds ist die Abweichung in den geometrischen Abmessungen. Für eine Weiterentwicklung im Bereich der Kfz-Retrofit-LEDs ist die Einhaltung der genormten geometrischen Abmessungen essentiell.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Diem, Carsten: *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Fachgebiet Lichttechnik. 2004.
- [2] United Nations Economic Commission for Europe: *Regulation No. 37. Uniform provisions concerning the approval of filament lamps for use in approved lamp units of power-driven vehicles and of their trailers. Revision 8*. In: *Official Journal of the European Union*. 2015.

- [3] Frankfurter Allgemeine Zeitung GmbH: *Autoscheinwerfer: Das LED-Verbot*. <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/autoscheinwerfer-das-led-verbot-fuer-h7-gluehlampen-14430617.html>.
- [4] Jüstel, Thomas und Schwung, Sebastian: *Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz*. 1. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Spektrum, 2016. ISBN: 9783662484548. DOI: 10.1007/978-3-662-48455-5.
- [5] Khanh, Tran Quoc: *Optische Technologien im Kfz-Bereich - Folien zur Vorlesung*. Darmstadt, 2015.
- [6] OSRAM GmbH. *Produktdatenblatt 64210 OSRAM ORIGINAL LINE | Halogen-Scheinwerferlampen für Pkw*. 2018.
- [7] OSRAM GmbH: *Produktdatenblatt 64210CBI OSRAM COOL BLUE INTENSE | Halogen-Scheinwerferlampen für Pkw*. 2018.
- [8] OSRAM GmbH: *Produktdatenblatt NBL 64210NBL OSRAM NIGHT BREAKER LASER | Halogen-Scheinwerferlampen für Pkw*. 2018.
- [9] Philips: *Datenblatt: Classic LEDbulb/candle/luster E27/E14 Filament*. 2018.
- [10] Philips: *Datenblatt: Philips Halogen Classic Halogenlampe*. 2018.
- [11] Philips: *Datenblatt: Philips X-tremeUltinon LED*. 2018.
- [12] TÜV Rheinland: *LED-Retrofit am Auto - geht das? - TÜV Rheinland Mobilityblog*. <http://mobilityblog.tuv.com/led-retrofits/>. 2018.
- [13] Andreas Ueberschaer: *Lichtfarbe in der Straßenbeleuchtung*. Dissertation. Technische Universität Ilmenau und Der Andere Verlag GmbH.
- [14] Volkswagen: *Pressemitteilung: Lichttechnik - Sehen und gesehen werden*. In: ViaVision 08. 2011



URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-201920047



DOI: 10.22032/dbt.38440

Lux junior 2019

14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs 6. bis 8. 9. 2019 Dörfenfeld/Ilm