

Lux junior 2023

16. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs 23. bis 25.6.2023 Dörnfeld/Ilm

Tagungsband



Deutsche Lichttechnische
Gesellschaft e.V.



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU

Lux junior 2023

16. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs 23. bis 25.6.2023 Online

Tagungsband

16. Internationales Forum
für den lichttechnischen Nachwuchs

23. bis 25. Juni 2023
Dörnfeld bei Ilmenau

Herausgegeben von

Christoph Schierz und Cornelia Vandahl

Veranstalter

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik

und

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

Impressum

Lux junior 2023, Tagungsband

16. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs

Dörfeld/Ilm, 23. – 25. Juni 2023

Herausgegeben von

Christoph Schierz und

Cornelia Vandahl

Technische Universität Ilmenau

Fakultät für Maschinenbau

Fachgebiet Lichttechnik

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

Deutschland

DOI: 10.22032/dbt.55787

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023200248

Veröffentlicht durch

Universitätsbibliothek Ilmenau

[ilmedia](#)

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

Deutschland

www.tu-ilmenau.de/ilmedia

© Technische Universität Ilmenau (Thür.), 2023



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 16. 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.

In den 30 Jahren ihres Bestehens entwickelte sich die zweijährig stattfindende Tagung zu einer Traditionsveranstaltung, die das Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau gemeinsam mit der Bezirksgruppe Thüringen-Nordhessen der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft LiTG e. V. durchführt.

Dr. Cornelia Vandahl, 2023

Index

Vorwort	iii
Baumann, Maximilian, Chouchen, Yasmine; Trampert, Klaus; Neumann, Cornelius	1
Untersuchung einer cyan-farbigen Signalleuchte zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern	
DOI: 10.22032/dbt.58583	
Beyki; Mohammad; Patzke, Robert; Pawlak, Justus; Renz, Franz	13
Simulative development of the electronic component of Mössbauer spectroscopy with a focus on the controllability of a 2nd order transimpedance amplifier	
DOI: 10.22032/dbt.58584	
Chen, Tianshu; Herzog, Alexander; Khanh, Tran Quoc	25
Detection of stroboscopic effects in dependence of duty cycle, speed, and illuminance	
DOI: 10.22032/dbt.58586	
Ghosh, Oindrila; Neumann, Cornelius; Müller, Jan; Ramsteiner, Ingo; Fieß, Reinhold	43
Lab-on-Chip Projection System for Fluorescence based Medical Analysis	
DOI: 10.22032/dbt.58587	
Hansen, Frithjof; Völker, Stephan	57
Entwicklung von Straßenbeleuchtungskonzepten mittels LED-Technik zur Verbesserung der visuellen Wahrnehmung von Radfahrern	
DOI: 10.22032/dbt.58588	
Hegemann, Tim; Khanh, Tran Quoc	69
Der Weg zur effizienten Belichtungsregelung in Algen-Photobioreaktoren	
DOI: 10.22032/dbt.58589	
Henning, Marie	81
Probandenversuch zur Ermittlung von Grenzwerten für Farbsäume bei Optiken für die Allgemeinbeleuchtung	
DOI: 10.22032/dbt.58628	

Hilmer, Maatje; Ledig, Johannes	121
Lichtstärkeinheit im europäischen Vergleich - Stand der Bearbeitung des aktuellen EURAMET-Schlüsselvergleichs	
DOI: 10.22032/dbt.58590	
Ibryamov, Metin Aydanov; Petrov; Orlin Lyubomirov.....	131
3D techniques for presenting lighting parameters	
DOI: 10.22032/dbt.58593	
Kemmler, Elisabeth; Myland, Paul; Klages, Julian; Khanh, Tran Quoc	139
Untersuchung der Duv-Präferenz in Abhängigkeit von korrelierter Farbtemperatur (CCT), Farbgamut und betrachteten Objekten	
DOI: 10.22032/dbt.58594	
Krieft, Florian; Neumann, Cornelius; Niedling, Mathias	147
Scheinwerfer und Kamera als Sichtweitensensor basierend auf der spektralen Analyse der Rückstreuung	
DOI: 10.22032/dbt.58595	
Kunst, Korbinian; Erkan, Anil; Engelbrecht-Schnür, Lily Antoinette; Hoffmann, David; Peier, Markus; Singer, Timo ; Khanh, Tran Quoc	171
Effizienzsteigerungsmöglichkeiten für Kfz-Beleuchtungssysteme durch Analyse der Verkehrssituation	
DOI: 10.22032/dbt.58596	
Liegner, Lukas; Völker, Stephan.....	179
Vereinfachte lichttechnische Vermessung der ortsfesten Straßenbeleuchtung bei Dunkelheitsunfällen	
DOI: 10.22032/dbt.58598	
Lukanov, Cvetomir; Petrov, Orlin Lyubomirov	191
Intelligent lighting system with the ability to control the color temperature and light flow of the illuminators	
DOI: 10.22032/dbt.58599	
Malinen, Niilo; Vilenius, Tommi; Collin, Jussi; Nieminen, Jari.....	197
Capacitive silicon MEMS based combined accelerometer and gyroscope sensors in headlight levelling systems	
DOI: 10.22032/dbt.58600	

Müller, Jan; Ramsteiner, Ingo; Fieß, Reinhold; Neumann, Cornelius	209
Wavelength-converted light sources in fluorescence-based methods in medical technology	
DOI: 10.22032/dbt.58601	
Müller, Nathalie; Waldner, Mirko; Maroke, Alisha; Bertram, Torsten	223
Usage of Material Properties of 3D Objects for an Improved Illumination by High-Definition Matrix Headlights	
DOI: 10.22032/dbt.58602	
Peier, Markus Alexander; Kunkel, Julian; Zandi, Babak; Erkan, Anil; Hoffmann, David; Kunst, Korbinian; Khanh, Tran Quoc	237
Blendungsvermeidung bei nächtlichen Fahrten durch adaptive Steuerung der Heckleuchten an Fahrzeugen	
DOI: 10.22032/dbt.58603	
Pekgöz, Anil Jean; Buthmann, Jannes	247
Automated and Repeatable Homogeneity Calculations on Simulated and Measured Luminance Fields	
DOI: 10.22032/dbt.58604	
Raveendran, Gurubaran; Homeyer, Kai; Raabe, Jessica; Bartels, Thomas; Lachmayer, Roland	255
Beleuchtung als Einflussfaktor für eine tiergerechte Mastputenhaltung	
DOI: 10.22032/dbt.58605	
Rogalski, Christian; Niedling, Mathias	269
Analyse von Schwierigkeiten bei der Konzeptionierung von nachhaltiger automobiler Lichttechnik	
DOI: 10.22032/dbt.58606	
Rolf, Hannah; Udovicic, Ljiljana; Völker, Stephan.....	277
Effects of light on attention of fulltime daytime workers – a laboratory study	
DOI: 10.22032/dbt.58607	
Rottmann, Leonhard.....	289
Light Based Solutions for the Acceptance of Facing Rearward in Autonomous Vehicles	
DOI: 10.22032/dbt.58608	

Schlanke, Martin; Vandahl, Cornelia; Bieske, Karin; Schierz, Christoph; Kolbe, Oliver; Gebhardt, Michael; Kunert, Kathleen	307
Untersuchungen zur Optimierung von barrierefreien visuellen Kontrasten	
DOI: 10.22032/dbt.58609	
Schmidt, Jan; Meyer, Maic; Maass, Robert; Pendsa, Stefan; Gerloff, Thorsten	327
Realisation of a hemispherical illuminance in an integrating sphere (Realisierung einer hemisphärischen Beleuchtungsstärke in einer Ulbricht-Kugel)	
DOI: 10.22032/dbt.58610	
Schwarznecker, Till; Hilmer, Maatje; Ledig, Johannes	341
Lichtquellen und deren Darstellung von niedrigen und hohen Beleuchtungsstärken für die Kalibrierung von Photometern	
DOI: 10.22032/dbt.58611	
Seliga, Damian; Gasparovsky, Dionyz; Dubnicka, Roman; Raditschova; Jana	355
Modelling of Lighting in Urban Parks for Investigation of Environmental Impacts	
DOI: 10.22032/dbt.58612	
Stein, Annika; Wiswesser, Philipp; Ledig, Johannes	371
Auswertung der zeitliche Lichtmodulation unter Verwendung von bildauflösenden Messgeräten	
DOI: 10.22032/dbt.58613	
Suppelt, Mark, Klages, Julian; Myland, Paul; Khanh, Tran Quoc	381
Evaluating colour Preference by using Multidimensional Approaches	
DOI: 10.22032/dbt.58614	
Thiele, Tanja; Schwanengel, Christian	399
Bildgebende Messverfahren im Fokus: Fortschritte der Standardisierung im Bereich der Leuchtdichtemesskameras	
DOI: 10.22032/dbt.58615	
Varga, Corina; Udovicic, Ljiljana	407
24-Stunden-Lichtexposition unterschiedlicher Berufsgruppen	
DOI: 10.22032/dbt.58616	

Waldner, Mirko; Müller, Nathalie; Bertram, Torsten.....415

Different Approaches to Optimize High-Definition Matrix Headlights to Improve Computer Vision

DOI: 10.22032/dbt.58617

Wirth, Felix; Balasus, Jens; Wache, Antoine; Baldus, Jill; Khanh, Tran Quoc.....427

Towards an optimal pipeline for plant point cloud generation using a low-cost hardware and software approach (Auf dem Weg zu einer optimalen Pipeline für die Erzeugung von Punktwolken für Pflanzen unter Verwendung eines kostengünstigen Hardware- und Softwareansatzes)

DOI: 10.22032/dbt.58618

Untersuchung einer cyan-farbigen Signalleuchte zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern

Baumann, Maximilian; Trampert, Klaus; Dudzik, Leonhard; Rayamajhi, Asu; Neumann, Cornelius

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

Abstract/Zusammenfassung

Die Thematik der lichtbasierten Kommunikation im Straßenverkehr wird derzeit im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben untersucht. [1],[2] Ziel ist es, die bisher mit der fahrzeugführenden Person stattfindende Kommunikation mit Hilfe einer lichttechnische Einrichtung am Fahrzeug zu ersetzen. Ansätze verwenden beispielsweise Scheinwerferprojektion oder Displays am Fahrzeug zur Darstellung höher aufgelöster Inhalte wie Symbole oder Schrift. [3],[4],[5]

Diese Technologien bieten in der Gestaltung der Nachrichten, beispielsweise in Form von Symbolen viele Freiheitsgrade. Die Verwendung unterschiedlicher Farben und die Darstellung feiner, auch diagonal oder rund verlaufender Linien ist möglich. Ebenso kann die Darstellung über der Zeitachse verändert werden, so dass auch bewegte Zeichen und Animation für die Kommunikation nutzbar sind.

Im Rahmen einer Konzeptstudie wurde bewusst auf diese Möglichkeiten verzichtet und eine niedrig aufgelöste Kommunikationseinrichtung am Fahrzeug implementiert und untersucht. Diese soll als Grundlage für die Durchführung einer Probandenstudie dienen.

Index Terms: Lichtbasierte Kommunikation, Autonomes Fahren

1 Einleitung

Durch die Einführung autonomer Fahrzeuge (engl. autonomous vehicle – AV) ab Level 4 und höher entfällt der Mensch als fahrzeugführende Person. [6] Die fahrzeugführende Maschine übernimmt den überwiegenden Anteil der Aufgaben, wie Umgebungsbeobachtung, Längs- und Querführung. Da der Fahrer von dieser Tätigkeit befreit ist, ist dessen Aufmerksamkeit nicht mehr zwingend dem Verkehrsgeschehen zugewandt und der Blick nicht mehr dauerhaft nach außen auf die Fahrbahn gerichtet.



Daher muss die Maschine auch die mit der Fahraufgabe verbundene Kommunikation übernehmen. Eine wichtige Funktion ist die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern beispielsweise in unübersichtlichen Situationen, auch Pattsituationen genannt. [7] Die Kommunikation erfolgt in der Regel nonverbal [8], [9] durch Hand-Gesten oder das Geben der Lichthupe. [10]

Diese Art der Kommunikation, vor allem in besonderen Verkehrslagen, ist ebenfalls gefordert durch die Straßenverkehrsordnung (StVO). [11] Diese besagt, dass ein Teilnehmer auf seine Vorfahrt verzichten muss, sofern es die Verkehrslage erfordert. Weiter darf auf diesen Verzicht nur vertraut werden, nach Verständigung mit dem Verzichtenden.

Diese Verständigung wird durch den Fahrer, durch Handzeichen, Gesten oder das Auslösen der Lichthupe, getätigt. Mit Hinblick auf den autonomen Verkehr der Zukunft wird eine Einrichtung am autonomen Fahrzeug benötigt, die diese Kommunikation übernimmt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Konzeptstudie durchgeführt, die eine cyanfarbige, nach vorne gerichtete Signalleuchte zur Anzeige des Verzichts untersucht.

2 Stand der Forschung

Zur Lösung des Problems, dass der Fahrer zukünftig nicht mehr als Kommunikationspartner für andere, nicht autonome Verkehrsteilnehmer verfügbar ist, gibt es bereits verschiedene Ansätze. Bedingt durch die Tatsache, dass der Mensch 80% der Informationen visuell aufnimmt [12], nutzen diese Ansätze Licht zur Kommunikation und zur Darstellung von Informationen.

Diese Ansätze untersuchen beispielsweise die Wirkung verschiedener Farben einer sogenannten Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human Machine Interface – HMI) auf einen adressierten, menschlichen Empfänger. [13] Im Rahmen der genannten Arbeit liegt der Fokus der Untersuchung auf einem Lichtband, welches an der Front des Fahrzeuges verbaut ist.

Neben der Farbe des Lichtbandes ist die Animation, das heißt die zeitliche und örtliche Modulation der Pixel des Lichtbandes, Bestandteil der Untersuchung. Im Rahmen einer Laborstudie müssen die Probanden die gezeigten Lichtfunktionen auf einer fünfstufigen Likert-Skala [14] anhand einer gegebenen Aussage bewerten. Die Items der Skala sind so gewählt, dass sie die Intuitivität der Lichtfunktion abfragen. Die Aussagen sind in die Kategorien „Absichts- oder Intentionskommunikation“ und „Instruktion“ unterteilt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Farbe der Lichtfunktion die Probanden bei Ihrer Aussage stärker beeinflusst, als die Animation, mit der diese präsentiert wird. Die Farbe Grün wird dabei, unabhängig des Aussagecharakters, als am intuitivsten empfunden, die Farbe Rot als am wenigsten intuitiv. Die Farbe Cyan, welche durch die

SAE J3134 [15] als Farbe zur Kennzeichnung autonom fahrender Fahrzeuge empfohlen wird, wird durch die Probanden als neutral empfunden.

Eine weitere Möglichkeit zur Kommunikation von Informationen ist es, die HMI-Systeme hinsichtlich der Auflösung zu erweitern. Im Folgenden werden zwei Umsetzungen präsentiert, die eine hochaufgelöste Darstellung von Inhalten zur Informationsanzeige ermöglichen.

2.1 Scheinwerferprojektion

Eine bereits ausführlich untersuchte Methode, besteht in der Nutzung eines hochauflösenden Scheinwerfermoduls [16] zur Darstellung projizierter Inhalte auf der Fahrbahn. Die dargestellten Formen auf der Fahrbahn können sowohl als Assistenzfunktion für den Fahrer, als auch zur Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern verwendet werden, zum Beispiel zur Warnung. [3]



Abbildung 1 Darstellung projizierter Symbole direkt vor einem adressierten Empfänger (links) und Symbole auf der Fahrzeugfront zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern (rechts) [4]

Nachteilig an dieser Technologie ist jedoch, dass die Projektion nur bei Dämmerung oder Nacht sichtbar ist und auch Witterung, wie Nebel oder Regen, die Erkennbarkeit der Projektion stark beeinträchtigen. [17]

Eine Möglichkeit, diese Nachteile auszugleichen, besteht in der Verwendung von Displays, die am Fahrzeug montiert sind.

2.2 Display

Mit Displays können ähnliche Inhalte wie mit einer Projektion dargestellt werden. Je nach Technologie sind ausreichend hohe Kontraste erreichbar, sodass die Inhalte durch einen externen Beobachter auch bei Tage erkennbar sind. Displays als HMI wurden ebenfalls schon im Rahmen diverser Experimente untersucht. [4] Es ist fraglich, ob diese hohe Auflösung notwendig ist.

Die Möglichkeiten der Gestaltung sind beinahe grenzenlos. Sichtbarkeit und Wiedererkennungswert der Nachricht wird (neben der Gestaltung) maßgeblich von äußeren Einflüssen bestimmt. So beeinflussen beispielsweise Witterung oder auch verschiedene Tageszeiten und Sonnenstände [17] extrem die Sichtbarkeit von Inhalten auf einem Display. Ein weiteres Problem ist, dass die fortschreitende Automation des Verkehrs eine hohe Dichten an hochaufgelösten HMI-Systemen nach sich zieht, wodurch der Informationsgehalt einer einzelnen Nachricht verloren geht [18].

Unter diesem Aspekt wird im Folgenden ein Konzept für eine Probandenstudie erarbeitet, mit der eine nach vorne gerichtete, cyan-farbige Signalleuchte zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern untersucht werden kann.

3 Entwurf Versuchskonzept

Ausgehend von der Anforderung der StVO, genauer des § 11 Absatz 3, wird eine cyanfarbige Leuchte, im Folgenden die Signalleuchte, betrachtet. Dieser Paragraph fordert den Verzicht auf die eigene Vorfahrt in besonderen Verkehrslagen fordert sowie die Anzeige dieses Verzichts.

Untersucht wird das Szenario einer Fahrbahnüberquerung durch einen Fußgänger. Das AV erkennt diesen sowie dessen Absicht zu Queren und reduziert die Geschwindigkeit bis zum Stillstand. Zur Anzeige dieses Verzichts auf die Vorfahrt soll die Signalleuchte aufleuchten und den Verzicht kommunizieren.

Als Umgebung für diese Konzeptstudie wird ein Rundkurs auf dem Campus Süd des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) verwendet, vgl. Abbildung 2.

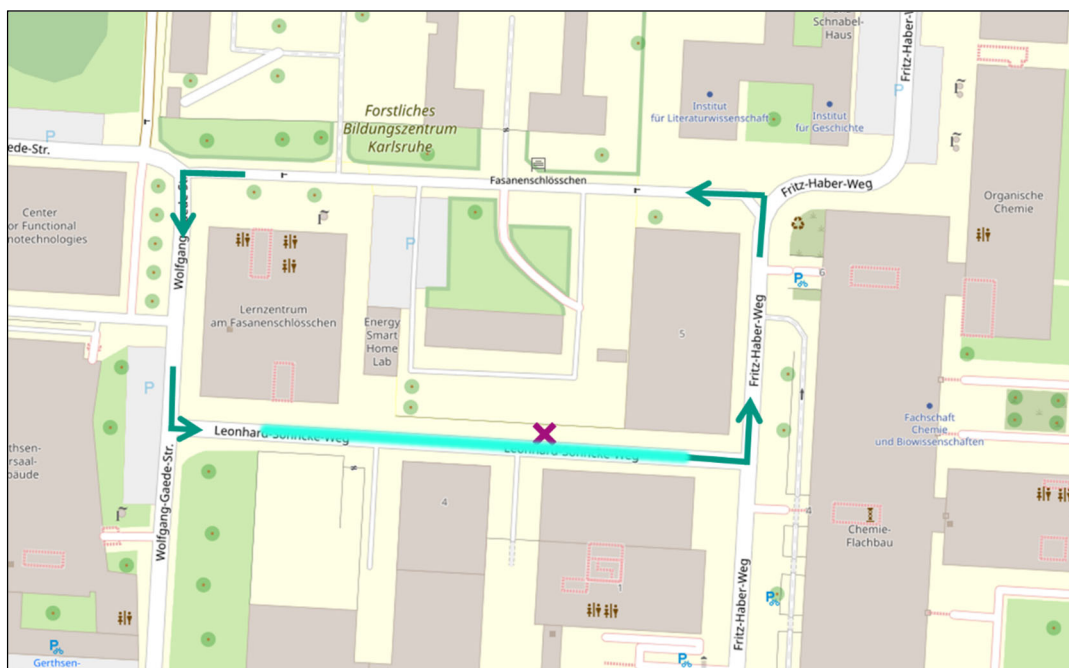


Abbildung 2 Rundkurs auf dem Gelände des Campus Süd des KIT für die Durchführung der Konzeptstudie. Kreuz stellt Position des Probanden dar, cyan-farbige Linie die Strecke, an der die Signalleuchte zugeschaltet wird.

Dies ermöglicht viele Begegnungssituationen nacheinander zu fahren, ohne die Wartezeit für den Probanden zwischen den Abfragen übermäßig zu strecken. Zur weiteren Untersuchung werden zunächst Forschungshypothesen aufgestellt.

3.1 Forschungshypothesen

Da diese Konzeptstudie die Grundlage für eine noch durchzuführende Studie bildet, sind die Forschungshypothesen nicht final formuliert. Die cyan-farbige Leuchte soll in einem späteren Szenario einem anderen Verkehrsteilnehmer im teilautonomen Verkehr einen Verzicht des AVs anzeigen können. Hieraus wird die erste Forschungshypothese als ungerichtete Hypothese wie folgt formuliert:

„Die Probanden überqueren beim Aufleuchten der cyan-farbigen Signalleuchte die Straße“

Es wird zunächst vermutet, dass die Probanden auch ohne vorherige Instruktion den Zusammenhang zwischen „Die Signalleuchte leuchtet“ und „Das Fahrzeug bleibt stehen“ nach kurzer Zeit herstellen können.

Es werden verschiedene Lichtfunktionen auf der Signalleuchte präsentiert. Diese werden in Kapitel 3.2 genauer beschrieben. Ein Einfluss der zeitlichen Modulation auf die Erkennbarkeit führt zur Formulierung der zweiten Forschungshypothese:

„Durch zeitliche Modulation der Lichtfunktion erkennen Probanden diese besser“

Im Folgenden werden die Variablen für die Versuchsdurchführung definiert und beschrieben.

3.2 Definition der Variablen

Für die Durchführung der Studien werden zunächst vier verschiedene Lichtfunktionen ausgewählt. Durch die eingeschränkten Möglichkeiten der Darstellung auf der Signalleuchte ergeben sich folgende Lichtfunktionen, vgl. Abbildung 3.

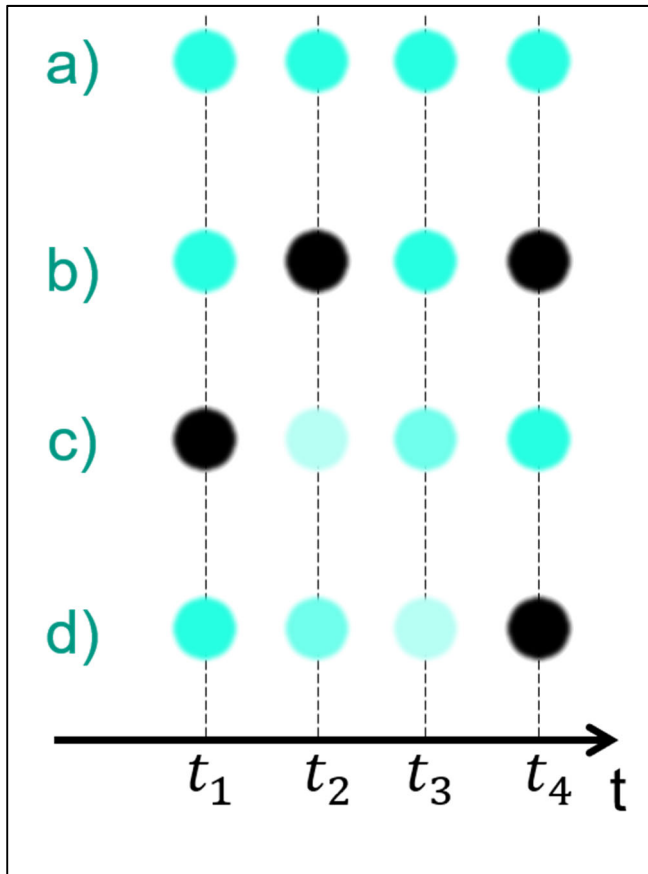


Abbildung 3 Lichtfunktionen der Signalleuchte zur Darstellung während der Studie

Die Lichtfunktionen lassen sich wie folgt hinsichtlich der Ansteuerung beschreiben:

Lichtfunktion a) ist ein dauerhaftes Leuchten der Signalleuchte.

Lichtfunktion b) ist ein konstantes Blinken der Leuchte mit 400 ms ($=2,5$ Hz). Die Schaltflanken sind senkrecht, die Signalleuchte wird mit einem Rechteck-Puls angesteuert.

Lichtfunktion c) ist ein periodisches, lineares Hochdimmen der Signalleuchte von niedrigster zu hellster Helligkeitsstufe. Die Ansteuerung erfolgt über eine Sägezahnfunktion.

Lichtfunktion d) ist ein periodisches, lineares Herunterdimmen der Signalleuchte von höchster zu niedrigster Helligkeitsstufe. Die Ansteuerung erfolgt über eine inverse Sägezahnfunktion.

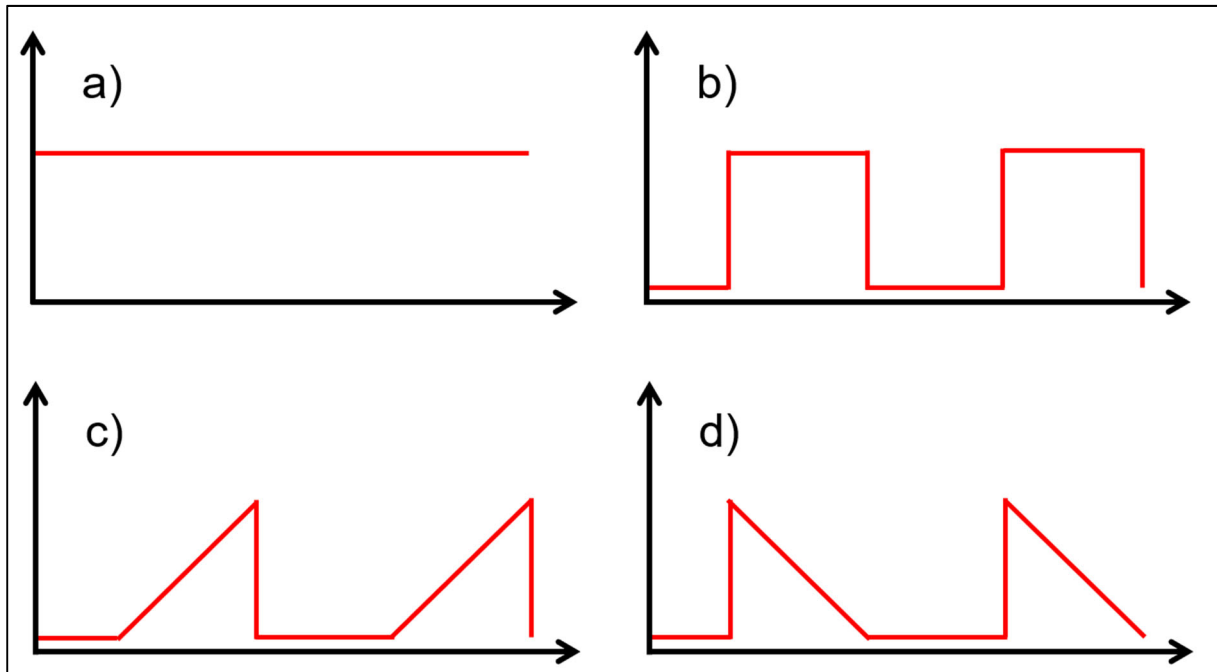


Abbildung 4 Ansteuerfunktionen für die Signalleuchte: a) konstant, b) Rechteck, c) Sägezahn, d) Sägezahn invers

Als Baseline wird eine Fahrt ohne zugeschaltete Signalleuchte verwendet. Somit ergeben sich insgesamt fünf Varianten der Lichtfunktionen zur Untersuchung während der Probandenstudie.

Die Aufgabe des Probanden ist es, während jeder Begegnungssituation mit dem Fahrzeug zu entscheiden, ob er die Straße vor dem autonomen Fahrzeug überqueren würde, oder nicht. Diese Entscheidung wird mündlich dem Versuchsleiter mitgeteilt, der diese notiert. In Kapitel 4 wird erklärt, warum im weiteren Verlauf diese Methode verworfen wird.

Die unterschiedlichen Lichtfunktionen stellen hierbei die unabhängige Variable dar. Die Entscheidung des Probanden zu Querem oder nicht, die abhängige Variable.

3.3 Versuchsablauf

Der Ablauf der Konzeptstudie erfolgt in drei Teilen. Zunächst wird der Proband mündlich über den Ablauf der Studie instruiert und die Aufgabenstellung erklärt. Im folgenden Teil werden dem Probanden 15 randomisierte Begegnungssituationen mit dem autonomen Fahrzeug präsentiert. In diesen ist zu entscheiden, ob die Fahrbahn vor dem Fahrzeug gequert wird oder nicht. Den Abschluss bildet ein Fragebogen mit allgemeinen Fragen zur Thematik autonome Fahrzeuge und Kommunikation im Straßenverkehr.

Insgesamt haben 13 auswertbare Probanden im Alter von 21 bis 31 Jahren an der Studie teilgenommen. Die Durchführung erfolgte während den Mittagsstunden bei Tageslicht und ohne Bewölkung.

Die Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

4 Diskussion

Während der Durchführung der Konzeptstudie ergaben sich mehrere Optimierungsmöglichkeiten.

Bedingt durch die Tatsache, dass die Probanden ihre Entscheidung nur mündlich dem Versuchsleiter mitteilen mussten, wurde die Entscheidung zu queren fast ausschließlich gegeben. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass eine Fehlentscheidung für den Probanden keine Konsequenzen gehabt hätte. Daraufhin wurde die Aufgabenstellung für den Probanden dahingehend geändert, dass die Entscheidung zu queren, durch einen Schritt vom Bürgersteig auf die Fahrbahn, angezeigt werden sollte. Um eine Gefährdung für den Probanden auszuschließen, sollten diese jedoch nicht die Straße vollständig überqueren.

Weiterhin zeigte sich, dass die Probanden sehr schnell verstanden, dass das Fahrzeug in jeder Situation anhalten und sie passieren lassen wird. Zur Behebung dieses Defizits wurde eine weitere Fahrt als Falsch-Positiv hinzugefügt, in der das Fahrzeug nicht anhielt und am Probanden vorbeigefahren ist.

Durch das Feedback der Probanden ergab sich ebenfalls, dass die Lichtfunktionen nicht bereits angeschaltet sein sollen, wenn das Fahrzeug um die Kurve kommt und für den Probanden sichtbar wird. Ein Vorschlag war, diese erst dann zuzuschalten, wenn das Fahrzeug beginnt abzubremsen. Diese Änderung des Status der Leuchte bewirkt, dass die Probanden die Lichtfunktionen besser wahrnehmen.

Der abschließende Fragebogen enthielt auch die Frage, wie viele verschiedene Lichtfunktionen die Probanden erkennen konnten. Ein Großteil der Probanden konnte nicht mehr als zwei verschiedene Lichtfunktionen unterscheiden, nämlich *statisch* und *blinkend*.

Für die Durchführung einer Probandenstudie, zur Untersuchung einer cyan-farbigem Signalleuchte, ergeben sich somit folgende Punkte, die dringend zu beachten sind:

1. Anheben der Hemmschwelle für die Entscheidung. Anzeige der Entscheidung durch aktive Handlung, bspw. Schritt auf die Fahrbahn
2. Einfügen einer Falsch-Positiv Fahrt
3. Statusänderung des Fahrzeuges (Beginn des Verzögerungsvorgangs) soll durch Statusänderung bei Lichtfunktion angezeigt werden
4. Unterscheidung zwischen zwei Lichtfunktionen: Statisch und Dynamisch

Die durch die Probanden genannten Störeinflüsse, wie Ablenkung oder Verdeckung des Versuchsfahrzeuges durch andere Verkehrsteilnehmer können in der Hauptstudie durch eine abgesperrte Versuchsstrecke beseitigt werden.

5 Zusammenfassung

Ziel dieser Konzeptstudie ist die Erarbeitung eines funktionalen Versuchskonzeptes, welches zur Untersuchung der cyan-farbigen Signalleuchte geeignet ist. Es hat sich gezeigt, dass Störgrößen die Entscheidung der Probanden beeinflussen und diese maßgeblich von der Gestaltung der Aufgabe für den Probanden abhängig ist.

Es hat sich außerdem gezeigt, dass die Probanden schnell den Zusammenhang erfassen konnten, dass das Fahrzeug auf die Vorfahrt verzichtet und beginnt zu verzögern, sobald die Signalleuchte zugeschaltet wird.

Ebenfalls soll zukünftig die Dauer zwischen der Anzeige der Lichtfunktion und der Entscheidung des Probanden zu Queren gemessen und als unabhängige Variable genutzt werden. So lassen sich Unterschiede zwischen den Lichtfunktionen genauer quantifizieren.

Auch eine Durchführung der Studie bei Dämmerung oder in den Nachtstunden kann neue Erkenntnisse hinsichtlich der Verwendung der Signalleuchte zur Nutzung als Verzichtsanzeige liefern.

Auf dieser Grundlage lassen sich weitere Untersuchungen durchführen, um die Parameter zur Nutzung der Signalleuchte auch in weiteren Situationen zu beschreiben.

Diese Arbeit wurde finanziert durch das BMWI geförderte Projekt „INITIATIVE“ mit dem Förderkennzeichen 19A21008D.

6 Literaturangaben

- [1] interACT project: Home, 2022. <https://www.interact-roadautomation.eu/>, abgerufen am: 25.05.2022
- [2] @city: @CITY | Automatisiertes Fahren in der Stadt | Home, 2022. <https://www.atcity-online.de/>, abgerufen am: 25.05.2022
- [3] Budanow, M. u. Neumann, C.: Road projections as a new and intuitively understandable human-machine interface. *Advanced Optical Technologies* 8 (2019) 1, S. 77–84
- [4] Reschke, J., Auburger, M.-T., Marichalar, R. u. Neumann, C.: Kommunikation zwischen automatisierten Fahrzeugen und Fußgängern
- [5] Baumann, M., Helmer, M. u. Neumann, C.: Lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Fußgänger im automatisierten Straßenverkehr: Was muss sie leisten und wie könnte sie aussehen? 15. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, 04. – 06. Juni 2021, . Tagungsband. Ilmenau Media Services 2021 - 2021

- [6] SAE International: SAE Levels of Driving Automation™ Refined for Clarity and International Audience, 2021. <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>, abgerufen am: 12.04.2022
- [7] Imbsweiler, J., Ruesch, M., Heine, T., Linstedt, K., Weinreuter, H., Puente León, F. u. Deml, B.: Die Rolle der expliziten Kommunikation im Straßenverkehr. Arbeit(s).Wissen.Schaf(f)t - Grundlagen für Management & Kompetenzentwicklung. Tagungsband 64. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. 2018
- [8] Merten, K.: Kommunikation. Eine Begriffs- und Prozeßanalyse. Studien zur Sozialwissenschaft, Bd. 35. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften; Imprint 1977
- [9] BAUER, T. H., RISSER, R., SOCHE, P., TESKE, W. u. VAUGHAN, C. H.: KOMMUNIKATION IM STRASSENVERKEHR (1. ZWISCHENBERICHT). LITERATURSTUDIE AUS JURISTISCHEM, KOMMUNIKATIONSTHEORETISCHEM UND PSYCHOLOGISCHEM BLICKWINKEL. 1980
- [10] Risser, R.: Behavior in traffic conflict situations. Accident Analysis & Prevention 17 (1985) 2, S. 179–197
- [11] § 11 StVO 2013 - Einzelnorm, 2022. https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/__11.html, abgerufen am: 14.04.2022
- [12] Becker, M. E.: Displaytechnik I. Vorlesungsskript. 2014
- [13] Dey, D., Habibovic, A., Pfleging, B., Martens, M. u. Terken, J.: Color and Animation Preferences for a Light Band eHMI in Interactions Between Automated Vehicles and Pedestrians. Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: ACM 04212020, S. 1–13
- [14] Rost, J.: Lehrbuch Testtheorie Testkonstruktion. Psychologie Lehrbuch. Bern, Göttingen: Huber; Hogrefe 1996
- [15] SAE International: J3134: Surface Vehicle Recommended Practice - Automated Driving System (ADS) Marker Lamp(s).
- [16] HELLA: Unser Digital Light SSL | HD-Lichtsystem: ein neuer Meilenstein der automobilen Lichttechnik | HELLA, 2019. <https://www.hella.com/techworld/de/Lounge/Unser-Digital-Light-SSL-HD-Lichtsystem-ein-neuer-Meilenstein-der-automobilen-Lichttechnik-55548/>, abgerufen am: 12.06.2023
- [17] Baumann, M., Trampert, K., Helmer, M. u. Neumann, C.: Lichtbasierte Kommunikation im autonomen Mischverkehr. In:

- [18] Baumann, M., Trampert, K., Helmer, M. u. Neumann, C.: Lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle zwischen automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern. In:

Simulative Development of the Electronic Component of Mössbauer Spectroscopy with a Focus on the Controllability of a 2nd Order Transimpedance Amplifier

M.Beyki^{1,2,*}, J.Pawlak^{1,*}, R.Patzke², and F.Renz¹

¹Institute of Inorganic Chemistry, Leibniz University Hanover, Callinstraße 9, D-30167 Hanover, Germany

²Faculty I – Electrical Engineering and Information Technology, Hanover University of Applied Sciences and Arts, Ricklinger Stadtweg 120, D-30459 Hanover, Germany

*mohammad.beyki@hs-hannover.de, franz.renz@acd.uni-hannover.de

Keywords: Transimpedance Amplifier, Photodiode Amplifier, light processing systems

Topic: Mössbauer spectroscopy electronic signal amplifier, Transimpedance Amplifier

Abstract

In light-processing systems, light energy is converted into a photocurrent due to the photoelectric effect. This project focuses on the development of a high-precision energy-to-voltage conversion technique to optimize signal processing in light-processing systems, specifically for applications in space analytics or solid state physics, such as Mössbauer spectroscopy. Analog circuit development plays a vital role as downstream voltage conversion is necessary for signal processing. The objective is to enhance the signal quality and improve the signal-to-noise ratio through the design, optimization, and comparison of various circuits for voltage conversion. The development process involves the design and optimization of amplifier circuits, supplemented with the incorporation of filters and/or regulators for further improvement. A transimpedance amplifier is approximated as a second-order low-pass filter, while a state controller is designed and analyzed to efficient transient oscillation of the system towards optimal amplitude values for subsequent signal processing. The project's results contribute to the advancement of light-processing systems, enabling more precise analysis of light energy in Mössbauer spectroscopy. The findings are presented in a series of scientific publications, showcasing the effectiveness of the developed circuits and their impact on signal quality. Future work could focus on further optimization and validation of the circuits in real-world applications to confirm their performance and reliability. Overall, this project emphasizes the significance of meticulous circuit development and optimization for enhancing signal processing in light-processing systems, thus supporting their application in space analytics.

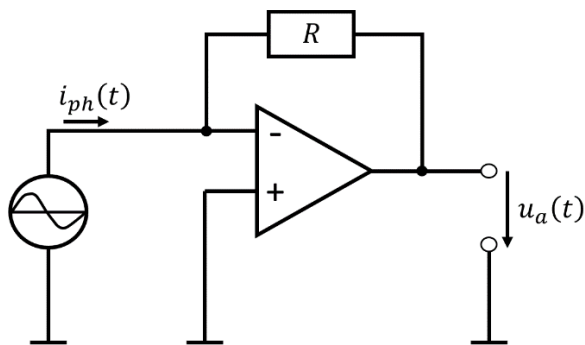


1 Introduction

As extraterrestrial application, the miniaturized Mössbauer spectrometer MIMOS II was very successful on the planet Mars as part of the NASA Mars exploration rover mission Spirit and Opportunity, as IDD payload. “Mössbauer spectra measured on Mars by the Spirit rover during the primary mission are characterized by two ferrous iron doublets (olivine and probably pyroxene) [...]” “The ubiquitous presence of olivine in soil suggests that physical rather than chemical weathering processes currently dominate at Gusev crater.” [1]. For this reason the MIMOS II (miniaturized Mössbauer spectrometer) serves as a proven and reliable measuring instrument [2][3]. Detected gamma rays are converted into a current pulse by a PIN diode and converted into a usable output voltage via an amplifier board located behind it [2][3]. MIMOS originally devised by Göstar Klingelhöfer, is further developed by the Renz group at the Leibniz University Hanover in cooperation with the Hanover University of Applied Sciences and Arts [2][4]. In this context here, the transmission behavior of the initially simulated amplifier circuit is to be determined. It serves as a basis for a later control, with which the circuit is to be improved regarding its dynamics [4]. A special focus is placed on the operational amplifier in the circuit analysis [4][5]. This is examined with regard to its amplification characteristics [4].

2 The Amplifier

A transimpedance amplifier (TIA) is an electronic circuit which converts the input current, the so-called photocurrent $i_{ph}(t)$, into an output voltage $u_a(t)$ is converted. In principle, a linear relationship between $i_{ph}(t)$ and $u_a(t)$ is assumed [5][6][7].



- $i_{ph}(t)$: Photocurrent
- $u_a(t)$: Output Voltage
- R : Negative feedback resistor

Figure 1: Basic presentation of a Transimpedance Amplifier

$$\underline{U}_a(j\omega) = -R \cdot \underline{I}_{ph}(j\omega) \quad (2.1)$$

2.1 First Order TIA

The transimpedance amplifier is already known from previous publications. So far, the system description is available in the Fourier or Laplace domain as a low-pass filter of first and second order [4][5][6]. Figure 2 shows the previously published version of the extended 1st order transimpedance amplifier [4][6]. It must be mentioned here that the input impedance $\underline{Z}_{in}(j\omega)$, the maximum open-circuit voltage gain A_0 and the transit frequency f_T of the amplifier must be infinitely high in order to create the optimal conditions for the previous mathematical description. In application, however, it turns out that often a parallel capacitor C to the negative feedback resistor R has to filter out high frequency components. This results in a low-pass characteristic, which can be described [5][6][7]:

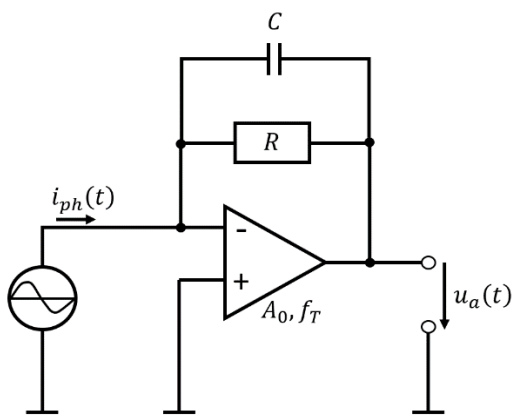


Figure 2: TIA with capacitive feedback

- $i_{ph}(t)$: Photocurrent
- $u_a(t)$: Output Voltage
- R : Negative feedback resistor
- C : Parallel capacitance
- f_T : Transit frequency
- A_0 : Maximum open circuit voltage gain of the TIA

$$\underline{U}_a(j\omega) = \frac{-R}{1 + j\omega RC} \cdot \underline{I}_{ph}(j\omega) \quad (2.2)$$

In order to create a better overview with regard to the mathematical modeling, the Fourier representation is changed to the Laplacian representation.

$$U_a(s) = \frac{-R}{1 + s \cdot RC} \cdot I_{ph}(s) \quad (2.3)$$

Since only the transmission behavior is relevant, now follows a transition in the required mathematical direction:

$$G(s) = \frac{U_a(s)}{I_{ph}(s)} = \frac{-R}{1 + s \cdot RC} \quad (2.4)$$

2.2 Second Order TIA

Figure 3 shows an extension of the previous circuits of the TIA to extend the system order of the mathematical description of the transmission behavior to $n = 2$

[4][5][6][7].

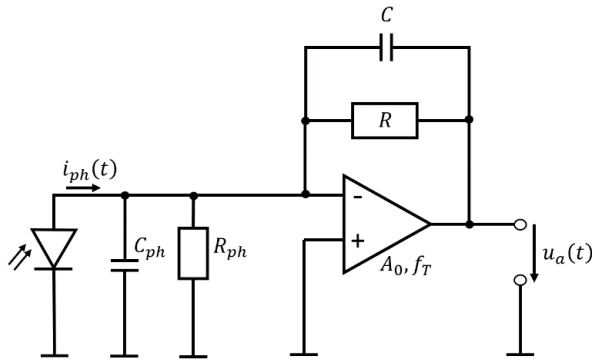


Figure 3: Transimpedance Amplifier for 2nd Order Description

- $i_{ph}(t)$: Photocurrent
- $u_a(t)$: Output Voltage
- R : Negative feedback resistor
- C : Parallel capacitance
- f_T : Transit frequency
- A_0 : Maximum open circuit voltage gain of the TIA
- C_{ph} : Parallel capacitance of the diode
- R_{ph} : Parallel resistance of the diode

$$G(s) = \frac{U_a(s)}{I_{ph}(s)} \approx \frac{K_P \cdot (\omega_0)^2}{s^2 + 2 \cdot D \cdot \omega_0 \cdot s + (\omega_0)^2} \quad (2.5)$$

$$\ddot{u}_a(t) + 2 \cdot D \cdot \omega_0 \cdot \dot{u}_a(t) + (\omega_0)^2 \cdot u_a(t) = K_P \cdot (\omega_0)^2 \cdot i_{ph}(t) \quad (2.6)$$

The step response of the system is shown in figure 4.

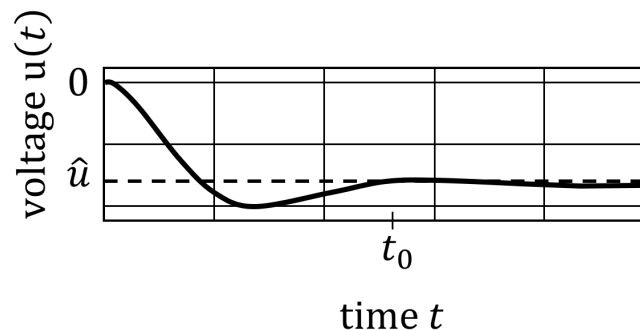


Figure 4: Step Response of the System

3 State Space Description

In the state space, stability and controllability can each be studied independently and a state controller can be designed. Unlike conventional controllers, which can only take a single signal variable to influence the output of a system, state controllers are used to influence the output of a system and to utilize multiple state variables in the signal recording for this purpose. That is, if the distance y is to be influenced, both distance values and velocity values are used for the controller design. This increases the possibility of the influence enormously and leads with suitable execution of the method to a better result in relation to the control [4][9][10].

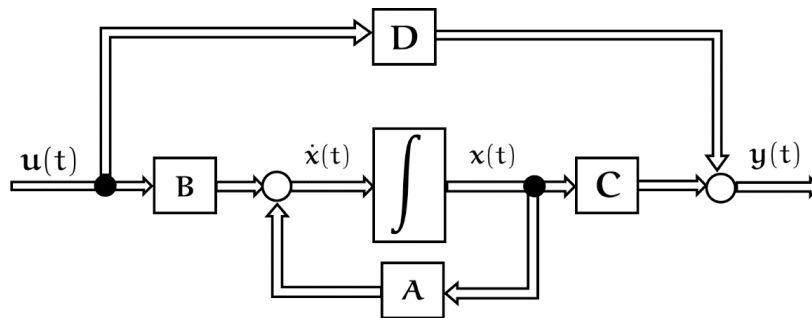


Figure 5: Standardized Blockdiagram of the State Space Description

Figure 5 shows a standardized block diagram of a system in the state space. In order to specify a system in the state space, we first define the states and inputs of the system are defined. The states x_i are summarized in the state vector $x(t)$ and the inputs u_i in the input vector $u(t)$ [4][9][10].

$$x(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad u(t) = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix}$$

The relationship between the states and the inputs is:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (3.1)$$

The outputs are specified as follows:

$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t) \quad (3.2)$$

The system matrix A can take many different forms, the only important thing is that the correlation information between the differentiations \dot{x}_i and the non-differential states x_i are in a unique relationship and the influence of the inputs u_i is represented by means of the input matrix B which adjusts in each case. The outputs y_i are defined by the output state matrix C and the direct relationship between inputs u_i and outputs y_i D [4].

$$u_a = x_1, \quad \dot{x}_1 = x_2$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\omega_0)^2 & -2 \cdot D \cdot \omega_0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_P \cdot (\omega_0)^2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{c}^T = [0 \quad 1] \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\omega_0)^2 & -2 \cdot D \cdot \omega_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_P \cdot (\omega_0)^2 \end{bmatrix} \cdot u(t) \quad (3.6)$$

$$y(t) = [0 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.1 Stability and Controllability in the State Space

The stability and controllability of a system are basic requirements for good control. For this reason, both aspects of a system must be illuminated in each case. First, the stability of the system is considered in more detail and set up for each state. This is followed by a controllability analysis, also related to each individual state. Only after these investigations a controller design can be made and the state controller \mathbf{K} be determined so that each state can be controlled and so each eigenvalue shifted to a favourable position.

3.1.1 Stability in the State Space

The stability of the system is defined by the eigenvalues λ_i of the system matrix \mathbf{A} . If these eigenvalues all have a negative real part, the system is stable [8][9][10].

$$\operatorname{Re}\{\lambda_i\} < 0, \quad i = 1, \dots, n$$

If almost all eigenvalues are in the left half plane and one eigenvalue is on the imaginary axis, the system is limit stable.

$$\operatorname{Re}\{\lambda_i\} < 0, \quad i = 1, \dots, n - 1, \quad \operatorname{Re}\{\lambda_n\} = 0$$

All other cases indicate an unstable system.

$$\det(\lambda \cdot \mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0$$

$$\begin{vmatrix} \lambda & -1 \\ (\omega_0)^2 & \lambda + 2D\omega_0 \end{vmatrix} = \lambda^2 + 2D\omega_0\lambda + (\omega_0)^2 = 0 \quad (3.8)$$

$$\lambda_{1,2} = -D\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{D^2 - 1} = -D\omega_0 \pm j\omega_0\sqrt{1 - D^2} \quad (3.9)$$

$$\lambda_{1,2} = \delta \pm j\omega_d \quad (3.10)$$

$$\delta = -D\omega_0 \quad (3.11)$$

$$\omega_d = \omega_0\sqrt{1 - D^2} \quad (3.12)$$

Due to the fact that the real part of the eigenvalues λ_i is negative

$$\operatorname{Re}\{\lambda_i\} = \delta = -D\omega_0 < 0, \quad \{D, \omega_0\} > 0,$$

it is a fully stable system.

3.1.2 Controllability in the State Space

The controllability of a system is defined by the controllability matrix \mathbf{Q}_S . If this matrix has full rank, controllability exists. Alternatively, the determinant of the controllability matrix can be formed for quadratic matrices [4][9][10].

$$\mathbf{Q}_S = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1} \cdot \mathbf{B}] \quad (3.13)$$

$$\operatorname{rank}(\mathbf{Q}_S) = n, \quad \det(\mathbf{Q}_S) \neq 0$$

n indicates the system order and is thus to be taken as an indicator of full rank.

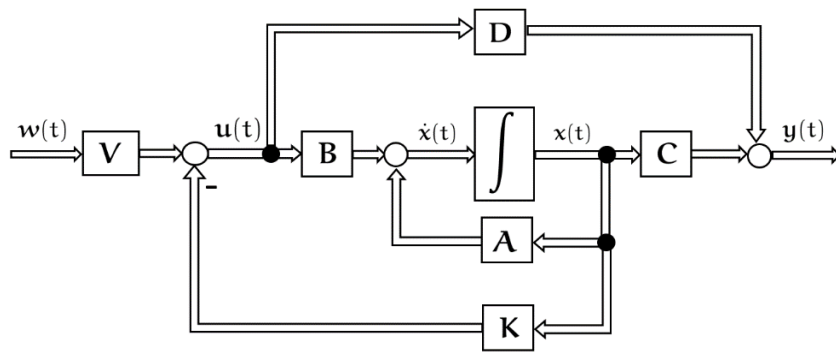
$$\mathbf{Q}_S = \begin{bmatrix} 0 & K_P \cdot (\omega_0)^2 \\ K_P \cdot (\omega_0)^2 & -2 \cdot D \cdot (\omega_0)^3 \cdot K_P \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\det(\mathbf{Q}_S) = [-(K_P \cdot \omega_0^2)^2] \neq 0 \quad (3.14)$$

Since each state x_i is controllable, there is complete controllability of the entire system, so that by means of a state controller \mathbf{K} each eigenvalue of the system can be shifted to a position favourable for operational purposes. For this reason, the state controller \mathbf{K} is designed in the next section. The method of Ackermann is used to achieve a system speed and accuracy that is favorable for operational purposes.

4 The Controller

The state space model or description of the system (fig. 4) opens up a whole range of further and, above all, multidimensional control options. The state controller \mathbf{K} feeds back each state under scalar change and in this way it shifts the eigenvalues of the system (fig. 6).

Figure 6: State Space Model and State Controller \mathbf{K}

4.1 Ackermann Method

In the continuous case, Ackermann's pole specification is used to determine a feedback vector \mathbf{k}^T in the state space. For this purpose, in the first step a controllability analysis as in the previous section has to be done. Usually the determinant of the controllability matrix \mathbf{Q}_S according to Kalman is sufficient. Since the system has only one input signal, it is sufficient to design \mathbf{K} as a singlerow control vector $\mathbf{K} \rightarrow \mathbf{k}^T$ and \mathbf{V} becomes a scalar value $\mathbf{V} \rightarrow v$. The feed forward control v of the system is used to scale the output signal as desired. Mostly v is used to normalize the step response of the controlled system to the value one. Using Ackermann's method, new poles $\tilde{s}_{p,i}$ can be specified for the system dynamics of the controlled system. [9][10].

$$\prod_{i=1}^n (s - \tilde{s}_{p,i}) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot s + \alpha_2 \cdot s^2 + \dots + \alpha_{n-1} \cdot s^{n-1} + s^n \quad (4.1)$$

$$\mathbf{Q}_S = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1} \cdot \mathbf{B}] \quad (3.13)$$

$$\mathbf{t}_1^T = [0 \quad \dots \quad 0 \quad 1] \cdot \mathbf{Q}_S^{-1} = [\mathbf{0} \quad 1] \cdot \mathbf{Q}_S^{-1} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{P}_\alpha(\mathbf{A}) = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k \cdot \mathbf{A}^k = \alpha_0 \cdot \mathbf{I} + \alpha_1 \cdot \mathbf{A}^1 + \dots + \alpha_{n-1} \cdot \mathbf{A}^{n-1} + \mathbf{A}^n \quad (4.3)$$

$$\mathbf{k}^T = \mathbf{t}_1^T \cdot \mathbf{P}_\alpha(\mathbf{A}) \quad (4.4)$$

$$v = [\mathbf{c}^T \cdot (\mathbf{b} \cdot \mathbf{k}^T - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{b}]^{-1} \quad (4.5)$$

n denotes the system order. $\mathbf{P}_\alpha(\mathbf{A})$ carries in the form of α_i the coefficients of the corresponding new characteristic polynomial function together with new pole specification of the system.

4.2 Controller

Applied to the second order system under consideration, it follows:

$$\mathbf{Q}_S^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_P \cdot (\omega_0)^2} & * \\ 0 & * \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{t}_1^T = [\mathbf{0} \quad 1] \cdot \mathbf{Q}_S^{-1} = \left[\frac{1}{K_P \cdot (\omega_0)^2} \quad 0 \right] \quad (4.7)$$

The matrix $\mathbf{P}_\alpha(\mathbf{A})$ carries the information of the new poles and has to be chosen carefully. In the considered case there is a 2nd order system and only two new poles can be chosen.

$$\begin{aligned} (s - \tilde{s}_{p,1}) \cdot (s - \tilde{s}_{p,2}) &= s^2 - (\tilde{s}_{p,1} + \tilde{s}_{p,2}) \cdot s + \tilde{s}_{p,1} \cdot \tilde{s}_{p,2} \\ &= s^2 + \alpha_1 \cdot s + \alpha_0 \\ \alpha_0 &= \tilde{s}_{p,1} \cdot \tilde{s}_{p,2}, \quad \alpha_1 = -(\tilde{s}_{p,1} + \tilde{s}_{p,2}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

For the controller, therefore, the following description results for the case under consideration:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}^T &= \mathbf{t}_1^T \cdot \mathbf{P}_\alpha(\mathbf{A}) = \alpha_0 \cdot \mathbf{I} + \alpha_1 \cdot \mathbf{A}^1 + \mathbf{A}^2 \\ &= \tilde{s}_{p,1} \cdot \tilde{s}_{p,2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - (\tilde{s}_{p,1} + \tilde{s}_{p,2}) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\omega_0)^2 & -2 \cdot D \cdot \omega_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\omega_0)^2 & -2 \cdot D \cdot \omega_0 \end{bmatrix}^2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

At this point it is only clear that the new poles must lie on the left side of the complex Laplace plane, otherwise there is no stability. Now it must be decided according to the further application how the exact position of the poles has to be chosen. If the system is to react as fast as possible, a slight overshoot must be expected. If it is not allowed to oscillate, the poles have to be selected differently and may lead to greater delays. Furthermore, the exact dimensioning depends on how much leeway the real implementation offers. For example, capacitors must be selected for any feedbacks. These limit the mathematically possible range on their practicability and lead thereby to deviations from the exactly calculated values of the new poles – it must be urgently paid attention to tolerances. A further influencing factor is the signal noise and can also lead to a strong shift of the poles in case of a rough deviation, sometimes also to instabilities.

The choice of the correct pole position is selected at this point according to how the previous poles are already positioned and how much faster the new system response must look in relation to them. The old response is shown in figure 7.

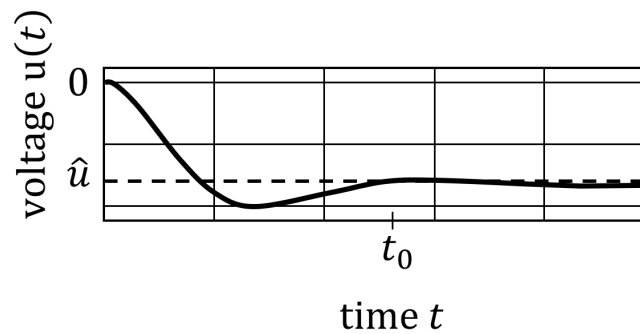


Figure 7: Step Response of the System

In terms of unregulated system response, the new poles are selected so that the system response requires only 57 percent of the old settling time.

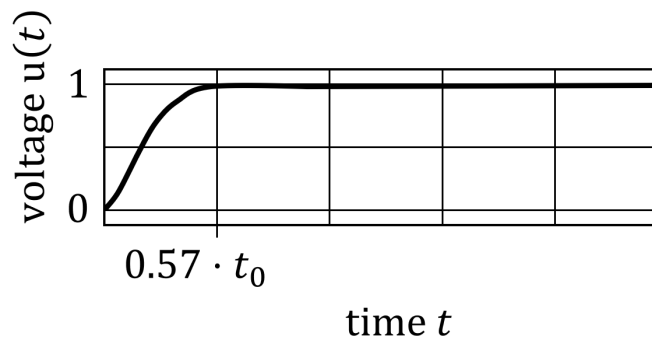


Figure 8: Step Response of the Controlled System

5 Conclusion

In conclusion, this project aimed to develop a high-precision energy-to-voltage conversion technique to enhance signal processing in light-processing systems, specifically for applications in space analytics, such as Mössbauer spectroscopy. Analog circuit development played a crucial role as signal processing could only be performed after downstream voltage conversion. The development primarily focused on amplifier circuits, with the addition of filters and/or regulators for optimization. These enhancements resulted in a significant improvement in the signal-to-noise ratio and overall signal quality. Furthermore, a transimpedance amplifier was approximated as a second-order low-pass filter, while a state controller was specifically designed and further analyzed. The state controller proved instrumental in achieving the system's precise and efficient oscillation towards optimal amplitude values for subsequent signal processing. The outcomes of this project contribute to advancing the performance of light-processing systems and enable more accurate analysis of light energy in Mössbauer spectroscopy. Future work could focus on further optimizing the developed circuits and validating their performance and reliability in real-world applications. Overall, this project underscores the importance of careful circuit development and optimization in improving signal processing quality in light-processing systems, thereby supporting their applications in space analytics.

Acknowledgements

The authors would like to thank Hannover School for Nanotechnology (hsn) Leibniz University Hannover (LUH) Laboratory of Nanotechnology and Quantum Engineering (LNQE), Hanover University of Applied Sciences and Arts (HsH) and the UMB-II project.

References

- [1] R. V. Morris, G. Klingelhöfer, B. Bernhart, C. Schröder, D. S. Rodionov, P. A. de Souza, JR., A. Yen, R. Gellert, E. N. Evlanov, J. Foh, E. Kankeleit, P. Gütlich, D. W. Ming, F. Renz, T. Wdowiak, S. W. Squyres, and R. E. Arvidson; SCIENCE ,6 Aug 2004, Vol 305, Issue 5685, pp. 833-836
- [2] M. Blumers, B. Bernhardt, P. Lechner, G. Klingelhöfer, C. d'Uston, H. Soltau, L. Strüder, R. Eckerhardt, J. Brückner, H. Henkel, J.G. Lopez, J. Maul, 'The miniaturised Mössbauer spectrometer MIMOS II A: Increased sensitivity and new capability for element analysis', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 624 (2010) 277–281, journalhomepage: www.elsevier.com/locate/nima, 2010
- [3] G. Klingelhöfer, B. Fegley, R.V. Morris, E. Kankeleit, P. Held, E. Evlanov, O. Priloutskii, Planetary and Space Science, 44, 11, 1277-1288 (1996).
- [4] M. Beyki, J. Pawlak, R. Patzke, F. Renz, 'Simulation of the electronic part of Mössbauer spectroscopy', Proceedings of the 2nd OPU-HsH Japanese-German Symposium 2023: Industry 4.0 and Society 5.0 for Smart Society, DOI: <https://doi.org/10.25968/opus-2459>, 2023
- [5] B. Razavi, 'A CIRCUIT FOR ALL SEASONS – The Transimpedance Amplifier', University of California Los Angeles 2019, Los Angeles, USA, http://www.seas.ucla.edu/brweb/papers/Journals/BR_SSCM_1_2019.pdf
- [6] X. Ramus, 'Transimpedance Considerations for High-Speed Amplifiers', Texas Instruments: Application Report – SBOA122 November 2009, <https://www.ti.com/lit/an/sboa122/sboa122.pdf>, 2009
- [7] R. Patzke, 'Schnelle und rauscharme Photonenmessung mit pin-Fotodioden', Hochschule Hannover – University of Applied Sciences and Arts, Fachgebiet Integrierte Schaltungen und Eingebettete Systeme (IES), DOI: <https://doi.org/10.25968/opus-2315>, 31/July/2022
- [8] M. Beyki, R. Kutzner, U. Lindemann, 'Systemtheorie & Optimale Regelung – Teil I Einführung in den Zustandsraum', 1st edition, Hochschule Hannover – University of Applied Sciences and Arts, DOI: <https://doi.org/10.25968/opus-2441>, 2023.

- [9] M. Beyki, R. Kutzner, U. Lindemann, 'Systemtheorie & Optimale Regelung – Teil V Zustandsregelung', 1st edition, Hochschule Hannover – University of Applied Sciences and Arts, DOI: <https://doi.org/10.25968/opus-2442>, 2023.
- [10] O. Föllinger, U. Konigorski, B. Lohmann, G. Roppenecker, A. Trächtler, 'Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung', 13th edition, VDE VERLAG GMBH, 2022, p. 168 – 188.

Detection of stroboscopic effects in dependence of duty cycle, speed and illuminance level

Tianshu Chen, M.Sc., Dr.-Ing. Alexander Herzog, Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh;

Technische Universität Darmstadt, Laboratory of Adaptive Lighting Systems and Visual Processing, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

chen@lichttechnik.tu-darmstadt.de

Abstract

Light-emitting diodes (LEDs) that are dimmed by pulse width modulation (PWM) may cause visually uncomfortable stroboscopic effects due to improper selection of operating parameters. Therefore, it is important to understand that the visibility of the stroboscopic effect depends on parameters such as duty cycle, speed, and illuminance level.

These dependencies were analysed by using a LED light source illuminating a black-coated rotating disk with a white dot mounted on top of it. Modulating the light source with a square wave signal between 100 Hz and 4200 Hz and different duty cycles (10%, 30%, 50%, 70%, 80%), allowed us to determine the subject's visibility of the stroboscopic effect for different rotation speeds (2m/s, 4m/s, 6m/s) and illuminance levels (100lx, 500lx, 1000lx).

Based on the results of these experiments, objective models were developed, which can be used to increase the accuracy and validity of the stroboscopic visibility measure, and effectively reduce the stroboscopic effects.

Index Terms: LEDs, PWM, stroboscopic effects



1 Introduction

Light-emitting diodes (LEDs) provide longer working lifespans and lower power efficiency compared with other types of lamps (e.g., incandescent, fluorescent, and high-intensity discharge lamps). LEDs offer several advantages, one of which is their ability to respond quickly to changes in the driving current. This attribute renders them highly suitable for pulse width modulation (PWM), enabling the rapid switching on and off of the digital signal to emulate diverse voltages. PWM is a widely adopted technique for dimming LEDs. In contrast to constant current dimming, the chromaticity shift caused by PWM dimming is visually unnoticeable.

However, LED lighting raises certain concerns one of which is called temporal artefacts (TLAs), such as flicker or the stroboscopic effect, resulting in unwanted visual discomfort in the presence of fast eye or object movements and possible negative health effects [1]. Firstly, there are the immediate results of a few seconds' exposure to TLAs, it can cause epileptic-sensitive photo spasms in various forms depending on the individual and its visual pathology, contrast, wavelength, and point of view or distance [2]. These symptoms are mostly associated with flickers in the frequency range between 3-100Hz [3]. Secondly, less obvious symptoms resulting from long-term exposure can occur, e.g., malaise, headaches, migraines, and impaired visual performance [4]. These symptoms are primarily associated with light modulations at higher frequencies (more than 100Hz) [5,6]. Most humans do not see Flicker exceeding 100Hz [7] but Berman et al. reported that flicker is transmitted through the retina up to 200Hz [8]. Flicker can occur because of 50Hz (in Europe, Asia, Africa, and Australia) or 60Hz (largely in the Americas) alternating current (AC) power line frequencies [9]. Therefore, to make the flicker imperceptible to the human visual system, high-frequency driving circuits such as electronic ballasts are used. Increasing the frequency of the driving circuit reduces the likelihood of visual artefacts being observed. However, high-frequency power supplies are generally more complex and expensive to produce, especially when low light levels are desired. In addition, high PWM frequencies may cause electromagnetic interference problems for surrounding electronic devices. Therefore, to reduce any potential negative health effects associated with LED lighting systems, it becomes crucial to gain a better understanding of the occurrence and visibility of temporal artefacts.

This paper begins by briefly reviewing the existing literature on the perception of Temporal Light Artefacts. Then, it introduces three perception experiments on the visibility of the stroboscopic effect. Based on the results of these experiments, objective models were developed, allowing us to predict the visibility of the stroboscopic effect for temporally modulated light sources under different situations.

2 Literature Overview

Flicker, stroboscopic effects and Phantom arrays are some of the well-known effects of Temporal Light Artefacts (TLAs). Flicker is a phenomenon that is defined as a visible

change in the brightness or color of a light source due to rapid fluctuations in the operating parameters. Flicker visibility has been studied extensively and it depends on many parameters (e.g., frequency and modulation depth) [10]. The acceptable level of flicker is defined by The Illuminating Engineering Society of North America, named Flicker Index (FI) [11]. It can vary between 0 and 1 and it is suggested to use systems that produce light with Flicker Index of 0.1 or less [11]. The Flicker Index is given by:

$$FI = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \quad (1)$$

The area A_1 and the total area $A_1 + A_2$ are defined as shown in Figure 1. Another commonly used metric to evaluate flicker is the Flicker Percent [12,13]. It is also known as the modulation depth (MD) being defined as:

$$MD = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (2)$$

L_{max} and L_{min} are the maximum and minimum luminance during one period. Both quantities are given by equations (1) and (2), respectively, and can be used to predict flicker visibility.

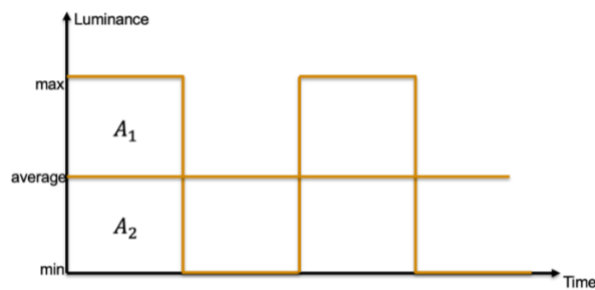


Figure 1. Illustration of the PWM dimming process

In contrast to flicker, the stroboscopic effect occurs with moving objects. The observer does not perceive a uniform motion of the object, but simultaneously several spatially delimited (discrete) images. Frier and Henderson [14] performed an experiment and observed that the visibility of the stroboscopic effect depends on the amplitude of the modulation in the light output. However, only qualitative observations, precise visibility measurements were not performed. Basically, there are different parameters that influence the cut-off frequency at which the effect is still perceptible. In 2011, Bullough et al. [5] concluded from their experiments with 50-120Hz that the perception of the effect depended not only on the frequency but also on the modulation depth and the duty cycle. Vogels et al. [15] studied its visibility threshold in terms of modulation depth using square waveforms with varying frequencies (50Hz, 100Hz, 200Hz, 400Hz). The visibility of the stroboscopic effect was confirmed to depend on the frequency and duty cycle of the square wave signal and on the speed of the rotating disk. Moreover, they indicated that the Flicker Index didn't account for the effect of frequency, so it was not a suitable measure for predicting the visibility of the stroboscopic effect, and a new measure should have been developed to predict it. Bullough et al. [9] examined the relationship between frequency (100Hz, 300Hz, 1000Hz, 3000Hz, 10000Hz) and

modulation depth and presented them in a joint function to gain a more understanding of the interaction of the two parameters. The authors concluded that both parameters interact with each other and thus created a basis for further research. However, the research only applied to a duty cycle of 50%. Perz et al. [3] performed an experiment with different frequencies (50Hz, 100Hz, 200Hz, 400Hz, 800Hz) and studied subjects' perceived visual artefacts even at frequencies of 800Hz depending on the modulation depth and waveform. Therefore, higher frequencies are required to eliminate stroboscopic effects. Zhao et al. [16] also investigated the short-term consequences of stroboscopic light for people under more intense conditions (100Hz, 400Hz, 1500Hz). The participants clearly perceived the discrete spatial movement and found the effect very unpleasant under the conditions presented. In addition, the participants also became increasingly tired.

To define a suitable metric for the Stroboscopic Effect, Perz and Wang et al. [3,17] conducted a study consisting of three experiments. These experiments formed the basis for the development of the Stroboscopic Effect Visibility Measure (SVM) and demonstrated the validity of this newly proposed metric. To further validate the SVM, Perz et al. conducted additional tests involving a larger number of subjects and frequencies and introduced the concept of a standard observer for precise SVM measurements. Perz et al. emphasized that the SVM was only valid for certain conditions in an office environment (illuminances around 500 lx and speeds of 4 m/s of the rotating disk). Therefore, Perz et al. called for further validation of the SVM in darker environments (e.g., street lighting) and for faster object movements (e.g., sports and industry for safety with fast rotating machinery) [18]. The Commission of the European Union also adopted the SVM metric and a limit of $SVM = 0.4$.

In typical interior-lighting applications, the most dominant visual artefact for frequencies higher than 100Hz is the stroboscopic effect and phantom array effect [19]. Hence, the goal of the study presented in this paper is to develop objective models, that allow us to predict the visibility of the stroboscopic effect for temporally modulated light sources under different constraints. This model can be used to effectively reduce the Stroboscopic effects and avoid possible health risks.

3 Experimental Methods

3.1 Apparatus

The experiments were performed on a rotating disk with a white spot mounted on top of it. The experimental setup is shown in Figure 2. A 25cm diameter disk with a black cotton surface and a white spot measuring 10mm in diameter was used. This setup provided a significant contrast between moving targets and backgrounds. The white spot was positioned 10.5cm from the center of the disk and rotated at different speeds (2m/s, 4m/s, 6m/s). It was considered appropriate for stroboscopic effects in office applications. The environment was completely darkened with black walls, and the tabletop was covered with a black cotton cloth. A chip-on-board LED (COB-LED) light

source with a color temperature of 4500K and a maximum power of 175W was used to illuminate a disk positioned on a table at different illuminance levels (100lx, 500lx, 1000lx). More information about the COB-LED used can be found in [20]. The height of the disk above the floor was 76cm, corresponding to the height of a regular desk. Luminance levels of the white spot were $15.5\text{cd}/\text{m}^2$, $75\text{cd}/\text{m}^2$, $158\text{cd}/\text{m}^2$, and the black backgrounds surrounding the white spot were $0.3\text{cd}/\text{m}^2$, $1.5\text{cd}/\text{m}^2$, $3\text{cd}/\text{m}^2$ and the remaining black areas had luminance levels of $0.00042\text{cd}/\text{m}^2$, $0.001\text{cd}/\text{m}^2$, $0.00198\text{cd}/\text{m}^2$, respectively. Distances from the subject to the center of the disk and between the subject's eyes and the stimulus were about 68cm and 66cm respectively, which was always kept constant by means of a chin rest. To drive the COB-LED, a dedicated LED driver was used, where both dimming methods (analog, PWM) can be used. It can supply a maximum current of 1A which is set by a relative voltage between 0 to 3.3V. The PWM signals were generated using Agilent's 33220A generator, which can set parameters such as frequency and duty cycle. The output signals were connected to the PWM inputs of the LED driver, using the Rohde & Schwarz NGE100 power supply series to supply 5V, from which the relative voltages of the LED driver and the rotating disk were also provided. Moreover, to control the function generator, a user interface was created in the programming language 'Python', where waveform (sine, square), amplitude, frequency, and duty cycle can be varied.

In conclusion, the basic parameters can be adjusted or changed by the experimental setup. Thus, it was possible to change speeds, stimulus shapes, and stimulus sizes. Furthermore, a square wave signal can be generated, in which amplitude, duty cycle, and frequency can be varied. Different illuminance levels can be set, varied, and kept constant in this experimental setup.

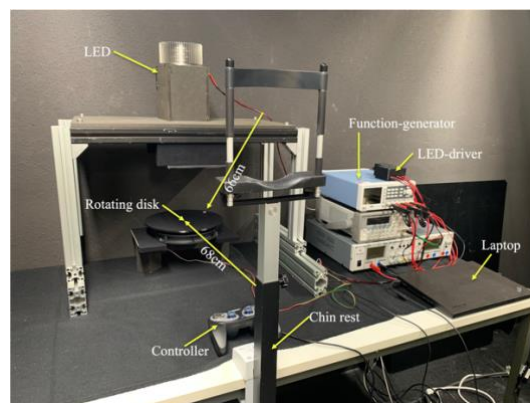
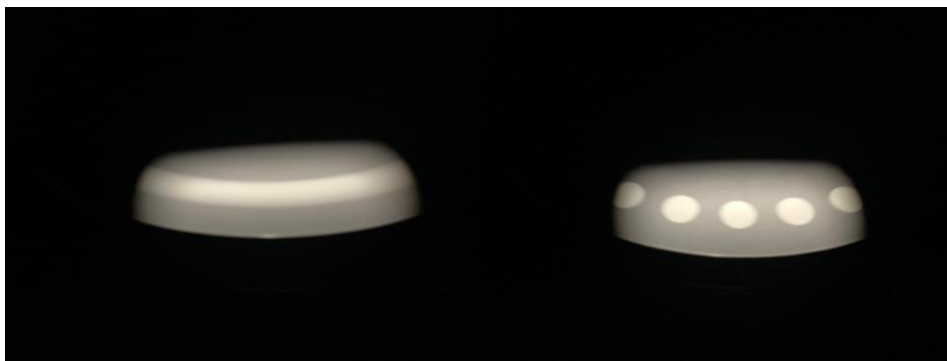


Figure 2. The experimental setup

3.2 Procedure

Participants were seated at 68cm from the center of the disk and the angle of view was approximately 7.8 degrees when the white dot passed the illuminated area. Next, they were given verbal instructions on the experimental procedure. Stroboscopic effects were thoroughly explained. They were also given a short demonstration of the test to familiarize them with the experimental procedure. Throughout the experiment, the disk

remained in constant rotation. Subsequently, the experiment started by switching on a DC light for 2s as the first step. Perz et al. [2] showed in the first measurement that a relative signal with a DC light before the actual stimulus was the most accurate method with the least variance. After 2s have elapsed, the modulated light was automatically switched on. Participants must indicate whether a difference between the DC light and the modulated light can be seen, and they were instructed to press the right key of the controller when they observed the stroboscopic effect on the rotating disk, and otherwise the left one. Lights were switched off for 1s after the input so that participants received the information that a new stimulus follows. The procedure started again from the beginning until all modulated stimuli had been presented. All responses of participants were stored in a CSV file. Combined with the method of constant stimuli, the 50 percent detection thresholds were derived for each condition tested. In addition, Figures 3(a) and (b) show close-up pictures of the rotating disk under two different lighting conditions: under DC illuminance, giving rise to the perception of a blurred image, and under AC modulated light, resulting in stroboscopic illuminance showing discrete movements of the spot.



Figures 3. (a) The rotating disk under DC illuminance and (b) the rotating disk under AC modulated light

In this experiment, the aim was to detect stroboscopic effects in dependence on duty cycle, speed, and illuminance. Before the data collection started, we did pre-experiments to determine the approximate range of the thresholds between 100Hz and 4200Hz. There were two steps in the experiment, where the first step was called low-resolution and the second was called high-resolution, in which 100Hz, 200Hz, 300Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz, 800Hz, 1000Hz, 1200Hz, 1400Hz, 1800Hz, 2200Hz, 2600Hz, 3000Hz, 3400Hz, 3800Hz, 4200Hz were tested in the first step to obtain estimated thresholds, in the second step, absolute thresholds were obtained by measuring 5 values from the left and right of estimated values, depending on the different resolutions. A light source with square wave signals and different duty cycles (10%, 30%, 50%, 70%, 80%) was used. The stimulus was repeated four times in random order under different rotation speeds (2m/s, 4m/s, 6m/s) and illuminance levels (100lx, 500lx, 1000lx). It usually took less than 30 minutes for every subject to observe each experiment situation. Five subjects (3 males and 2 females with ages ranging between 22 and 35) participated in the study to evaluate the detection and acceptability of stroboscopic effects. Since the stroboscopic effect was produced by flickering light

sources, we excluded participants that might be oversensitive to temporal modulations in light output. Such as, we only included participants that did not suffer from epilepsy nor had a family history of epilepsy, and that did not suffer from migraines.

4 Experimental Results

The objective of this experiment was to examine the relationship between stroboscopic visibility and the duty cycle. The data of four subjects (2 females and 2 males) was used to establish a model, while an additional male participant was used for evaluation purposes. The primary focus was to evaluate the responses of the four subjects to each duty cycle and frequency. The aim was to determine the threshold frequency, representing the frequency at which the detection probability reached 50 percent. For this purpose, logistic regression models were used. Figure 4 showed the logistic regression curves of one subject for different duty cycles under each case. A detection probability of 0% meant that the subject detected a stroboscopic effect four times at the respective duty cycle and frequency.

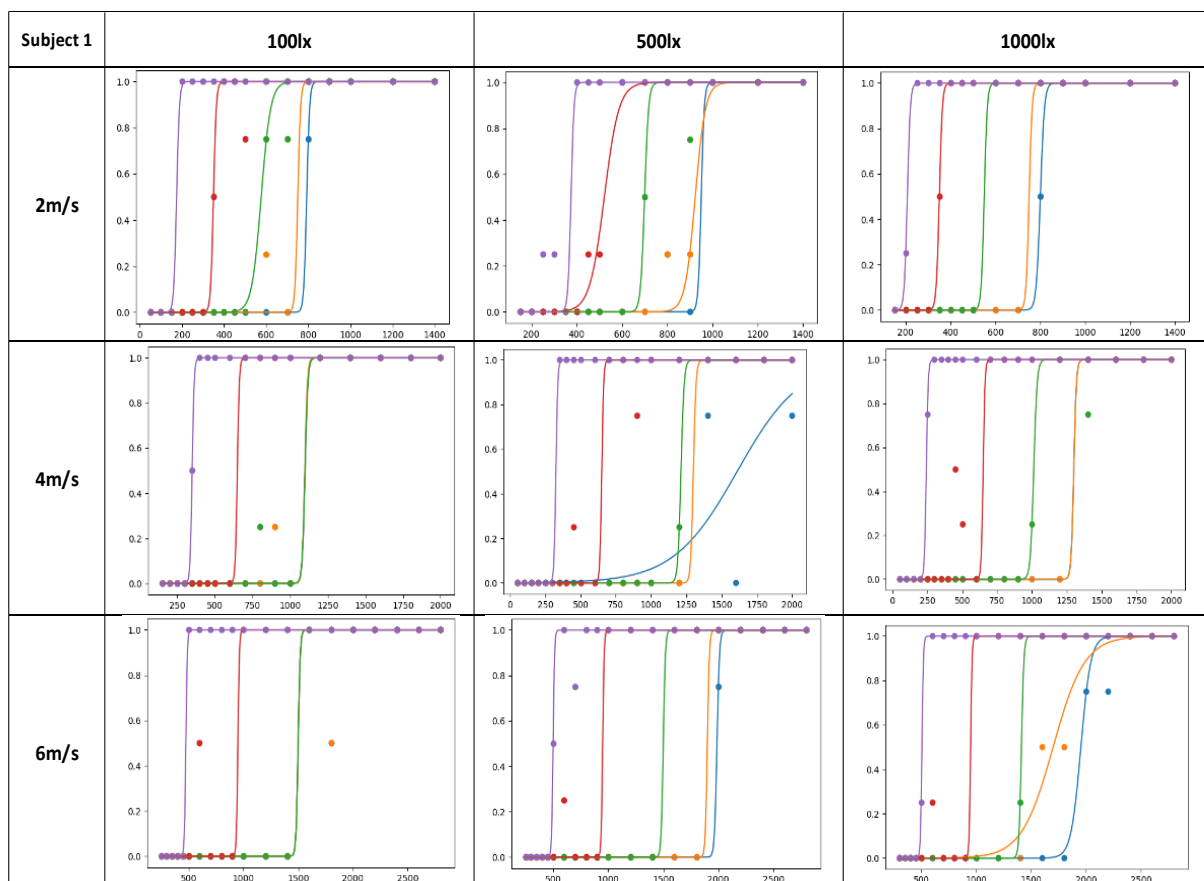


Figure 4. Logistic function of a subject for different duty cycles in each case

Basically, the threshold frequency decreased with increasing duty cycles for each subject. They showed similar behaviors that were the highest under 10% duty cycle and the lowest under 80% duty cycle. In the following, the frequencies were plotted as a function of the duty cycle at the visibility threshold as boxplots (Figure 5).

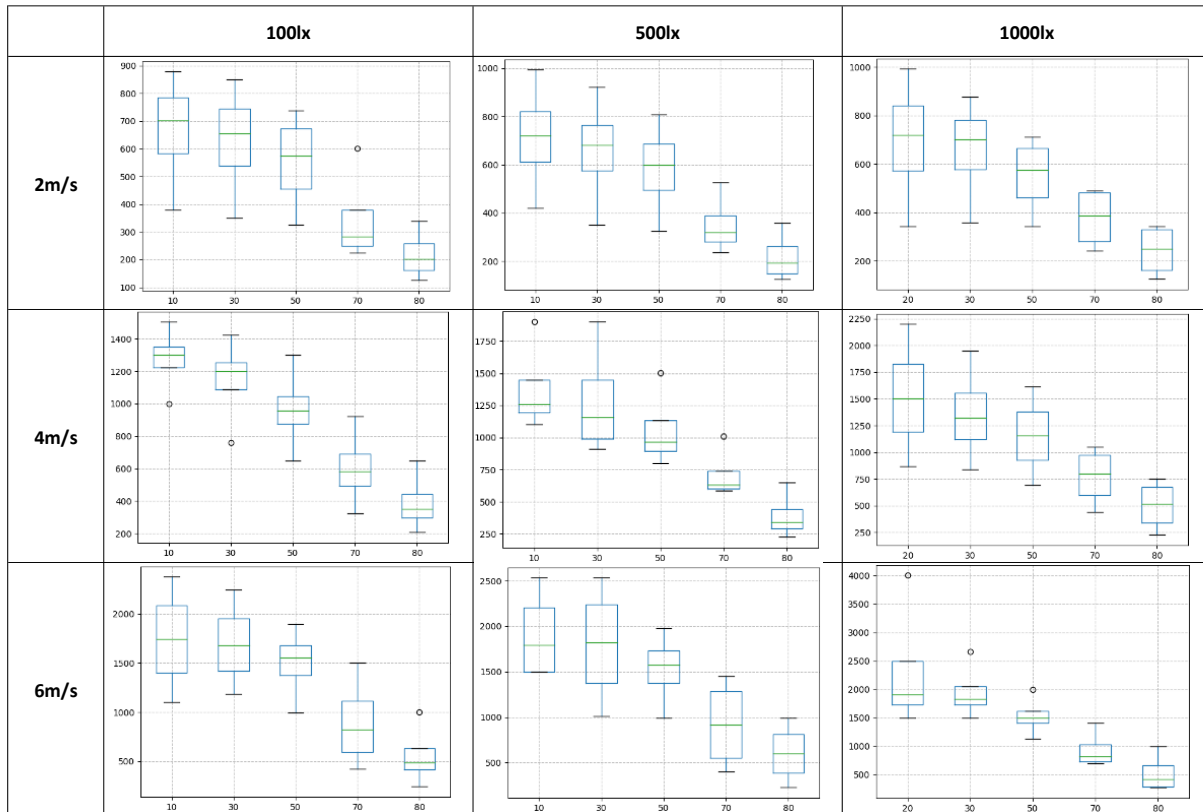


Figure 5. Boxplots of the absolute threshold frequency of all subjects for each case

Each figure presented a boxplot of the visibility absolute thresholds for each duty cycle that was tested in the experiment. The horizontal line in each box corresponded to the 50th percentile (i.e., the median). The lower and upper borders of the box corresponded to the 25th and 75th percentiles, respectively. The whiskers indicated the total range in measured thresholds, excluding outliers (which are defined as deviating more than 1.5 times half the width of the box). The one-factor analysis of variance (ANOVA) showed no significant difference between 10% and 50% duty cycle at a significance level of $\alpha = 0.05$.

The absolute thresholds varied widely due to each individual subjectivity, using these values directly for analysis can result in an overemphasis on data with higher numerical levels while underemphasizing those with lower levels. In order to enhance the reliability of the results, normalizing absolute thresholds proved to be a valuable step. The frequencies were represented by boxplots, illustrating their relationship between the duty cycle and the relative threshold defined at 10% duty cycle (Figure 6). The results illustrated a lower dispersion than the absolute thresholds at different duty cycles. Even though the variance of the conditions was different, an analysis of variance (ANOVA), a method used to test differences between two or more means resulting from parametric data, was performed to test for significant differences in the means of the conditions. There were no significant differences between the threshold frequencies at the 10% to 50% duty cycles after ANOVA at a significance level of $\alpha = 0.05$. A median difference of approximately 0.27 was determined. The differences were significant at the mean for duty cycles between 50% to 80%.

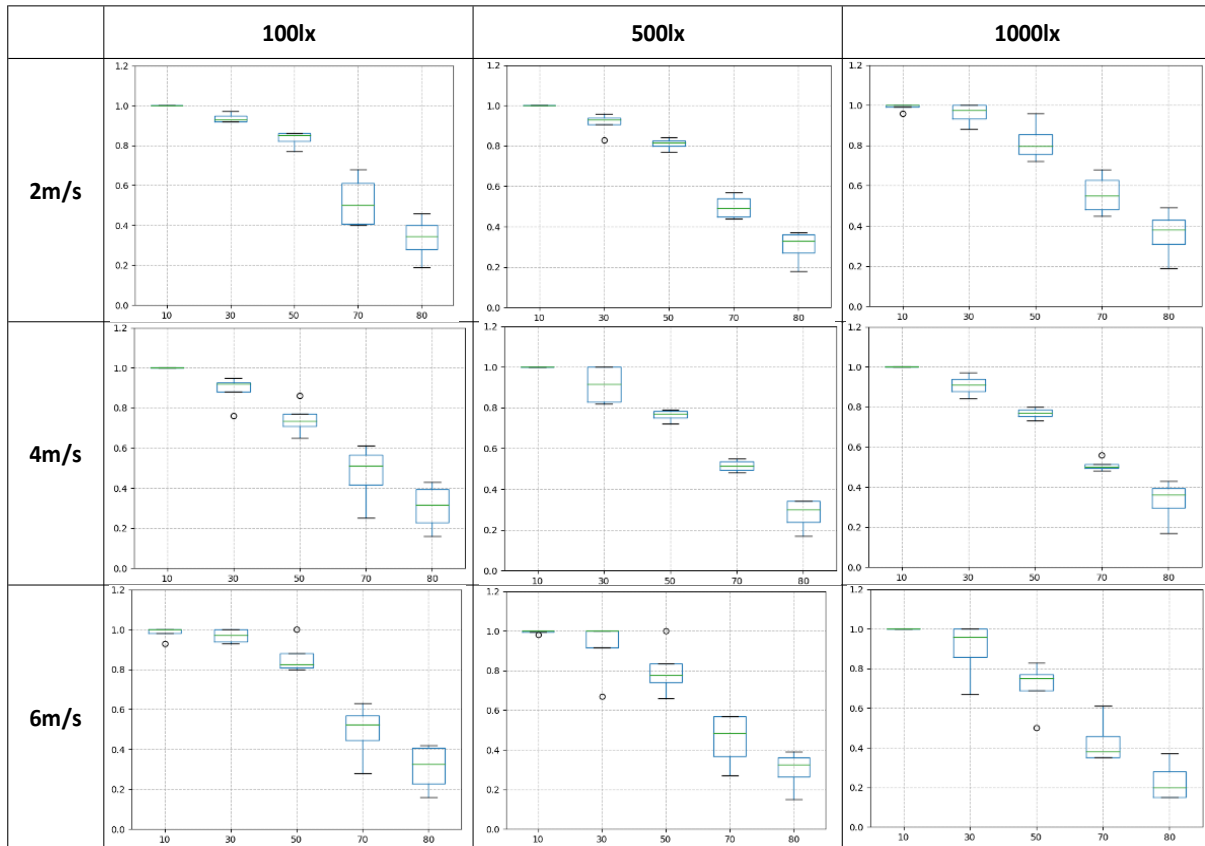


Figure 6. Boxplots of the relative threshold frequency of all subjects for each case

4.1 Effect of rotation speeds

This experiment investigated stroboscopic visibility in dependence of rotation speed. Figure 7 shows relative thresholds for participants at various duty cycles. The whiskers indicate the error bar with standard deviation. Also, the curves illustrate that behaviors of the threshold are relatively similar at different speeds (2m/s, 4m/s, 6m/s) respectively. Further, the results show a lower dispersion and smaller error for each case.

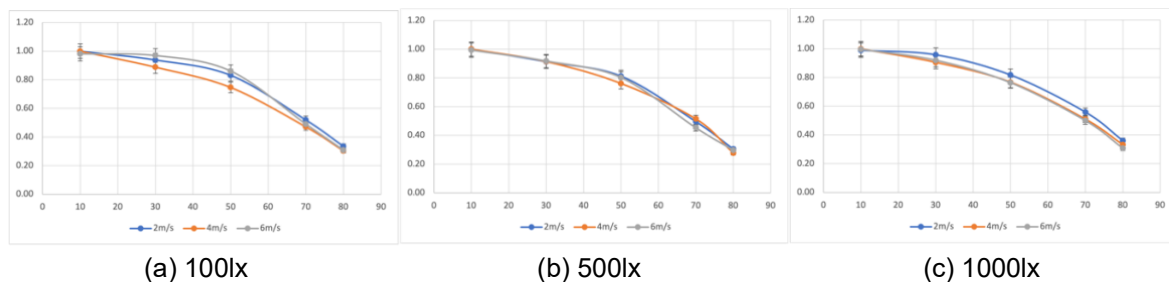


Figure 7. Relative threshold frequency depending on duty cycles and speeds at 100lx(a), 500lx(b), 1000lx(c)

Based on these data, Equation (3) can be used to model the dependence, where y is the relative threshold, x is the duty cycle and a, b are parameters. Figure 8 shows the relationship between relative thresholds and duty cycles under different illuminance levels, where Y-axis was relative threshold values and X-axis was duty cycles.

$$y = e^{ax^b} \tag{3}$$

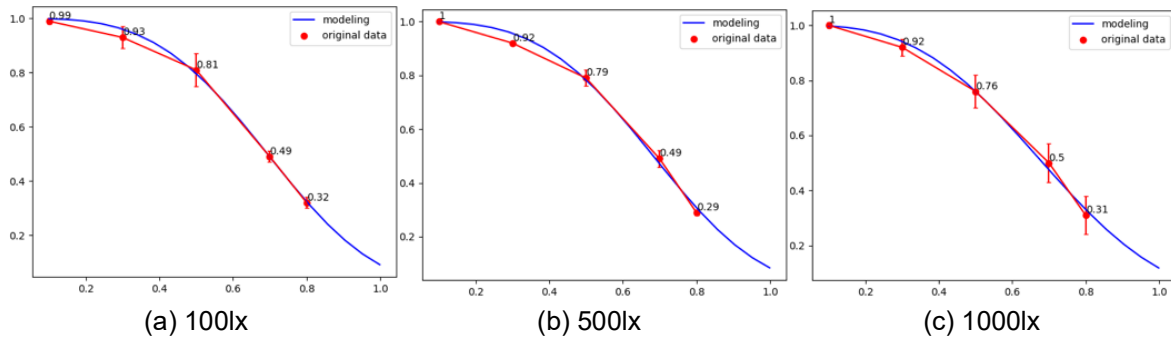


Figure 8. Modeling of stroboscopic effects in dependence of duty cycle with different speeds at 100lx(a), 500lx(b), 1000lx(c)

Figure 8 presents the fitting curves of the relative visibility threshold with its standard deviation (error bars). It is observed that the relative threshold of the stroboscopic effect decreases as the duty cycle increases. To quantitatively describe this relationship, Equation (3) is used, demonstrating excellent performance in the fitting. The optimal parameter values were determined by minimizing the sum of squared residuals, thus providing an accurate description of the relationship.

In order to further evaluate the accuracy and reliability of the model, additional analysis was conducted. Tables 1-3 in the Appendix list the absolute, predicted threshold frequencies and errors for the evaluator under different illuminance levels. Figure 9 shows the histogram of errors at 100lx, 500lx and 1000lx, in which the maximum is approximately 31%, but it is still in 95% confidence interval of absolute thresholds. In principle, minor deviations cannot be ruled out since subjects had different sensitivities. Overall, although there are small deviations from the predicted thresholds, the results at the different illuminance levels proved the validity and reliability of the model.

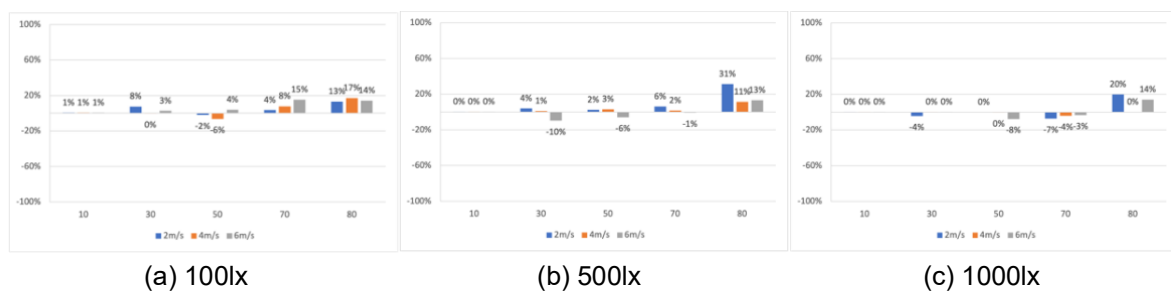
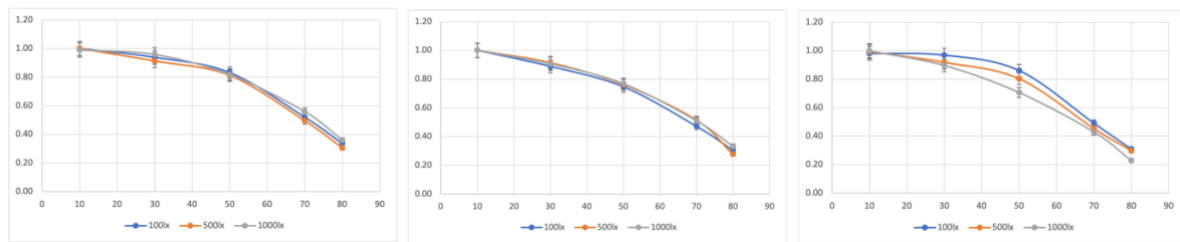


Figure 9. Modeling errors at 100lx(a), 500lx(b), 1000lx(c)

4.2 Effect of illuminance levels

This experiment aimed to investigate stroboscopic visibility in dependence of illuminance level. Figure 10 shows the relative threshold for participants at various duty cycles, in which the whiskers indicate error bars with standard deviation. Also, the behaviors of relative threshold curves are similar at different illuminance levels (100lx,

500lx, 1000lx). And the results show a lower dispersion and smaller error for each case.



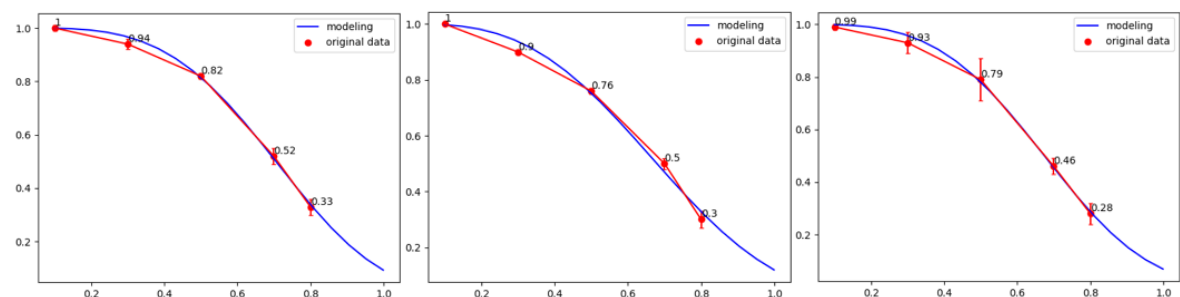
(a) 2m/s

(b) 4m/s

(c) 6m/s

Figure 10. Relative threshold frequency depending on duty cycles and illuminance levels at 2m/s(a), 4m/s(b), 6m/s (c)

In the following, functions can be modeled based on these data (Ref. Eq (3)). Equation (4) shows objective models. Figure 11 shows the relationship between relative thresholds and duty cycles under different speeds, where Y-axis was relative threshold values and X-axis was duty cycles.



(a) 2m/s

(b) 4m/s

(c) 6m/s

Figure 11. Modeling of the stroboscopic effect in dependence of duty cycle with different illuminance levels at 2m/s(a), 4m/s(b), 6m/s(c)

In Figure 11, the relative visibility threshold of the stroboscopic effect is shown, accompanied by error bars indicating the standard deviation. Notably, the threshold frequency of the stroboscopic effect exhibits a decreasing trend as the duty cycle increases. Equation (3) is used to quantify this relationship and exhibit excellent fitting performance. The determination of optimal parameter values is achieved by minimizing the sum of squared residuals, ensuring precise and accurate modeling of the relationship.

To assess the accuracy and reliability of the model, an additional analysis was carried out, aiming to provide a comprehensive evaluation of its performance. Tables 4-6 in Appendix show the absolute, predicted threshold frequencies and errors for the evaluator at different speeds. Figure 12 shows the histogram of errors at 2m/s, 4m/s and 6m/s, in which the maximum error value is approximately 25%, and still in 95% confidence interval of absolute thresholds. Therefore, these results provide evidence that the model is effective with different illuminance levels.

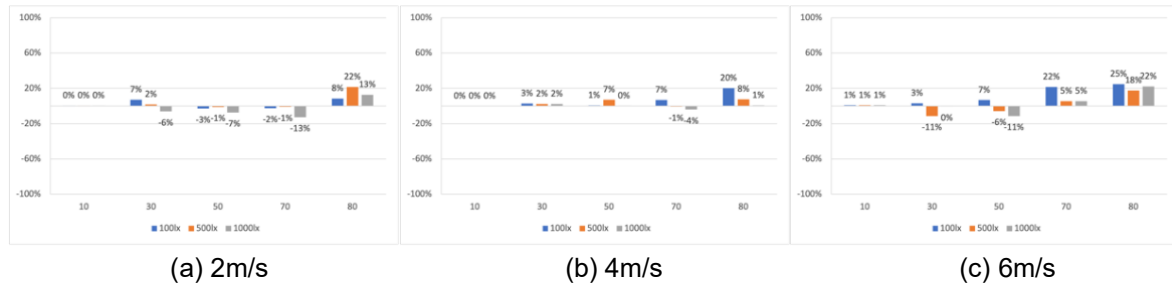


Figure 12. Modeling errors at 2m/s(a), 4m/s(b), 6m/s(c)

5 Discussion

The purpose of the experiments was to develop an objective model that effectively predicts the visibility of the stroboscopic effect. In the pre-experiment, we aimed to identify the specific range at which the threshold occurs by testing different frequencies. The results showed that the frequency range was between 100Hz to 4200Hz. Figure 5 showed the threshold of subjects can be up to 2000Hz and higher. Consequently, when comparing these findings with the SVM sensitivity curve, it became apparent that the application of the SVM is limited since it is only defined up to 2000Hz. We can also compare the absolute thresholds with the results previously reported. For instance, Bullough et al. [9] conducted their study using a white plastic rod measuring 172mm in length and 6mm in diameter, which was moved back and forth beneath the luminaire. In contrast, our study used a white spot with a diameter of 10mm, mounted on a rotating black surface. The observed threshold in Bullough et al.'s research was approximately 2400Hz under a 50% duty cycle, while in our study, it was approximately 1000Hz. Perz et al. [3,21] employed two luminaires that were mounted in a frame to illuminate the entire experimental section and placed next to a white wall. In our study, the environment was completely darkened with black walls. The COB-LED illuminated a specific portion of the rotation disk, leaving the rest in darkness. The observed threshold frequency under an illuminance level of 500lx was approximately 1250Hz in our study, while in Perz et al.'s research, it was 1110Hz. Furthermore, Perz et al. [21] used different illuminance levels, specifically 5lx, 10lx, 50lx, 100lx, and 500lx. Their ANOVA analysis confirmed that the highest threshold at 5lx was significantly different from the thresholds at all other illumination levels, and the lowest threshold at 50lx was significantly different from all other thresholds, except for the one at 100lx. In contrast, my study used illuminance levels of 100lx, 500lx, 1000lx as experimental parameters and the results indicated that the visibility of the stroboscopic effect has no significant difference between the illuminance levels of 100lx, 500lx, and 1000lx. The differences observed in the absolute thresholds between our study and previous research can primarily be attributed to differences in measurement methodology and various parameters used, such as speeds, duty cycles, and stimulus shape. Therefore, the variations in absolute thresholds should be primarily considered within the context of the variations in measurement techniques and experimental parameters employed across studies.

6 Conclusion

The current paper reports the detection of stroboscopic effects in dependence of duty cycle, speed, and illuminance. The study indicates that the threshold frequency has no significant differences between the 10% and 50% duty cycles. However, a noticeable decrease in threshold frequency is observed beyond 50% duty cycle. Additionally, the study involved the development of objective prediction models to determine the visibility of the stroboscopic effect. These models were specifically focused on speed and illuminance levels.

All experiments were performed with a maximum of five subjects. For a more accurate result, a higher number of subjects is necessary. Furthermore, the subjects are all healthy, so persons with low visual acuity suffering from (e.g., nystagmus) are not considered. This means that in the future investigations should also be carried out about the stroboscopic effect in particularly sensitive persons. Thus, health risks can be extended and possibilities to counteract the health consequences can be mentioned. In addition, other influencing parameters such as the stimulus shape, size, and luminance contrasts should be further investigated.

References

- [1] A. Wilkins, J. Veitch and B. Lehman, "LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update," 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, USA, pp. 171-178, 2010. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618050.
- [2] F.H. Adler, R.A. Moses, and W.M. Hart, *Adler's Physiology of the Eye: Clinical Application*. 8th Edition. St. Louis: Mosby; 1987.
- [3] M. Perz, I. Vogels, D. Sekulovski, L. Wang, Y. Tu, and I. Heynderickx, "Modeling the visibility of the stroboscopic effect occurring in temporally modulated light systems," *Lighting Research & Technology*, pp. 281-300, 2015. doi:10.1177/1477153514534945
- [4] S.L. McColl, J.A. Veitch, "Full-spectrum fluorescent lighting: a review of its effects on physiology and health," *Psychol Med*, pp. 949-64, 2001 Aug. doi: 10.1017/s0033291701004251. PMID: 11513381.
- [5] J. Bullough, K. Sweater Hickcox, T. Klein, N. Narendran, "Effects of flicker characteristics from solid-state lighting on detection, acceptability and comfort," *Lighting Research & Technology*, pp. 337-348, 2011. doi:10.1177/1477153511401983
- [6] Rea, Mark, and M. Ouellette, "Table-tennis under High Intensity Discharge (HID) Lighting," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 1988. doi:10.1080/00994480.1988.10748705.
- [7] H. Apyrandi, P. Dupuis, N. I. Sinisuka and G. Zissis, "Stroboscopic Visibility Measure: assessment of pulsed light parameters," 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Detroit, MI, USA, pp. 1-4, 2020. doi: 10.1109/IAS44978.2020.9334755.
- [8] S.M. Berman, D.S. Greenhouse, I.L. Bailey, R.D. Clear, and T.W. Raasch, "Human electroretinogram responses to video displays, fluorescent lighting, and other high frequency sources," *Optom Vis Sci*. pp. 645-62, 1991 Aug. doi: 10.1097/00006324-199108000-00012. PMID: 1923343.
- [9] J. Bullough, K. Hickcox, T. Klein, A. Lok, and N. Narendran, "Detection and acceptability of stroboscopic effects from flicker," *Lighting Research and Technology*, pp. 477-483, 2012. doi:10.1177/1477153511414838.
- [10] H. de Lange DZN, "Eye's response at flicker fusion to square-wave modulation of a test field surrounded by a large steady field of equal mean luminance," *Journal of the Optical Society of America*, pp. 415–421, 1961.
- [11] Illuminating Engineering Society of North America, *IESNA Lighting Handbook*, 9th Edition, New York: IESNA, 2000.
- [12] A.J. Wilkins, *Visual Stress*, Oxford: Oxford University Press, 1995.

- [13] P.R. Boyce, *Human Factors in Lighting*, 2nd Edition, London: Taylor and Francis, 2003.
- [14] J.P. Frier, A.J. Henderson, “Stroboscopic Effect of High Intensity Discharge Lamps,” *Journal of the Illuminating Engineering Society*, pp. 83-86, 1973. doi: 10.1080/00994480.1973.10732230
- [15] I. Vogels, I. M., S. Sekulovski, and M. Perz, “Visible artefacts of LEDs,” In: *Proceedings of 27th Session of the CIE, Sun City, South Africa*, pp. 42–51, 2011.
- [16] X. Zhao, M. Li, Y. Lin, and W. Xu, “Study of the Stroboscopic Effect Visibility Measure (SVM) based on Cognitive Performance,” 2019 16th China International Forum on Solid State Lighting & 2019 International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS), Shenzhen, China, pp. 153-156, 2019. doi: 10.1109/SSLChinaIFWS49075.2019.9019756.
- [17] L. Wang, Y. Tu, L. Liu, M. Perz, I. Vogels, I. M., and I.E. Heynderickx, “50.2: Invited paper: stroboscopic effect of LED lighting,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Bd. 46. 1. Wiley Online Library, pp. 754–757, 2015. doi: 10.1002/sdtp.10194.
- [18] M. Perz, D. Sekulovski, Vogels, I. M., and I.E. Heynderickx, “77-1: Invited Paper: Modelling Visibility of Temporal Light Artefacts,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Bd. 49. 1. Wiley Online Library, pp. 1028–1031, 2018. doi: 10.1002/sdtp.12194
- [19] D. Polin, S. Klir, M. Wagner, and T. Khanh, “Reducing the stroboscopic effects of LED luminaires with pulse width modulation control,” *Lighting Research & Technology*, pp. 370-380, 2017. doi: 10.1177/1477153515615934
- [20] A. Herzog, M. Wagner, S. Benkner, B. Zandi, W. D. van Driel and T. Q. Khanh, “Long-Term Temperature-Dependent Degradation of 175 W Chip-on-Board LED Modules,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, pp. 6830-6836, Dec. 2022. doi: 10.1109/TED.2022.3214169.
- [21] M. Perz, D. Sekulovski, I. Vogels, and I. Heynderickx, “Stroboscopic effect: contrast threshold function and dependence on illumination level,” *J. Opt. Soc. Am. A* 35, pp. 309-319, 2018. doi: 10.1364/JOSAA.35.000309.

Appendix

Table 1. The absolute, predicted threshold frequencies and error for one subject with different speeds at 100lx

DC	2m/s			4m/s			6m/s		
	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)
10%	892	887	1	1700	1690	1	2573	2557	1
30%	900	832	8	1579	1585	0	2466	2399	3
50%	712	725	-2	1300	1382	-6	2180	2092	4
70%	457	441	4	911	840	8	1500	1271	15
80%	325	282	13	650	538	17	950	814	14

Table 2. The absolute, predicted threshold frequencies and error for one subject with different speeds at 500lx

DC	2m/s			4m/s			6m/s		
	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)
10%	850	848	0	1838	1834	0	3100	3094	0
30%	810	778	4	1700	1682	1	2585	2837	-10
50%	690	673	2	1502	1456	3	2318	2456	-6
70%	442	415	6	911	897	2	1500	1513	-1
80%	362	249	31	607	539	11	1046	908	13

Table 3. The absolute, predicted threshold frequencies and error for one subject with different speeds at 1000lx

DC	2m/s			4m/s			6m/s		
	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)
10%	850	847	0	1977	1971	0	3100	3090	0
30%	750	782	-4	1825	1820	0	2863	2854	0
50%	650	650	0	1504	1511	0	2201	2369	-8
70%	396	425	-7	950	988	-4	1500	1549	-3
80%	325	261	20	607	606	0	1107	951	14

Table 4. The absolute, predicted threshold frequencies and error for one subject with different illuminance levels at 2m/s

DC	100lx			500lx			1000lx		
	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)
10%	892	889	0	850	847	0	850	847	0
30%	900	836	7	810	796	2	750	796	-6
50%	712	732	-3	690	698	-1	650	698	-7
70%	457	468	-2	442	446	-1	396	446	-13
80%	325	298	8	362	284	22	325	284	13

Table 5. The absolute, predicted threshold frequencies and error for one subject with different illuminance levels at 4m/s

DC	100lx			500lx			1000lx		
	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)
10%	1700	1700	0	1838	1838	0	1977	1977	0
30%	1579	1535	3	1700	1659	2	1825	1785	2
50%	1300	1290	1	1502	1395	7	1504	1500	0
70%	911	849	7	911	917	-1	950	987	-4
80%	650	518	20	607	560	8	607	603	1

Table 6. The absolute, predicted threshold frequencies and error for one subject with different illuminance levels at 6m/s

DC	100lx			500lx			1000lx		
	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)	Absolute (Hz)	Predicted (Hz)	Error (%)
10%	2573	2552	1	3100	3075	1	3100	3075	1
30%	2466	2388	3	2585	2877	-11	2863	2877	0
50%	2180	2034	7	2318	2450	-6	2201	2450	-11
70%	1500	1177	22	1500	1419	5	1500	1419	5
80%	950	715	25	1046	862	18	1107	862	22

Lab-on-chip Projection System for Fluorescence based Medical Analysis

Oindrila Ghosh^{1,2}, Jan Müller^{1,2}, Ingo Ramsteiner², Reinhold Fieß², Cornelius Neumann¹

¹Karlsruhe Institute of Technology, ²Robert Bosch GmbH

fixed-term.Oindrila.Ghosh@de.bosch.com, jan.mueller9@de.bosch.com

Abstract

The aim of this research project is to implement a novel concept of using a scanning projection system for exciting fluorescence in lab-on-chip devices. While scanning projectors are state of the art in display applications, this use case imposes a set of specific requirements not fulfilled by commercial devices. One advantage in the lab-on-chip setting is increased flexibility in the design of disposables.

To implement the final goal, the theoretical feasibility of the optical system is estimated, followed by simulation of the entire setup in Zemax OpticStudio and finally building up the working prototype of the projection system in the lab as a proof of concept, to compare the experimental findings with the simulation results.

Index Terms: Laser phosphor, scanning projection system, lab-on-chip

1 Introduction

Fluorescence-based detection systems are used in numerous life-science applications, such as immunoassays, tissue staining, cytometry real-time quantitative Polymerase Chain Reaction analysis. The common idea in any of these applications is to make some biomolecular signature or reaction visible, which is not accessible to direct spectroscopy. To this end, special biomolecules that interact in a key-lock manner with molecules (e.g., nucleotide sequences or antibodies) in the sample are functionalized with particular dye molecules. Their fluorescence can be measured and tells us thereby indirectly about molecular properties of the sample.

This paper implements the idea of using a scanning projection system for exciting fluorescence in any of these applications.

2 Motivation

A projector-based illumination system has several advantages a medtech device could benefit from. Mainly, the freedom in distributing the light budget to any part of the

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



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

projection area gives great flexibility to either locally enhance intensities or change areas of interest which reduces stray light. It also offers high flexibility in the design of disposables such as lab-on-chip cartridges.

While there are several established projector systems for display purposes, these are typically based on laser diodes. For lab on chip applications, the latter are not suitable for several reasons, the most notable and trivial being the limited availability at custom wavelengths. Therefore, we explore the use of phosphor converted light sources, which makes designing such a projector challenging for etendue reasons.

3 Etendue Calculations

The etendue of an optical system describes the ability to collect a certain fraction of luminous flux from a finite light source. The etendue G of a system is calculated by the equation, $G = \pi S(NA)^2$ where S is the finite area of the light source from which the system can accept luminous flux, and NA is the corresponding numerical aperture. The total luminous flux of a Lambertian emitter is given by $\phi_{source} = \pi A_s L_s$ where A_s is the total area of the light source that emits light, and L_s is the luminance.

The maximum flux which the optical system can accept is given by $\phi_{system} = G L_s$.

This equation shows that the flux output is etendue limited and can only be increased by increasing the luminance of the light source. [1]

The beam parameter product of a laser beam which can be described as Gaussian beam, see figure 1, is given as $BPP = w_0 \cdot \theta_{div}$, where w_0 represents the beam waist and θ_{div} represents the beam divergence half-angle.

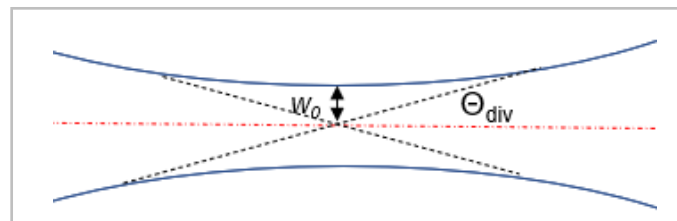


Figure 1: Gaussian beam with beam waist w_0 and divergence θ_{div}

4 Key Elements

Laser-pumped phosphor light source: Since a projection system, is an etendue-limited optical setup, a source which provides high luminance/radiance output is the best option. Here, a light source from Kyocera SLD Laser is used which consists of a phosphor converted laser packaged as surface mount device (SMD). The light source emits a broad white spectrum with a luminous flux of 500 lumens (lm). It has a luminance value > 1000 cd/mm². It consists of a combination of blue laser and yellow phosphor [6].

Scanning mechanical mirror: To scan the sample plane, the Optotune fast-steering mechanical mirror is used. This mirror allows 2D beam deflections of $\pm 50^\circ$ in both

directions. It has a compact structure with a clear aperture of 15 mm and offers real-time position feedback. By controlling the amplitude of the input current, the deflection angle of the mirror can be monitored as per requirement of the scanning area. [3]

Sample Plane: The system is designed to illuminate, partly or entirely, a sample plane observed by a camera. In a typical example, we aim to illuminate one $5 \times 5 \text{ mm}^2$ area on this plane at a time. The sample plane area corresponding to the camera FoV is bigger than this illuminated area.



Figure 2 (a) Kyocera SLD element



(b) Optotune scanning mirror

5 System Design

5.1 General Structure

This optical system consists of a light source (the SLD module), a collimation path, an interference filter, a scanning unit followed by a focusing unit that results in a focused spot on the sample plane.

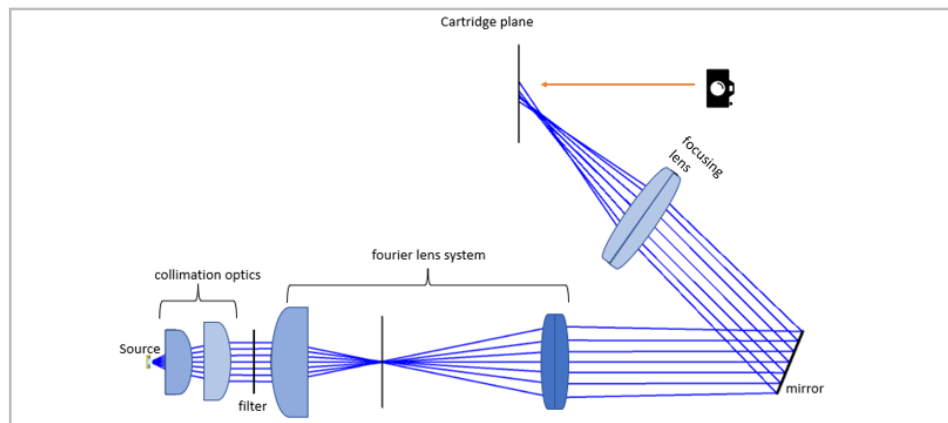


Figure 3: Sketch of the optical system

5.2 Scanning Projection System

In this work, a flying-spot scanning projection system is designed. A flying-spot scanner mainly consists of at least two components: a light source and a deflection unit which scans over an area at a rate higher than human eye can perceive and creates an image.

Based on their working principle, projection systems can be subdivided into two categories: The system of the first type scans the whole field of view, and the light source is modulated to create the desired illumination pattern on the screen. The system of the second type scans only a part of the whole field of view and light source is kept on throughout the scanning period.

The second type of scanning projection system is chosen here since it is evaluated as a more convenient option. In the case of the first kind of scanner, a fraction of the through power of the light source is lost (when then the source is not turned on) and decay time of the phosphor elements limits the rate at which the light source can be modulated.

5.3 Theoretical Feasibility

Alongside with overcoming the field of view limitation, a certain minimum irradiance value and resolution of the scanning spot on the sample plane, is to be maintained for the system to be fully efficient.

The theoretical limit of the system is calculated using the beam parameter product. All assumption describing the optical system are summarized in table 1.

Table 1: Assumptions for the BPP calculation.

Parameter name	symbol	Value
Spot diameter on sample plane	w_{final_spot}	1 mm
Scanning mirror aperture	w_{mirror}	15 mm
Example area on sample (to be scanned at a time)	A_{sample}	25 mm ²
Approximate distance between scanning mirror and sample plane	D	85 mm
Source diameter	w_{source}	0.25 mm
Radiant flux of the source	P_s	1.4 W
Fraction of light transmitted by the spectral filter	η_{filter}	10 %

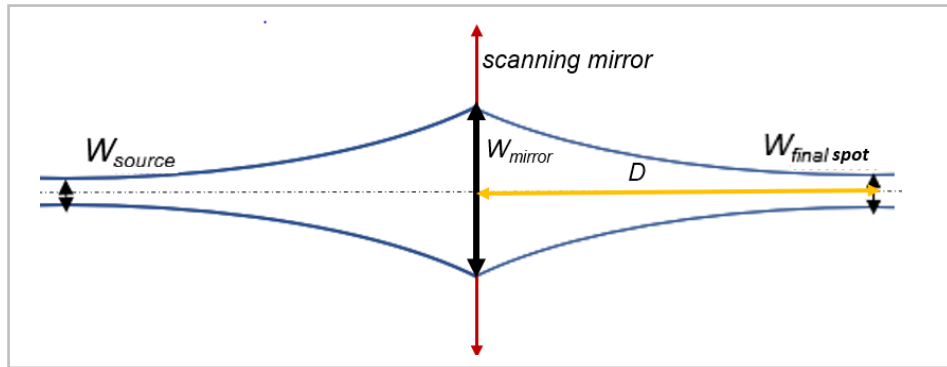


Figure 4: Calculation reference diagram

The divergence of the final spot Θ_{final_spot} is given by equation (1).

$$\Theta_{final_spot} = \tan^{-1} \left(\frac{W_{mirror} - W_{final_spot}}{2 \cdot D} \right) = 4.71^\circ \quad (1)$$

$$\Theta_{source} \cdot W_{source} = \Theta_{final_spot} \cdot W_{final_spot} \quad (2)$$

The BPP is constant, hence equation (2) is valid. Here, Θ_{source} is the opening angle of the source which can be used from the optical system.

Combining equation (1) and (2), the divergence of the source can be calculated and equals to $\Theta_{source} = 18.8^\circ$ for the given assumptions in table 1. Having the accepted opening angle, the fraction of the source emission cone angle which is used by the optical system can be calculated. To ease the calculation, an Lambertian emitter is assumed whose fraction of flux in a cone angle is given by the sinus of that cone angle. Therefore, the usage efficiency of light from the source η_{source} is given by

$$\eta_{source} = \sin(\Theta_{source}) \quad (3)$$

Which leads to $\eta_{source} = 32.3\%$

To calculate the irradiance E_{sample} , the total through power on the sample plane is divided by A_{sample} :

$$E_{sample} = \frac{P_{source} \cdot \eta_{source} \cdot \eta_{filter}}{A_{sample}} \quad (4)$$

The calculation is made assuming that there is no additional focusing lens after the scanning mirror and still the value calculated using Eq. (4) for the irradiance on the sample $E_{sample} = 1.81 \frac{mW}{mm^2}$ is sufficient for our application.

5.4 Challenges

- a) The space above the sample plane is occupied by an imaging unit and in order to avoid Fresnel reflections we do not want a coaxial illumination. Therefore, the excitation beam of our projector forms a 45° angle with the sample plane. Hence, the beam spreads and increases in diameter as the beam is scanned through the whole FOV of the camera. This problem should be tackled so that the resolution remains as stable as possible at different locations of the sample plane.
- b) The aperture of the Optotune mechanical scanning mirror is 15 mm, so the combination of the two converging lenses on both sides of the Fourier plane (that are used to focus the beam and then again collimate it) is chosen such that the parallel beam waist just fits into the aperture of 15 mm, so that the final through power output is maximum. Choosing the first lens with a larger focal length can result in an output beam of smaller diameter at the mirror. Hence, there is a trade-off between the optical path length of the system and the beam waist diameter at the scanning mirror. Larger optical path length results in larger space requirement. Depending on the scanning mirror aperture dimension a telescopic lens system can also be built up to modulate the beam diameter at the scanning mirror.
- c) Other components of the laboratory setup which are not related to the projector system reported here impose strict space constraints. The designed optical setup therefore should comply by these requirements.

5.5 Improving Irradiance Output

Homogenization of the spot diameter throughout the whole FOV area by introducing tilting and decentring of the optical components is one approach for increasing irradiance levels.

This method uses the Scheimpflug principle which states a geometric relationship between the orientation of the image plane, lens plane and plane of focus. Ideally, if the lens plane and the image plane lie parallel to each other, the plane of focus lies parallel to both the planes. When a lens plane is not parallel to the image plane, it is still possible to focus along the tilted image plane if the three planes, namely, the image plane, the lens plane and the plane of sharp focus converge along a single line, also termed as the “Scheimpflug Line” [5]

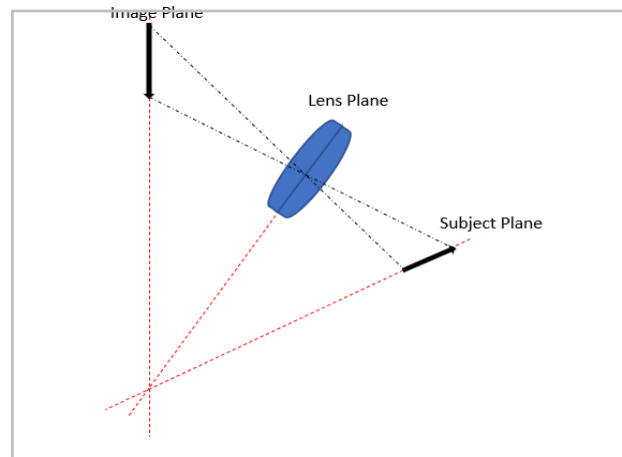


Figure 5: Scheimpflug principle schematic

Another approach is to decrease the spot radius by introducing an additional focusing lens as close as possible to the sample plane such that it does not interfere with the camera view.

In this paper, the third combination approach is applied. An additional focusing lens tilted at an angle of 10° with respect to the optical axis and at its focal length distance from the sample plane is placed. This maintains a high through power on the final sample surface and keeps the spot diameter constant as much as possible as the whole FOV is scanned.

5.6 Aperture Placement

To limit the spot diameter, a suitable aperture diameter is chosen. Depending on the filter transmission percentage, the aperture diameter is adjusted to modulate the final irradiance on the sample plane. The aperture positioning is also a crucial factor in the system designing. Optical spatial filtering is based on the Fourier transform property of a lens.

Low-pass filtering is a process which helps in improving the overall beam quality by allowing only the low spatial frequencies to pass through the system and blocking all higher frequencies.

The amplitude and phase information of an image can be altered by Fourier transforming the image using a lens, if an aperture is placed in the Fourier plane, followed by a second lens after the spatial frequency plane inverse Fourier transforms the amplitude transmission function of the filter convolved by the Fourier transform of the object function. [2]

Hence the Fourier plane is an ideal location for the aperture placement. Now by simulating the spot on the sample using different aperture radii, a suitable radius of 0.45 mm is chosen.

6 Simulation Results

6.1 Setup Layout and Optimisations

Considering all functional and constructional requirements, at first a 3D layout of the whole optical system using real lenses is created in the Zemax OpticStudio sequential mode using the light-source analysis module. Later, the system is re-modelled in the non-sequential mode to perform some stray light analysis and tolerancing.

The figure below shows the shaded model layout in Zemax, showing the light source (Kyocera SMD element), interference band-pass filter, aperture, scanning mechanical mirror and the camera field of view which corresponds to the sample plane in figure 5. The final focusing lens is inclined at an angle of 10° with respect to the normal to the optical axis to compensate for the beam-spreading effect on the sample plane as much as possible.

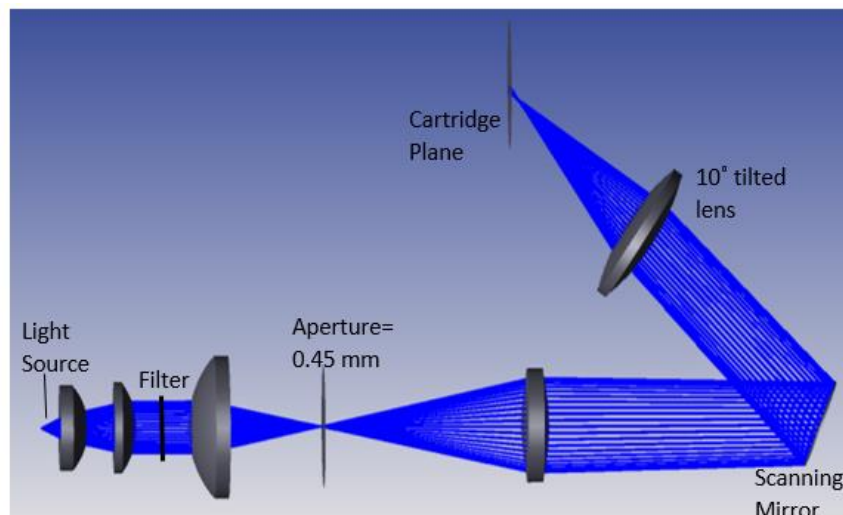


Figure 6: Zemax shaded model layout

As a next step, the required angular limits of the scanning mirror to access the FOV were calculated. Since the projection system consists of a scanning unit, the setup needs to be optimized for multiple configurations of the scanning beam on the sample plane.

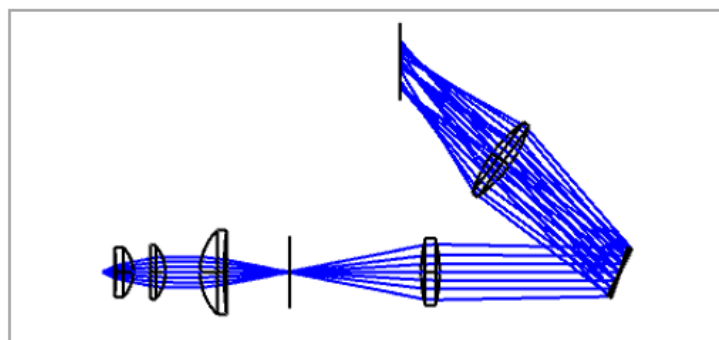


Figure 7: Multi-Configuration Optimisation Layout showing scanning beams at the extreme top, bottom, and centre of the FOV

6.2 Irradiance Profiles

The irradiance profiles of the source and the final detector plane are shown in the figures below and the spot radius is given by x-axis distance measured from the centre corresponding to the y-axis value of the peak irradiance $(I_0)/e^2$ which is the standard calculation for evaluating Gaussian beam waist diameter. The figures show how the spot size varies from being larger at the bottom of the sample plane and decreasing gradually to a small spot at the centre and again increasing at the top of the plane.

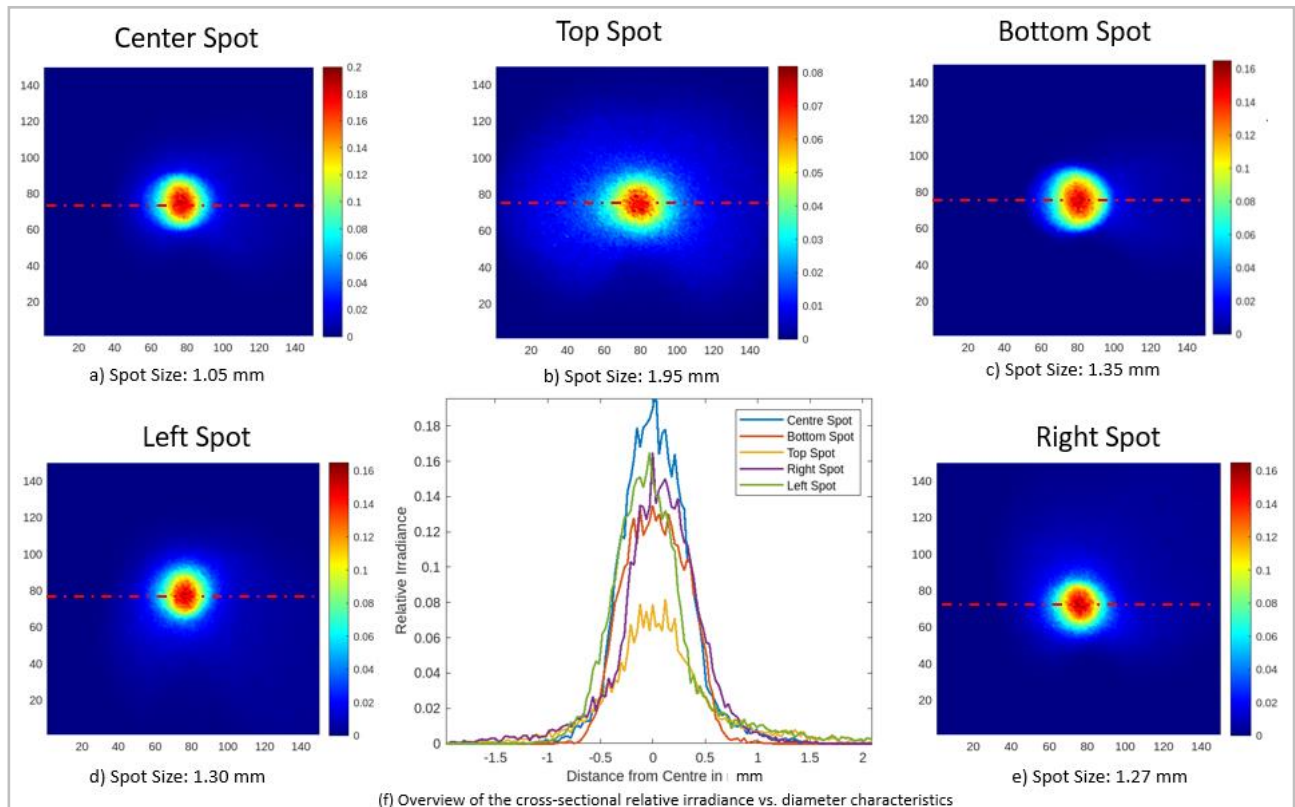


Figure 8:(a)-(e) Irradiance profiles of the final detector plane (sample plane) showing the respective spot diameters

The rate of variation of the spot diameter has been optimized using the Scheimpflug principle. Using this principle, an image plane which is not parallel to the lens plane can be focused.

A comparison between the two instances, one with the 10° tilted lens and the other with the untilted lens is shown in the figures below.

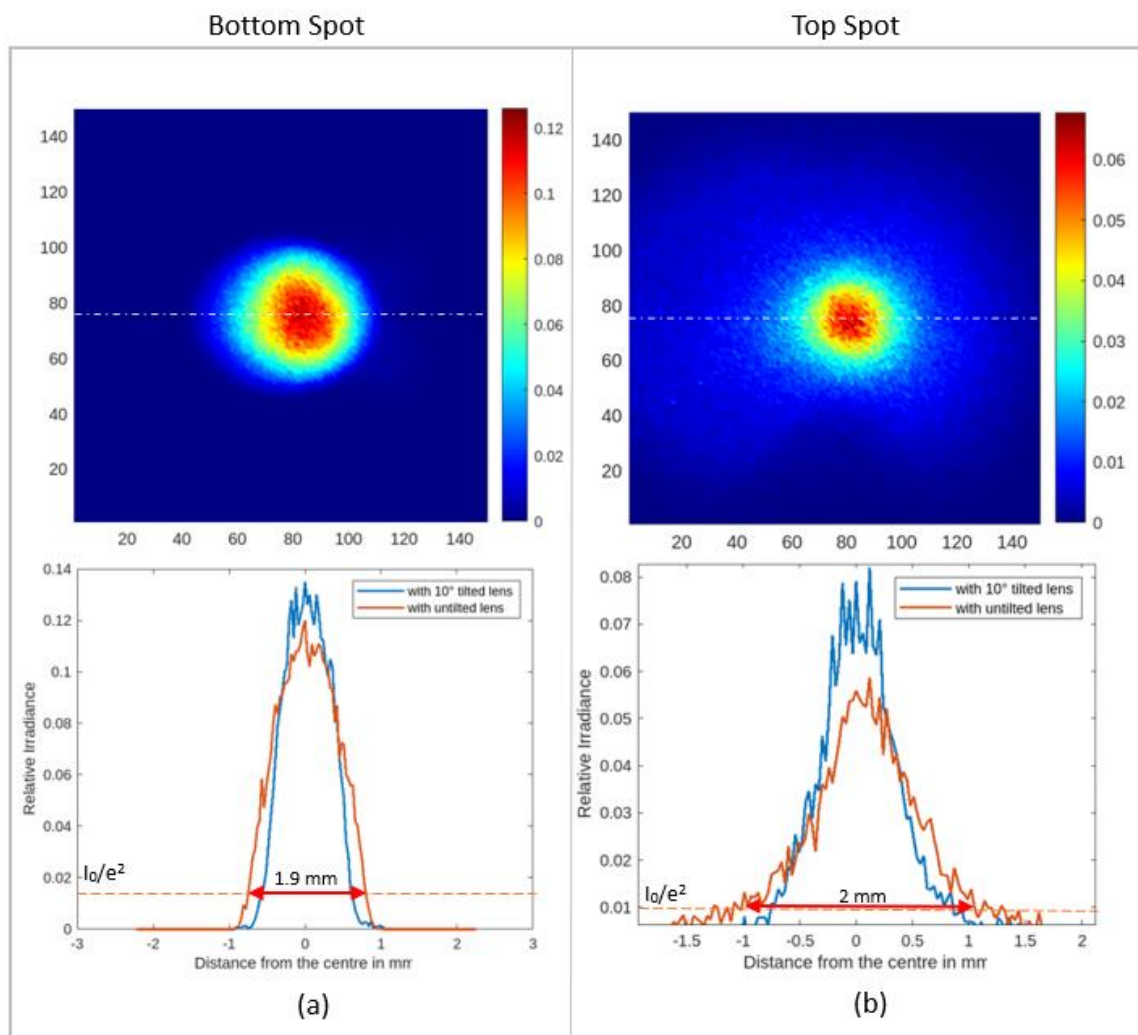


Figure 9: Irradiance profiles (setup with untilted lens) and comparison cross sectional irradiance vs. spot size characteristics showing the measured spot diameters of the bottom and top spots

It is evident from the graphs above that the spot size is larger comparatively at the top and the bottom part of the sample plane when an untilted focusing lens is used, for the same angle of inclination of the scanning mirror. Therefore, it is possible to scan the same FOV while maintaining a higher resolution using a tilted focusing lens.

One of the fundamental factors that might affect the result of the experimentation is the exact position of the light source. Therefore, it is observed that the irradiance output on the final detector plane varies by 1-1.5 mW (power on the final spot: 15.4 mW [4]) when the source position is displaced by $\pm 100 \mu\text{m}$. Apart from the source, some further tolerance analysis is performed on the setup components which helps to decide on the correct mounts for the experimental setup.

6.3 Mechanical Design

After the optical layout of the system with real components is finalized, it is necessary to create the mechanical setup as it should be built up in the lab for experimentation. Therefore, the setup is created in CAD software for clear and better evaluation.

Precise position controls are added to the light source and the adjustable aperture in order to maximize the power output of the system. As a heat sink for the source, a metal adapter plate is used. Figure 9 shows the CAD 3D layout of the optical setup. The available space is limited by the position of the detection unit which is not shown in figure 9. For the scanning system to function efficiently, the distance of the last focusing lens from the scanning mirror as well as the sample plane is extremely critical. The CAD model was constructed considering all the functional and mechanical requirements. The setup is built on a u-shaped customized breadboard and is made portable which allows for testing with or without the detector setup.

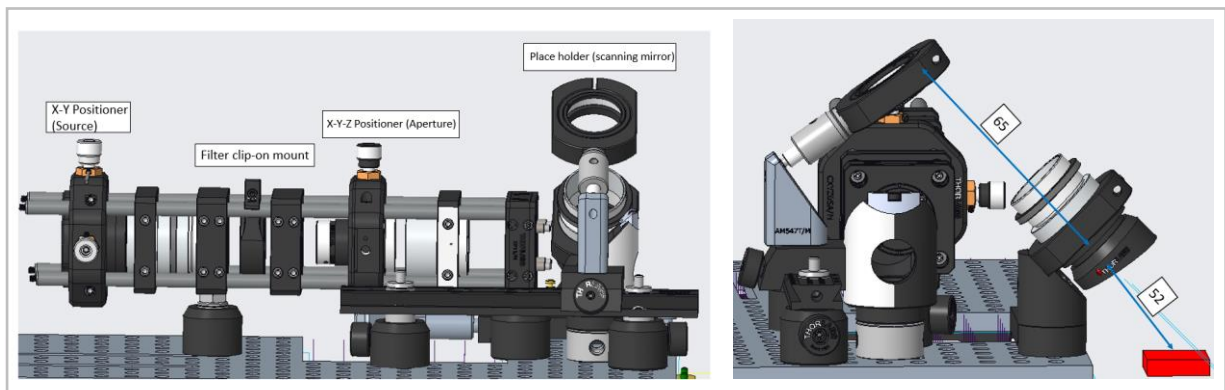


Figure 10: Front and side view of the mechanical setup in CAD 3D layout; In the right picture, the sample plane is given by the red cube and distances from the scanning mirror to the last focusing lens as well as from the last focussing lens to the sample plane are given in millimetre

7 Experimental Setup

The main goals of the lab experiment are to observe and study the spot sizes, irradiance and power levels obtained at the final sample plane as the projection system scans over the entire field of view.

As a first step, the prototype of the projection system is built in the lab following the mechanical design model that is previously built using CAD.

For measurement purposes, a camera with adjustable exposure time and focal length is mounted vertically above the sample plane in order to record images of the light spot at different chosen locations. The light source is operated at the optimum voltage rating of 8.7 V which corresponds to luminous flux of 500 lumens according to the datasheet [6]. The images of the spot were captured at the extreme top, bottom, right and left points of the sample plane.

The images are post processed to analyse the variation of spot size. At the start of camera measurement, a power meter is used to record the output power of the

projection system. In the images shown below, a band pass filter with centre wavelength of 530 nm is mounted. As a result, green light is obtained at the output.

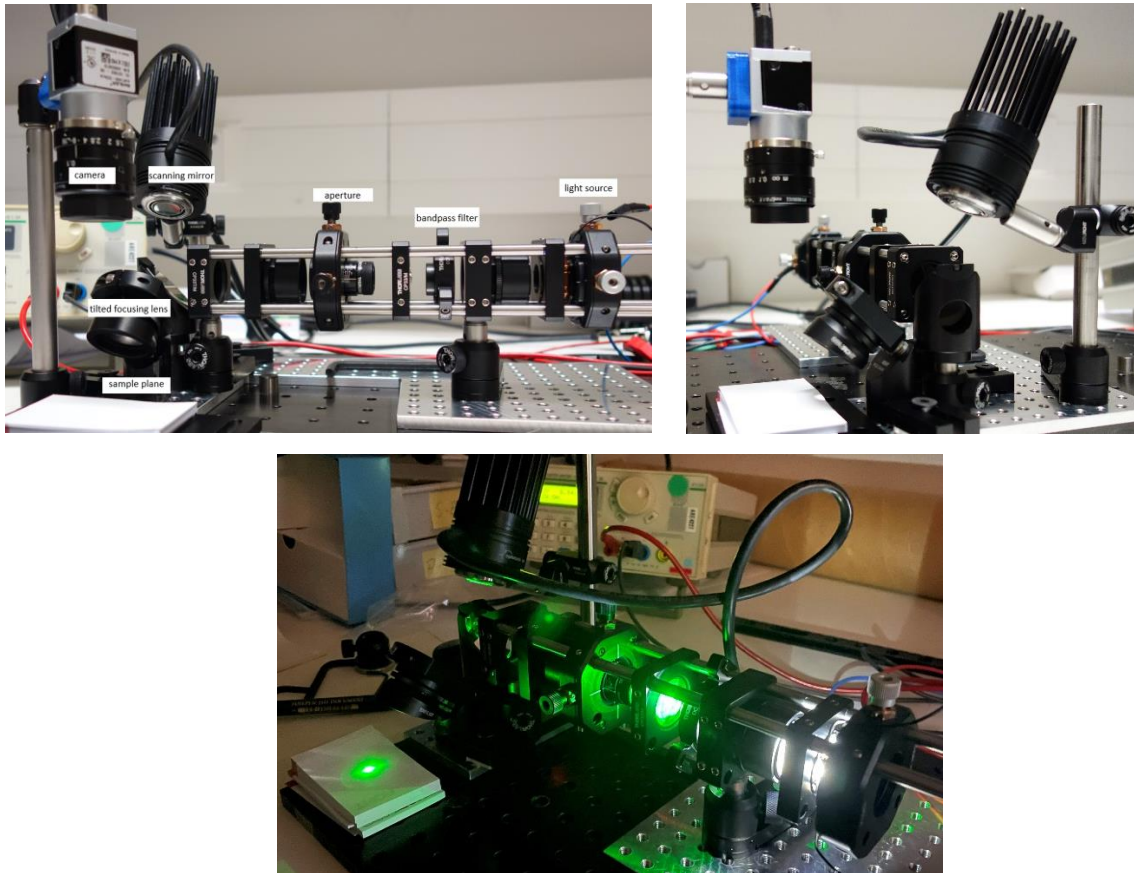


Figure 11: Lab Prototype Setup

8 Results and Discussion

To conclude the experimentation, it is necessary to compare the practical results with the simulations. From the camera image, the irradiance is obtained in the unit of bits. To make the comparison more apprehensible, the irradiance values are converted in the units of mW/mm^2 . The calibration factor is calculated, considering the power meter reading in mW and the scaling factor between pixel to mm using a reference object of known dimensions. The grayscale intensity value obtained in 8 bits is then multiplied with this calibration factor. As a result of this, a direct comparison between the experiment and the simulation is achievable. The following section analyses this comparison.

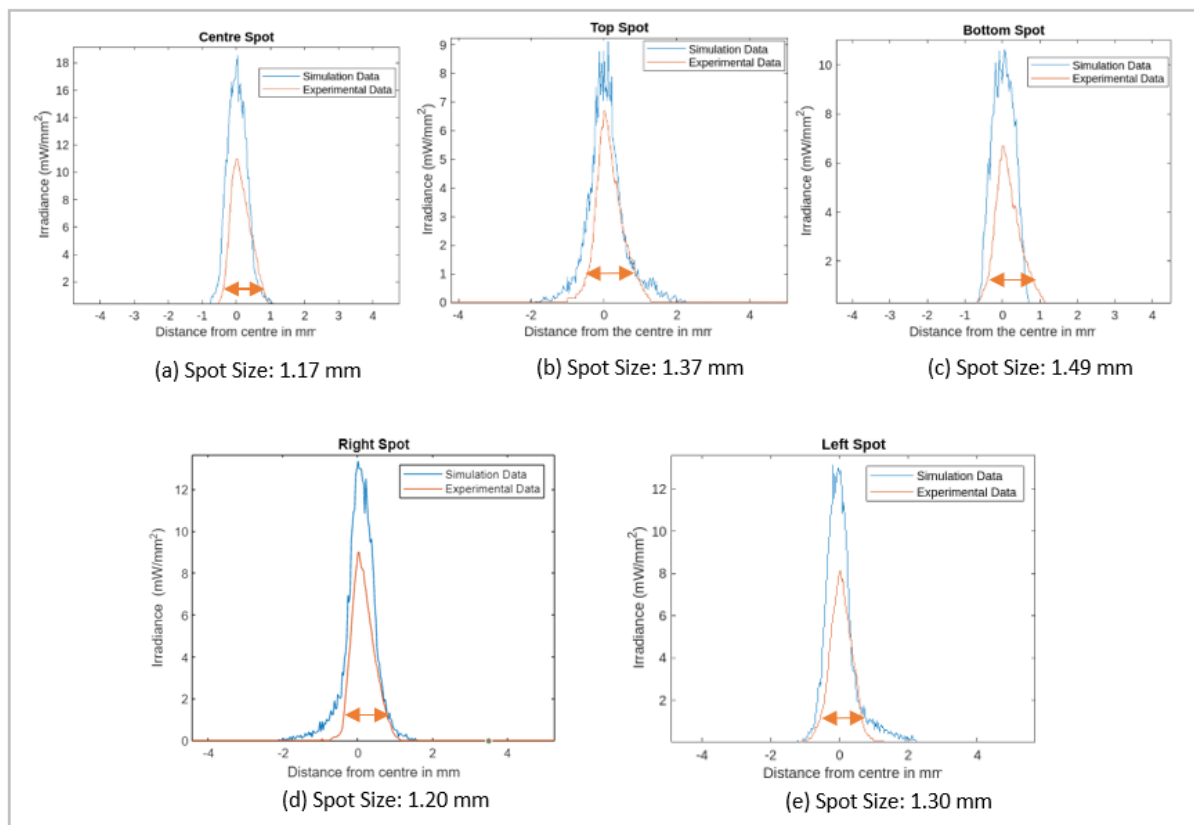


Figure 12: (a)-(e) Comparison plots showing variation between the cross-sectional irradiance value vs diameter for each of the centre, top, bottom, right, left spots as obtained from experimentation (orange curve) and Zemax simulations (blue curve) and the marked arrow corresponds to the experimental spot diameter measurements

It can be inferred from the comparison plots that the total output power in the experimental tests is lower than expected from the simulations. One explanation is the phenomenon of thermal quenching. When operating at the high power, a drop of luminous flux occurs at the output along with a rise in the source temperature. [1]

Apart from thermal degradation, the final efficiency of the system also depends on positioning tolerances and finer aligning of the vital components e.g., the light source, the aperture etc.

9 Conclusions

The first round of experimentation has been performed using the working prototype of the scanning projection system. The measured results comply closely with the simulation results except for a slight dip in the output power. In order to mitigate the problem, finer aligning adjustments of the crucial optical elements e.g., the aperture and the source are to be done to maximize the efficiency. However, more significant focus is on solving the issue of the thermal degradation of the source by using a suitable heat sink coupled with a cooling fan so that the source temperature can be controlled more effectively. For more accurate irradiance analysis, it is planned to use

a beam profiler for carrying out the measurements. In the future, the setup is to be integrated to a laboratory setup including a detection unit to perform a demo test.

10 Acknowledgement

The authors acknowledge the support of Navid Soltani, Marcus Liebler and Dieter Amesöder giving advice on critical components in the mechanical design of the flying-spot projection system.

11 References

- [1] Hagemann V, Seidl A and Weidmann G, “Static Ceramic Phosphor Assemblies for high power high luminance SSL-light sources for digital projection and specialty lighting”, Light-Emitting Devices, Materials and Applications XXIV, 2020.
- [2] Bahaa E. A. Saleh, Teich M.C., “Fundamentals of Photonics”, Wiley Blackwell, pp. 108-156, 2019.
- [3] Optotune AG, “MR-E-2 Operation Manual”, March 2023.
- [4] Kyocera, Kyocera SLD Laser LaserLight SMD 500 Technical Documentation, August 2022.
- [5] Merklinger H. M., “Principles of View Camera Focus”, May 1996.
- [6] Mouser, www.mouser.de/new/kyocera-avx/kyocera-sld-laserlight-smds/, Accessed 24 May 2023.

Entwicklung von Straßenbeleuchtungskonzepten mittels LED-Technik zur Verbesserung der visuellen Wahrnehmung von Radfahrern

Frithjof Hansen, Prof. Dr. Stephan Völker

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, Fakultät IV, Elektrotechnik und Informatik, Einsteinufer 19, 10587 Berlin

Zusammenfassung

Radfahrende im Straßenverkehr sind durch den motorisierten Verkehr besonders gefährdet. Eine Ursache für ihr Sicherheitsrisiko ist die verminderte Sichtbarkeit bei unzureichender Straßenbeleuchtung.

Das Forschungsvorhaben der TU Berlin untersucht die Auswirkungen bestehender Beleuchtungsvorgaben für Radwege auf die Sichtbarkeit von Radfahrenden und prüft die Notwendigkeit neuer Planungsparameter. Hierfür wurden photometrische Messungen an Unfallorten durchgeführt. Die Auswertung der Daten zeigt, dass die Einhaltung der normativen Beleuchtungsvorgaben nicht immer gewährleistet ist. Niedrige Visibility Level deuten auf eine unzureichende Sichtbarkeit hin. Im Rahmen des Projektes werden neue photometrische Parameter entwickelt, die eine sichtbarkeitsbasierte Beleuchtungsplanung ermöglichen.

Schlagwörter: Straßenbeleuchtung, Radverkehrswege, Sichtbarkeit, Radfahrende

1 Einleitung

Fließender Radverkehr findet entweder im Mischverkehr mit dem motorisierten Verkehr auf der Fahrbahn statt oder auf gesonderten Radverkehrsanlagen, die den motorisierten Verkehr durch Markierung, bauliche oder verkehrsregelnde Maßnahmen abgrenzen.

Mit Radverkehrsanlagen kann der Verkehrsfluss für Kraftfahrzeuge sowie für Radfahrende verbessert werden. Zudem soll die Verkehrssicherheit durch die Trennung bzw. Abgrenzung vom motorisierten Verkehr erhöht werden.

Untersuchungen der Unfallforschung der Medizinischen Hochschule Hannover zeigen jedoch höhere Unfallzahlen mit Radfahrenden auf von der Fahrbahn getrennten Radwegen gegenüber dem Mischverkehr auf der Fahrbahn [1]. Insbesondere an Knotenpunkten kommt es häufig zu gefährlichen Konfliktsituationen zwischen dem Rad- und Kraftfahrzeugverkehr, wo mehr als die Hälfte der Unfälle mit Radfahrbeteiligung stattfinden. Auch insgesamt zeigen die jährlichen Unfallzahlen des Statistischen Bundesamtes einen Anstieg der Radfahrunfälle, bei simultan allgemein sinkenden Unfallzahlen (Tab. 1).



Jahrestabellen

1.1 Das Straßenverkehrsunfallgeschehen von Kraft- und Fahrrädern im Überblick

	2000	2005	2010	2015	2017	2018	2019	2020	Veränderung 2020 gegenüber 2019 in %
Unfälle insgesamt	382 949	336 619	288 297	305 659	302 656	308 721	300 143	264 499	- 11,9
dar.: Unfälle mit Beteiligung von Fahrern von									
Kraftfahradern mit Versicherungskennzeichen ¹	19 184	17 609	17 003	15 466	13 750	14 683	13 748	12 086	- 12,1
Kraftfahradern mit amtlichen Kennzeichen ²	39 348	34 266	25 915	29 295	28 120	30 174	26 938	25 120	- 6,7
Fahrrädern ³	73 927	78 678	65 647	78 341	79 826	88 472	87 253	91 533	+ 4,3

Tab. 1: Zunehmende Unfallzahlen mit Radfahrbeteiligung bei insgesamt sinkenden Unfallzahlen [2]

Das Sicherheitsrisiko von Radfahrenden wird auf verschiedene Ursachen zurückgeführt. Studien der TU Berlin [3] [4] zeigen die hohe Bedeutung einer verminderten Sichtbarkeit aus Sicht des Kraftfahrenden und Fußgängers insbesondere bei Dämmerung und in den Dunkelstunden durch eine unzureichende ortsfeste Straßenbeleuchtung.

In dem Forschungsvorhaben der TU Berlin werden aktuelle Vorgaben und Praktiken zur Beleuchtung von Radwegen im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Sichtbarkeit von Radfahrenden untersucht und die Notwendigkeit neuer Planungsparameter überprüft. Mit Hilfe photometrischer Messungen an Radunfallorten im Raum Hannover wurden Sichtbarkeiten bei typischen Unfallszenarien erfasst und Indizien für eine weitergehende sichtbarkeitsbasierte Parameterentwicklung gesammelt.

2 Normative Vorgaben für Radwegbeleuchtung

Bei der Auslegung der ortsfesten Straßenbeleuchtung findet die DIN EN 13201 Anwendung. Sie teilt sich in insgesamt fünf Teile. Der erste Teil [5] kategorisiert beleuchtete Verkehrsflächen in sogenannte M-, P- und C-Klassen mit bis zu sieben Abstufungen. Für die unterschiedlichen Beleuchtungsklassen werden im zweiten Teil [6] Vorgaben für das mittlere Beleuchtungsstärkeniveau auf Verkehrsflächen mit überwiegendem Fuß- und Radverkehr (P-Klasse) und Konfliktzonen (C-Klasse) sowie ein mittleres Leuchtdichteniveau auf Verkehrsflächen mit überwiegend motorisiertem Verkehr (M-Klasse) gegeben.

Von der Fahrbahn vollständig separierte Radwege werden in der Norm im Regelfall als P-Klasse angesehen. Die Einteilung der Radwege in die Abstufungen der Klassen P1 bis P6 erfolgt auf Basis der Summe gewichteter Auswahlparameter, wie in Tabelle 9 der DIN 13201-1 dargestellt (Tab. 2). Neben baulichen Parametern fließen auch Verkehrsdaten und Umgebungsleuchtdichten in die Bestimmung des Wichtungswertes ein. Ein hoher Wichtungswert resultiert in gesteigerten Anforderungen an die Auslegung der ortsfesten Beleuchtungsanlagen mit der Klasse P1 am oberen und der Klasse P6 am unteren Ende der Skala.

Tabelle 9 — Radwege für P-Klassen

Auswahlparameter	Optionen/Auswahlmöglichkeit	Wichtungswert V_W	Gewählter Wichtungswert	
Betriebsart	Zweirichtungsverkehr	1		
	Einrichtungsverkehr	0		
Lagebezug zu angrenzenden Verkehrsflächen	sonstige	1		
	bauliche Abgrenzung oder räumlich getrennt ^a	0		
Zwischenwert				
Variable Parameter für die adaptive Beleuchtung	Optionen/Auswahlmöglichkeit	Wichtungswert V_W	Zeitpunkt	
			t_0	t_1
Radverkehrsfluss	normal	0		
	gering	-1		
Verkehrsart / Zusammensetzung	Radfahrer und Fußgänger	1		
	reiner Radverkehr	0		
Leuchtdichte der Umgebung	hoch	1		
	mittel	0		
	gering	-1		
Erhöhte Anforderungen	vorhanden	1		
	nicht vorhanden	0		
		Summe der Wichtungswerte V_{WS}		
		Beleuchtungsklasse $P = 6 - V_{WS}$		
Die beiden Radverkehrsflächen „Radfahrstreifen“ und „Schutzstreifen“ („Angebotsstreifen“) müssen beleuchtungstechnisch als zur Fahrbahn gehörig behandelt werden. Die zu verschiedenen Zeiten realisierten Beleuchtungsklassen dürfen sich um nicht mehr als drei Stufen der Beleuchtungsklassen verändern.				
^a Abgrenzung per Gitter, Geländer, Schutzvorrichtung und ähnliches oder räumlicher Abstand zu umliegenden Verkehrsflächen mind. 1,5 m				

Tab. 2: Auswahlkriterien der geeigneten P-Klassen für Radwege [5]

Die Anforderungen für Beleuchtungsanlagen von P-klassifizierten Radwegen basieren im Wesentlichen auf dem Wert der mittleren horizontalen Beleuchtungsstärke, wie in Tabelle 3 der DIN EN 13201-2 gezeigt (Tab. 3).

Tabelle 3 — P-Beleuchtungsklassen^{N2)}

Klasse	Horizontale Beleuchtungsstärke		Zusätzliche Anforderungen falls Gesichtserkennung erforderlich ist	
	\bar{E}^a [minimaler Wartungswert]	E_{min} [Wartungswert]	$E_{v,min}$ [Wartungswert]	$E_{sc,min}$ [Wartungswert]
	lx	lx	lx	lx
P1	15,0	3,00	5,0	5,0 ^{N2)}
P2	10,0	2,00	3,0	2,0
P3	7,50	1,50	2,5	1,5
P4	5,00	1,00	1,5	1,0
P5	3,00	0,60	1,0	0,6
P6	2,00	0,40	0,6	0,2 ^{N2)}
P7	unbestimmte Anforderung	unbestimmte Anforderung		

^a Um Gleichmäßigkeit sicherzustellen, darf der tatsächliche Wert des Wartungswertes der mittleren Beleuchtungsstärke das 1,5-fache des für die Klasse vorgesehenen Mindestwertes \bar{E} nicht überschreiten.

ANMERKUNG 4 Eine hohe Farbwiedergabe trägt zu einer besseren Gesichtserkennung bei.

Tab. 3: Anforderungen an P-Klassen [6]

Verläuft der Radweg direkt neben der Fahrbahn oder ist mit dieser identisch, wird die Radspur undifferenziert als M-Klasse mitbeleuchtet.

In Bereichen, in denen sich Verkehrsströme mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten kreuzen, fordert die Norm die Anwendung von C-Klassen. Diese definieren in der Regel ein höheres und gleichmäßigeres Beleuchtungsniveau, gemessen als horizontale Beleuchtungsstärke, als es in den M- oder P-Klassen gefordert wird. Die Auswahl der spezifischen C-Klassen erfolgt über die Klasseneinteilung der an der Konfliktzone beteiligten Verkehrsströme. Die Beleuchtungsklasse muss mindestens eine Stufe höher als die der angrenzenden Klasse mit den höchsten Anforderungen gewählt werden. Das Anforderungsprofil der einzelnen C-Klassen ist in Tab. 4 einzusehen.

Tabelle 2 — C-Beleuchtungsklassen, basierend auf der Fahrbahnbeleuchtungsstärke

Klasse	Horizontale Beleuchtungsstärke	
	\bar{E} [minimaler Wertungswert] lx	U_0 [Mindestwert]
C0	50	0,40
C1	30	0,40
C2	20,0	0,40
C3	15,0	0,40
C4	10,0	0,40
C5	7,50	0,40

Tab. 4: Parameteranforderung für C-Klassen [6]

3 Messmethodik

In Kooperation mit der Medizinischen Hochschule Hannover wurden die Unfalldaten der GIDAS (German In-Depth Accident Study) Datenbank im Raum Hannover mit Fokus auf den Radverkehr ausgewertet. Untersucht wurden Unfälle mit Radfahrerbeteteiligung unter Ausschluss von Alleinunfällen mit dem Ziel, Unfälle in denen mangelnde Sichtbarkeit des Radfahrenden durch den motorisierten Verkehr als Unfallursache anzunehmen ist, zu filtern und genauer zu analysieren. An ausgewählten Unfallorten, welche einen Querschnitt verschiedener Kreuzungssituationen und Beleuchtungsklassen darstellen, wurden photometrische Daten nacherfasst und die Beleuchtungssituation durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung auf ihre Auswirkungen auf die Sichtbarkeit des Unfallbeteiligten Radfahrenden ermittelt. Aus 22 prinzipiell geeigneten Unfällen wurden fünf Unfallstellen ausgewählt und in zwei Nächten zwischen dem 15.11.2022 und dem 17.11.2022 in Hannover vermessen. Verwendet wurde eine kalibrierte Leuchtdichtkamera LMK6 der Firma TechnoTeam mit zwei Objektiven (25 mm, 50 mm) und ein Beleuchtungsstärkemesskopf. Erhoben wurden Werte dreier verschiedener Messkonstellationen, die nachfolgend genauer beschrieben werden:

3.1 Messaufbau: Adaptionsstrecke

Im Anfangsaufbau wurde die Leuchtdichtkamera mit einem 50 mm Objektiv in einer Entfernung von 60 Metern zu einem Auswertungsfeld zwischen zwei Leuchtenmasten aufgestellt, das sich auf der Straße befindet, auf der der betroffene PKW vor der Kollision fuhr. Das Auswertungsfeld erstreckt sich über die gesamte Straßenbreite. Mit Hilfe des Leuchtdichtbildes kann die Beleuchtungsklasse der Fahrbahn bestimmt werden. Dies ermöglicht eine Abschätzung der Kurzzeitlichthistorie des PKW-Fahrenden. Dabei wird von einer annähernd symmetrischen Reflexion der Fahrbahnoberfläche ausgegangen, wodurch eine Invertierung der Perspektive des Aufbaus mit kleinem Fehler ermöglicht wird. Dies ermöglicht auch die Messung

kurviger Einmündungsstraßen und einen praktikablen Ablauf. Der Messaufbau ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

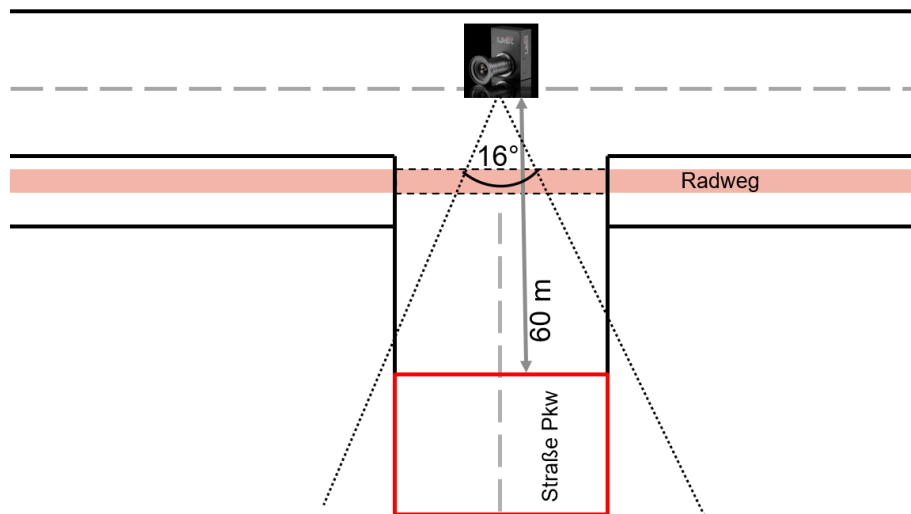


Bild 1: Messung der Leuchtdichte der Adaptationsstrecke des PKW mit 50 mm Objektiv

3.2 Messaufbau: Unfallstelle

In der zweiten Messkonstellation wurde die Leuchtdichtekamera mit einem 25 mm Objektiv in einer Entfernung von 10 m von der Unfallstelle (kreuzender Radweg) positioniert. Diese Entfernung stellt den letztmöglichen Reaktionspunkt des Pkw-Fahrenden vor der Kollision dar (s. Rechnung dritter Messaufbau). Das Messfeld erstreckt sich über die Breite der zuführenden Fahrbahn und wird in der Länge durch die gegenüberliegende Bordsteinkante und den Rand des kreuzenden Radwegs begrenzt. In der Mitte des Messfeldes wurden an drei Positionen Graukarten aufgestellt, jeweils eine horizontal ausgerichtete Graukarte in Höhe der Fahrbahn mit einem Reflexionsgrad von 0,3 und eine vertikal zur Kamera ausgerichtete Graukarte in 1,30 m Höhe mit einem Reflexionsgrad von 0,2. Die gewählten Positionen der Graukarten und der allgemeine Messaufbau sind in Bild 2 dargestellt. Aus den Leuchtdichtewerten der Graukarten kann bei bekanntem Reflexionsgrad die Beleuchtungsstärke (horizontal und vertikal) berechnet werden. Für die Kontrolle der Plausibilität der berechneten Beleuchtungsstärken wurden zusätzlich Messungen mit dem Beleuchtungsstärkemesskopf an denselben Positionen durchgeführt. Diese Messungen ermöglichen die Bestimmung der Beleuchtungsverhältnisse an der Unfallstelle, wie sie dem PKW-Fahrenden bei Zufahrt dargeboten wurden, und eine Einschätzung der Beleuchtungsklasse.

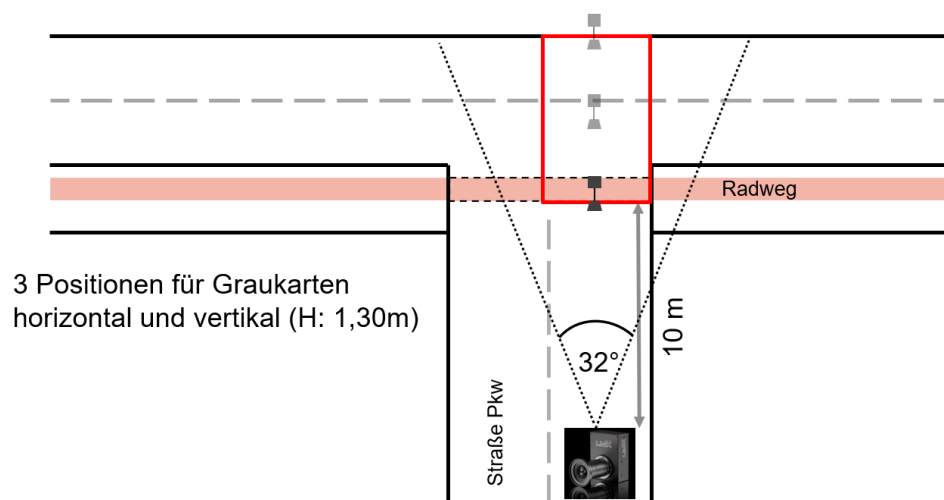


Bild 2: Vermessung der Unfallstelle aus 10m Distanz mit einem 25 mm-Objektiv.

3.3 Messaufbau: Visibility Level

Die letzte Messanordnung diente der Ermittlung des Visibility Levels (VL - Definition nach Adrian [7]) des Radfahrenden aus Sicht des in den Unfallort einfahrenden Pkw. Erfasst wurde aufgrund der beliebig komplexen, dynamischen Unfallsituation nur das VL im letztmöglichen Moment der Reaktion zur Vermeidung der Kollision, welcher mit 10 m Entfernung von der Unfallstelle definiert wurde. Diese Annahme wird durch allgemeine Geschwindigkeitsannahmen der Unfallbeteiligten und den resultierenden Wegstrecken und Anhaltewegen bestimmt: Für den Radfahrenden wird eine mittlere Geschwindigkeit von 23 km/h (6,4 m/s) [8] angenommen, während für den Autofahrenden eine Restgeschwindigkeit von 25 km/h beim Einfahren in die Kreuzung veranschlagt wird. Es wird von einer Reaktionszeit von 1s und einer Gefahrenbremsung ausgegangen.

Um den Anhalteweg eines PKW bei einer bestimmten Geschwindigkeit zu berechnen, werden der Reaktionsweg des Fahrers und der Bremsweg des PKW addiert.

Die (Faust)formel lautet:

$$\text{Mit Reaktionsweg} = \frac{\text{Geschwindigkeit}}{10} \times 3 \times 1s = \frac{6,94m/s}{10} \times 3 \times 1s = 7,5m$$

$$\text{und (Gefahren)bremsweg} = \left(\frac{\text{Geschwindigkeit}}{10}\right)^2 \div 2 \times 1s = \left(\frac{6,94m/s}{10}\right)^2 \div 2 \times 1s = 3,13m$$

$$\text{ergibt sich der Anhalteweg des PKW zu } 7,5m + 3,13m = 10,63m$$

Aus messpraktischen Erwägungen wird der Abstand der Leuchtdichtkamera von der Kollisionsstelle auf 10 m gerundet. Die zurückgelegte Wegstrecke des Radfahrenden berechnet sich bei einer geschätzten Anhaltezeit von 2 sec. wie folgt:

$$\text{Wegstrecke} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Zeit} = 6,4 \frac{m}{s} \times 2s = 12,8m \approx 13m$$

Eine Graukarte mit Reflexionsgrad 0,2 wurde daher stellvertretend für den Radfahrenden in 1,30 m Höhe 13 m entfernt zum Ort der Kollision entlang des Radweges platziert.

Der Messaufbau (Bild 3) simuliert also, ob es dem PKW-Fahrenden in einer Entfernung von 10 m von der Unfallstelle möglich war, den 13 m entfernten Radfahrenden auf dem Radweg zu erkennen.

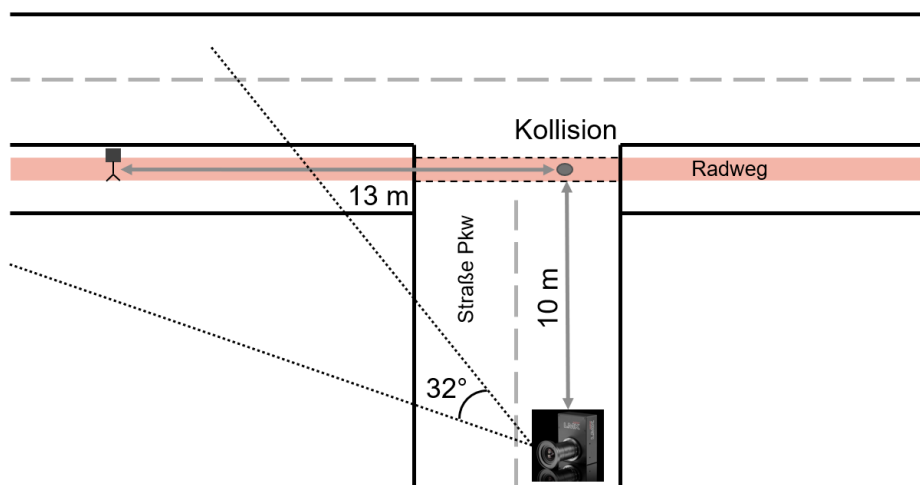


Bild 3: Ermittlung des VL des Radfahrenden aus der Perspektive des Unfallgegners mittels 25 mm-Objektiv

Neben der Erfassung der photometrischen Daten, wurde für alle fünf Unfallorte eine Ortsbeschreibung protokolliert, mit Angaben zur Lufttemperatur, zur Bebauung, dem Zustand des Straßenbelags und dem Mastabstand.

4 Durchführung und Auswertung

4.1 Analyse der Messdaten

Die aufgenommenen Leuchtdichtebilder der Unfallstellen wurden in der Software LMK LabSoft ausgewertet und die Einhaltung der anzusetzenden Beleuchtungsklasse überprüft. Ergänzend wurden über die Anforderungen an die Beleuchtungsklassen hinausgehende Parameter, wie Minimalwerte und Schwellenwerterhöhung erfasst.

Mithilfe des Visibility Level als Kontrastmaß wurde eine Abschätzung zur Sichtbarkeit des Radfahrenden vorgenommen. Die verwendete Methodik kann die Situation aufgrund der hohen Dynamik nicht vollständig beschreiben, jedoch als Indikation schlechter Sichtverhältnisse dienen.

4.2 Beleuchtungsklassen – Adaptationsstrecke

In Tab. 5 sind, sortiert nach Unfallnummern, die photometrischen Parameter der Straße aufgelistet, welche der Pkw im Zeitraum vor der Kollision befuhr (Messaufbau 1). Konkret wurden folgende Größen im Auswertungsfeld erhoben:

- Mittlere Leuchtdichte \bar{L}
- Minimale Leuchtdichte L_{min}
- Gesamtgleichmäßigkeit U_0
- minimale Längsgleichmäßigkeit U_l
- Schwellenwerterhöhung f_{TI}

Basierend auf den örtlichen Begebenheiten erfolgte eine Zuordnung zu den entsprechenden Beleuchtungsklassen. In der „Soll“ Spalte werden die Grenzwerte der Bewertungsgrößen abhängig von der zugeordneten Beleuchtungsklasse aufgeführt und den tatsächlichen Messwerten in der „Ist“ Spalte gegenübergestellt. Der Farbcode symbolisiert die Einhaltung der Grenzwerte (Grün) bzw. das Über- oder Unterschreiten der Vorgaben (Rot). Die Grenzwerte für die Leuchtdichte bei P-Klassen ergeben sich aus den Äquivalenzwerten zur Beleuchtungsstärke nach Tabelle 12 in der DIN 13201-1 [5]. Aufgrund der mangelnden Kenntnis des genauen Reflexionsgrades wird nach Empfehlung der Norm der Wert $\rho = 0,15$ verwendet.

	Unfall 1 (P5)		Unfall 2 (M6)		Unfall 3 (P5)		Unfall 4 (M6)		Unfall 5 (M6)	
	Soll	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist
\bar{L} in $\frac{cd}{m^2}$	0,15	0,43	0,3	0,28	0,15	1,38	0,3	0,63	0,3	0,28
L_{min} in $\frac{cd}{m^2}$	0,03	0,12	-	-	0,03	0,51	-	-	-	-
U_0	-	-	0,35	0,43	-	-	0,35	0,26	0,35	0,44
U_l	-	-	0,4	0,23	-	-	0,4	0,05	0,4	0,28
$max. f_{TI}$ in %	30	1,77	20	1,85	30	0,3	20	0,7	20	1,89

Tab. 5: Bewertungsgrößen nach DIN EN 13201 im Auswertungsfeld – Adaptationsstrecke

Der Auswertung zufolge wurde die Norm bei Unfall 1, 3 und 4 eingehalten. Unfall 3 weist dabei ein ungewöhnlich hohes Beleuchtungsniveau auf. Die Werte der Unfälle 2 und 5 liegen geringfügig unter den nach Norm geforderten Werten.

Bei den Unfällen 2, 4 und 5 können Mängel in der Gleichmäßigkeit festgestellt werden. Besonders Unfall 4 liegt mit dem Wert 0,05 weit vom geforderten Wert 0,4 in der Längsgleichmäßigkeit entfernt.

Eine Blendung durch die Straßenbeleuchtung kann aufgrund der geringen TI-Werte bei allen Unfällen nicht vermutet werden.

4.3 Beleuchtungsklassen – Unfallstelle

Der nächste Auswertungsschritt befasste sich mit der Beleuchtungssituation an der Unfallstelle (Messaufbau 2). Die aufgeführten Bewertungsgrößen in Tab. 6 sind, wie zuvor, nach Unfallnummer sortiert und in „Soll“ und „Ist“-Spalten unterteilt. Erhoben wurden folgende Größen:

- Mittlere Leuchtdichte \bar{L}
- Mittlere horizontale Beleuchtungsstärke \bar{E}_h
- Mittlere vertikale Beleuchtungsstärke \bar{E}_v in 1,30 m Höhe
- Gesamtgleichmäßigkeit U_0
- minimale Längsgleichmäßigkeit U_l
- Schwellenwerterhöhung f_{TI}

Die Werte der Beleuchtungsstärken wurden, wie im Messaufbau beschrieben, mittels der Graukarten im Messfeld, bzw. im Falle von Unfall 1 mithilfe des Beleuchtungsstärkemesskopfs ermittelt, da eine Auswertung aus der Leuchtdichteaufnahme in diesem Fall aufgrund einer Messspanne nicht fehlerfrei möglich war.

Eine abschließende Beurteilung nach DIN EN 13201 ist aufgrund des Messabstands von 10 m und dem daraus resultierenden steileren Winkel nicht legitim. Dennoch ergeben die Messwerte ihrer Gesamtheit eine gute Einschätzung der Beleuchtungssituation, wie sie dem Pkw-Fahrenden dargeboten wird. Die angesetzten Beleuchtungsklassen bieten dabei einen hilfreichen Rahmen.

	Unfall 1 (C3)		Unfall 2 (M3)		Unfall 3 (M4)		Unfall 4 (M5)		Unfall 5 (FÜ*)	
	Soll	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist
\bar{L} in $\frac{cd}{m^2}$	0,75	0,32	1	0,44	0,75	0,27	0,5	0,35	1,5	2,31
\bar{E}_h in lx	15	1,9	-	9,82	-	5,43	-	7,83	-	33,88
\bar{E}_v in lx	-	1,00	-	6,30	-	4,93	-	3,38	4,00	11,54
U_0	0,4	0,25	0,4	0,49	0,4	0,42	0,35	0,63	0,4	0,26
U_l	-	-	0,6	0,55	0,6	0,14	0,4	0,51	0,7	0,22
max. f_{TI} in %	20	0,50	10	0,09	15	3,11	20	0,343	10	0,15

Tab. 6: Bewertungsgrößen nach DIN EN 13201 im Auswertungsfeld – Unfallstelle

Auffallend mangelnde Beleuchtungsbedingungen zeigen sich an der Stelle des Unfalls 1, welche aufgrund der abknickenden Vorfahrtstraße und einmündenden Straße mit kreuzendem Radweg als Konfliktzone einzustufen wäre.

Auch Unfall 2,3 und 4 erreichen die für die jeweilige Beleuchtungsklasse geforderten Mittelwerte der Leuchtdichte nicht. Jedoch weisen diese Zonen eine deutlich bessere Gleichmäßigkeit gegenüber Unfall 1 und 5 auf. Die Beleuchtungsstärken im Auswertungsfeld indizieren ein generell akzeptables Beleuchtungsniveau.

Der hohe Wert der Leuchtdichte bei Unfall 5 ist durch die anteilige Position des Auswertungsfeldes innerhalb eines hellerleuchteten Fußgängerüberweges zu erklären.

4.4 Visibility Level

Tab. 7 zeigt die errechneten Visibility Level nach Adrians des Radfahrenden aus der Perspektive des Kraftfahrzeugführenden.

	Unfall 1	Unfall 2	Unfall 3	Unfall 4	Unfall 5
Adrian	3	15	16	3	8

Tab. 7: VL des Radfahrenden für 5 Messorte (gerundet auf \mathbb{Z})

Die Werte der Visibility Level deuten große Unterschiede in der Sichtbarkeit zwischen den fünf Unfallorten an. Während in Unfall 2 und 3 ein vergleichsweise hohes VL errechnet wurde, liegen die Werte bei Unfall 1 und 4 im niedrigen einstelligen Bereich. Damit sind die Ergebnisse nicht zwangsläufig deckungsgleich zu den Einschätzungen der Beleuchtungssituation am Unfallort. Unfall 1 zeigt das geringste Sichtbarkeitsniveau bei zugleich mangelhafter Beleuchtung an der Unfallstelle. Dieser Zusammenhang ist bei Unfall 4 deutlich weniger signifikant. Im Falle von Unfall 2 und 3 ist ein deutlich höheres VL im Vergleich zu Unfall 4 zu erkennen, obwohl nur geringe Unterschiede in den Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken vorliegen. Unfall 5 liegt im akzeptablen Grenzbereich, indiziert jedoch herausfordernde Sichtbedingungen.

5 Fazit

Die Analyse der Unfalldaten und der darauf basierenden Messungen an Unfallstellen im Raum Hannover zeigt, dass die Einhaltung der Vorgaben für die Beleuchtungsklassen nicht in allen Fällen gewährleistet ist. Es gab Fälle, in denen die tatsächlichen Beleuchtungsstärken die geforderten Werte nicht erreichten oder überschritten, was auf eine teilweise unzureichende Umsetzung der Normen hinweist.

Gleichwohl korrelierten niedrige Visibility Level nicht zwangsläufig mit nicht-normengerechter Beleuchtung. Das deutet darauf hin, dass eine Beleuchtung von Radwegen nach aktuellen Vorgaben die Sichtbarkeit von Radfahrern nicht hinreichend sicherstellen kann, wenn davon ausgegangen wird, dass ein Visibility Level von mindestens 10 unter Feldbedingungen für eine zuverlässige Sichtbarkeit benötigt wird [9].

Besonders in Kreuzungssituationen mit dem motorisierten Verkehr, in denen die Sichtbarkeit des Radfahrers essenziell ist, müssen neue photometrische Parameter entwickelt und erprobt werden, die eine sichtbarkeitsbasierte Beleuchtungsplanung ermöglichen. Dieses ist die Zielsetzung des laufenden Forschungsvorhabens.

6 References

- [1] M. Jänsch and H. Johannsen, “Unfallanalyse der GIDAS Daten,” MH Hannover, Hannover, 2022.
- [2] Statistisches Bundesamt (destatis), “Verkehrsunfälle - Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr 2020,” 2021. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/unfaelle-zweirad-5462408207004.pdf?__blob=publicationFile
- [3] A. H. Kopp, “Fotometrische Analyse von Radfahr- und Fußgängerunfallsschwerpunkten,” Bachelorarbeit, Lichttechnik, TU Berlin, Berlin, 2020.
- [4] S. Maus, “Ganzheitliche Bewertung öffentlicher Straßenbeleuchtungen mittels lichttechnischer Messungen und Kosten-Nutzen-Analysen,” Bachelorarbeit, Lichttechnik, TU Berlin, Berlin, 2015.
- [5] *Straßenbeleuchtung - Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen*, 13201-1:2021-09, DIN, Berlin, 2021.
- [6] *Straßenbeleuchtung - Teil 2: Gütemerkmale*, 13201-2:2016-06, DIN, Berlin, 2016.
- [7] W. Adrian, “Visibility of targets: Model for calculation,” *Lighting Research & Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 181–188, 1989, doi: 10.1177/096032718902100404.
- [8] Statista, “Erfasste Durchschnittsgeschwindigkeit von Fahrradfahrern in Deutschland nach Bundesländern im Jahr 2018* (in km/h).,” 2018. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/872531/umfrage/geschwindigkeit-der-fahrradfahrer-in-deutschland-nach-bundeslaendern/>
- [9] W. Adrian, “Visibility Level und die Sichtbarkeit in der Straßenbeleuchtung,” *LICHT*, vol. 1993, no. 10, pp. 734–739, 1993.

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE 82.0761/2021 durchgeführten Forschungsarbeit im Rahmen des Forschungsprogramms Straßenverkehrssicherheit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

Der Weg zur effizienten Belichtungsregelung in Algen-Photobioreaktoren

Tim Hegemann, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Adaptive Lichttechnische Systeme
und Visuelle Verarbeitung, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Zusammenfassung

Zur effizienten Belichtungsregelung in Algen-Photobioreaktoren müssen viele Regelparameter aufeinander abgestimmt werden. Neben den aktuellen Lichtbedingungen sorgen Vorhersagen der zu erwartenden Tageslichtmenge sowie der Energiepreise für langfristig energieeffiziente Regelstrategien im Algenanbau. Maßgebende Messgröße für das Tageslicht ist hierbei die photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD). In diesem Paper werden drei Methoden zur Bestimmung der PPFD von Tageslichtspektren mit kostengünstigen Spektrosensoren vorgestellt. Die erste Methode schätzt die PPFD anhand der Kanalempfindlichkeitskurven. Bei der zweiten Methode wird die PPFD auf der Grundlage der berechneten ähnlichsten Farbtemperatur (CCT) und einer spektralen Rekonstruktion unter Verwendung des CIE-Tageslichtmodells berechnet. Und die dritte Methode basiert auf einem Regressionsmodell zur Berechnung der PPFD. Es wird gezeigt, dass die tatsächlichen Tageslichtspektren zu stark vom CIE-Tageslichtmodell abweichen, um eine hinreichende Aussage zur PPFD zu treffen. Abschließend erfolgt ein Test der Robustheit dieser Methoden anhand von realen Messdaten, die mit den Sensoren im Freien bei verschiedenen Tageslichtverhältnissen erzeugt wurden.

Index Terms: Algenbelichtung, Spektrosensorik, Messtechnik, Modellierung

1 Einleitung

Die Belichtung von konservativen Algen-Photobioreaktoren erfolgt häufig ausschließlich durch Sonnenlicht. In modernen Photobioreaktoren dagegen wird bereits additiv, jedoch oft pauschal von außen, belichtet. Durch die Verwendung von integrierten Lichtquellen mit auf den Reaktor abgestimmten Einkoppeloptiken kann die Effizienz eines Photobioreaktors gesteigert werden. Für eine weitere Effizienzsteigerung bedarf es jedoch zusätzlicher Regelung, welche das zur Verfügung stehende, sowie das zu erwartende Tageslicht berücksichtigt und den Anteil künstlicher Belichtung dynamisch anpasst. Durch den Einsatz von optischen



Messsystemen kann das aktuelle Tageslicht und somit die aktuelle Belichtungssituation erfasst und in das Regelsystem gegeben werden. Mithilfe kurzfristiger Energiekostenprognosen können Regelstrategien vorgeplant und die Effizienz maximiert werden.

Maßgebende Messgröße für das Tageslicht ist hierbei die photosynthetisch aktive Photonenflussdichte (PPFD) welche angibt, wie viele Photonen im Spektralbereich der PAR-Strahlung (400 nm bis 700 nm) pro Fläche und Zeiteinheit aufgenommen werden. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der PPFD ist es möglich, die Lichtsumme eines Flächenelements über den gesamten Tag zu bestimmen (Tageslichtintegral (DLI)).

Das Algenwachstum wird vor allem durch Temperatur, Nährstoffzufuhr und Licht beeinflusst. Ähnlich zum Algenanbau werden im modernen Gartenbau Gärtner zunehmend durch Technologie unterstützt, um die für Pflanzen wichtigen Umgebungsparameter zu erfassen und den Anbau so effizient wie möglich zu gestalten. So werden z.B. Entscheidungen über die Temperierung oder Bewässerung im Gewächshaus durch gängige Sensoren unterstützt [1].

Das für Pflanzen relevante Licht, d.h. das Licht, welches zur Photosynthese der Pflanze beiträgt, ist nach McCree 1972 als photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) für den Bereich von 400nm bis 700nm definiert [2]. Innerhalb des PAR-Bereichs werden alle Photonen ohne weitere Gewichtung summiert. Anbauer und Landwirte messen die photosynthetisch aktive Photonenflussdichte (PPFD) in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, was angibt, wie viele Photonen im Spektralbereich der PAR-Strahlung pro Fläche und Zeiteinheit empfangen werden. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der PPFD ist es möglich, die Lichtsumme eines Flächenelements über den gesamten Tag zu bestimmen, was als Tageslichtintegral (DLI) bezeichnet wird.

Wird das Tageslichtintegral über die Lebensdauer einer Pflanze dokumentiert, kann mithilfe geeigneter kulturabhängiger Modelle eine Vorhersage des Wachstums und der Blüte gemacht werden. Vorhersagemodelle für den DLI auf der Grundlage der Sonneneinstrahlung werden von Albright et al. vorgeschlagen [3].

Für die Messung der PPFD wurden in früheren Arbeiten verschiedene Ansätze verfolgt. Wie von Ross und Sulev dargelegt, können verschiedene Techniken verwendet werden: (1) Spektrometer, (2) Pyranometer mit halbkugelförmigen Glasfiltern oder (3) Sensoren auf der Basis von Silizium-Photodioden (Quantensensoren) [4-18].

Bei Messungen mit Spektrometern bleibt die spektrale Zusammensetzung als Information erhalten, wobei Spektrometer für die meisten Anwendungen zu teuer oder für die Umgebungsbedingungen am Messort ungeeignet sind. Pyranometer werden zur Messung der Sonnenstrahlung, einschließlich des IR-Bereichs bis etwa $2,8 \mu\text{m}$, eingesetzt. Im Gartenbau werden heute Quantensensoren eingesetzt, die das einfallende Licht mit Photodioden erfassen. Zu diesem Zweck wird ein optischer Filtersatz verwendet, um das einfallende Spektrum nach der Photonenenergie sowie der spektralen Empfindlichkeit des Empfängers zu gewichten. Die Information über die spektrale Zusammensetzung des einfallenden Lichts geht dabei verloren. Die

Genauigkeit von Quantensensoren ist sehr unterschiedlich und hängt weitgehend von der spektralen Empfindlichkeit des Sensors und der Lichtquelle ab. Barnes et al. zeigen zum Beispiel, dass eine höhere Genauigkeit bei breiten Spektren erreicht wird. Fehler von mehr als 30 % konnten sowohl von Blonquist et al. als auch von LI-COR in Experimenten mit verschiedenen Sensor-Lichtquellen-Paarungen ermittelt werden [19-21].

Neuere Arbeiten haben bereits das Potenzial von Spektrosensoren für die Messung der PPFD gezeigt. [22-24]

Aufgrund ihres Aufbaus können Spektrosensoren jeweils nur einen schmalen Teil des einfallenden Spektrums erfassen. Zu diesem Zweck werden Arrays von Fotodioden in der Regel mit einzelnen optischen Filtern beschichtet. In Kombination mit den Filtereigenschaften und der Empfindlichkeit des Halbleiters entstehen so optische Bandpassfilter. Je nach Anzahl und Verteilung der verschiedenen Fotodioden-Filter-Kombinationen (Kanäle) kann der Verlust an spektraler Information reduziert werden. Je nach Anwendung werden optische Filter zur Anpassung der Empfindlichkeitsfunktion und für (1) spektrale Messungen, (2) eine Anpassung an die Farbempfindlichkeitskurven des Auges, (3) eine Anpassung an die Lichtausbeutefunktion für photopisches Sehen $V(\lambda)$ und (4) einen Fit zur Berechnung der R-G-B-Komponenten verwendet. Keiner dieser Filter ermöglicht eine direkte Messung der PPFD, aber diese Filter können verwendet werden, um Informationen über das Spektrum zu erhalten. Dies ermöglicht die Berechnung eines Umrechnungsfaktors zur Berechnung der PPFD aus der gemessenen Bestrahlungsstärke.

2 Methoden

In dieser Arbeit werden verschiedene Methoden zur Berechnung der PPFD in der Praxis verifiziert. Zu diesem Zweck wurden an mehreren Tagen zeitsynchron Tageslichtmessungen mit einem Spektrosensor (AS7341, ams-OSRAM AG) und einem Handspektrometer (CSS45, Gigahertz Optik GmbH) durchgeführt. Der Spektrosensor verfügt über 8 Kanäle im sichtbaren Bereich sowie über einen Kanal im IR-Bereich und einen ohne Filteroptik [25].

Aufgrund der IR-Empfindlichkeit einiger Spektralkanäle des Spektrosensors wurde ein IR-Filter (FESH0750, Thorlabs) vorgeschaltet. Um die Messungen vergleichbar zu machen, wurde die Integrationszeit für jede Verstärkungsstufe konstant gehalten. Zwischen jeder Messung wurde eine Dunkelstrommessung mit dem Spektrometer und eine Verstärkungseinstellung des Spektrosensors durchgeführt.

Bei der ersten Methode wird eine reduzierte PAR-Gewichtungsfunktion zur Berechnung der PPFD verwendet. Bei der zweiten Methode wird das CIE-Tageslichtmodell zur Schätzung der PPFD verwendet, und die dritte Methode stützt sich auf ein Gauß-Modell zur Berechnung der PPFD. Für diese Methoden werden die spektralen Empfindlichkeitskurven der Kanäle des Spektralsensors benötigt. Diese werden mithilfe eines Monochromators (LOT MSH-300) und einer Xenon-Lichtquelle in einer Ulbricht-Kugel bestimmt. Ein Spektrometer (Spectro 320, Instrument Systems) wird als Referenz verwendet.

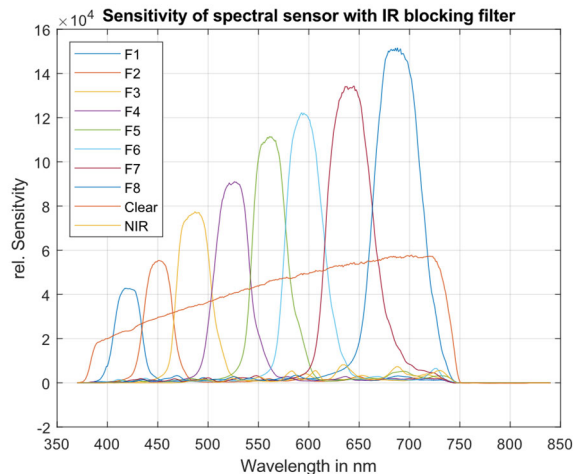


Abbildung 1: Gemessene und berechnete Kanalempfindlichkeiten des verwendeten Spektralsensors

Die in Abbildung 1 dargestellten Empfindlichkeitskurven werden für den Spektralsensor mit der einfachen Schätzmethode nach HP Laboratories ermittelt. [26,27]

Mithilfe des Spektrums des einfallenden Lichts und der Empfindlichkeitskurven der Kanäle lässt sich die für den Kanal relevante spektrale Bestrahlungsstärke berechnen. Die Umrechnung der spektralen Bestrahlungsstärke in PPFD kann mithilfe einer PAR-Gewichtungskurve $W(\lambda)$ und Umrechnungsfaktoren erfolgen [24].

$W(\lambda)$ ist eine Funktion zur Gewichtung der spektralen Bestrahlungsstärke nach dem Energiegehalt der Photonen bei der spezifischen Wellenlänge λ und ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Umrechnung der energiebezogenen Größe $W \text{ m}^{-2}$ in die Größe $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erfolgt über das Plancksche Wirkungsquantum h ($6,6261 \times 10^{-34} \text{ J s}$), die Avogadro-Konstante N_A ($6,0221 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) und die Lichtgeschwindigkeit c ($299\,792\,458 \text{ m/s}$).

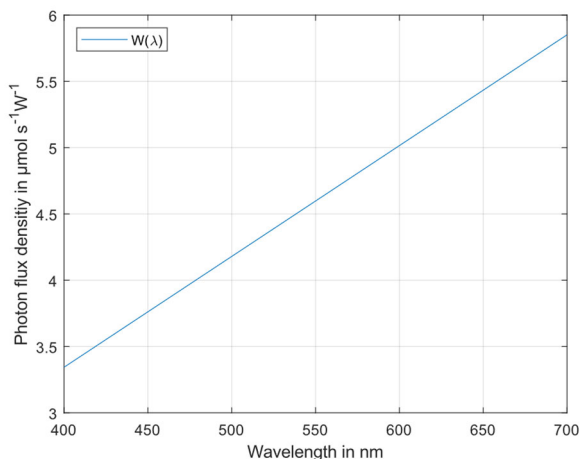


Abbildung 2: PAR-Gewichtungsfunktion $W(\lambda)$. Außerhalb des Par Bereichs ist die Funktion gleich null.

$$W(\lambda) = \frac{\lambda}{h \cdot c \cdot N_A} \quad (1)$$

Die erste Methode zur Berechnung der PPFd mithilfe von Spektralsensoren basiert auf den Empfindlichkeiten $S_n(\lambda)$ der Kanäle. So wird die Funktion $W(\lambda)$ mithilfe der Empfindlichkeiten und eines Faktors simuliert, welcher vom Wert der Funktion $W(\lambda)$ bei der mittleren Wellenlänge jedes Kanals abhängt. Durch Integration der einfallenden Spektren ($E_e(\lambda)$) mit der Empfindlichkeitskurve jedes Kanals $S_n(\lambda)$ und deren Gewichtung mit dem Wert der $W(\lambda)$ -Kurve bei der entsprechenden Mittenwellenlänge jedes Kanals, kann eine simulierte Kanal-PPFD ($PPFD_n$) ermittelt werden.

$$PPFD_n = W(\lambda_{center}) \int_{400}^{700} S_n(\lambda) \cdot E_e(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Durch Division des $PPFD_n$ -Wertes und des gemessenen Kanalwertes F_n kann der Skalierungsfaktor α_n für jeden Kanal ermittelt werden.

$$\alpha_n = \frac{PPFD_n}{F_n} \quad (3)$$

$$PPFD = \sum_{n=1}^8 F_n \cdot \alpha_n \quad (4)$$

Die Summe dieser faktorisierten Kanäle ergibt die PPFd der einfallenden Spektren. Wegen der Überlappung der Kanäle ist ein Offset zur Korrektur erforderlich. Um die Werte von α_n zu ermitteln, wurden die Daten in Trainingsdaten (80%) und Testdaten (20%) aufgeteilt.

Bei der zweiten Methode wird die Farbkoordinate aus den Kanälen des Spektralsensors mithilfe eines Regressionsmodells berechnet. Anhand der Farbkoordinaten und der Umrechnung nach McCamy kann die Farbtemperatur CCT berechnet werden [28]. Mithilfe des CIE-Tageslichtspektrums kann ein entsprechendes Tageslichtspektrum mit der berechneten Farbtemperatur erzeugt werden und mithilfe der $W(\lambda)$ -Kurve die PPFd berechnet werden [29].

Außerdem wird ein Modell verwendet, um die CCT direkt aus den Messwerten der Kanäle des Spektralsensors zu approximieren.

Die dritte Methode nutzt ein Regressionsmodell, um die PPFd direkt aus den gemessenen Kanalwerten zu berechnen.

3 Ergebnisse

Für diese Arbeit wurden nur Messwerte eines Verstärkungsfaktors mit fester Integrationszeit verwendet, um Nichtlinearitäten zwischen Verstärkungsstufen auszuschließen. Der Datensatz umfasst 276 Messpunkte und wurde in 80 % Trainingsdaten und 20 % Testdaten aufgeteilt.

Methode 1

Abbildung 3 zeigt die mit Gleichung 4 vorhergesagte PPFD im Vergleich zu der mit dem Referenzgerät gemessenen PPFD. Es ist zu erkennen, dass es möglich ist, die PPFD zu schätzen, aber sie weist eine hohe Varianz auf. Mit dieser Methode ergibt sich ein R^2 von 0,92 und ein RMSE von 86,75. Die zur Gewichtung der gemessenen Kanalwerte verwendeten Faktoren sind in Tabelle 1 aufgeführt.

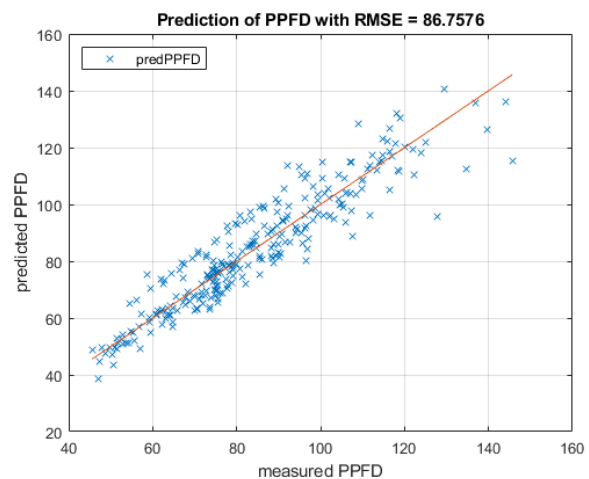


Abbildung 3: Berechnung der PPFD in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mit der Methode 1 bei der Verwendung aller 8 Kanäle im sichtbaren Bereich.

Tabelle-1: Übersicht der Kanäle des AS7341 mit der mittleren Wellenlänge, PAR-Gewichtungsfaktor sowie Gewichtungsfaktor α_n .

Kanal	Mittlere Wellenlänge in nm	$W(\lambda)$ in $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$	α_n
1	415	3.452	0.056
2	445	3.703	0.063
3	480	3.995	0.056
4	515	4.204	0.059
5	555	4.539	0.057
6	590	4.915	0.056
7	630	5.249	0.055
8	680	5.751	0.054

Methode 2

Bei der zweiten Methode wird zuerst der Farbart (x, y, z) anhand der Spektralkanäle mithilfe eines Regressionsmodells berechnet. Die Kanäle 3, 5 und 8 werden für die Modellierung verwendet, da diese jeweils einen Kanal aus dem roten, blauen und grünen Spektralbereich abdecken. Die Verwendung aller Kanäle für die Modellierung führte nicht zu signifikanten Verbesserungen. Es wurden verschiedene Ansätze aus den Bereichen lineare Regression, Regressionsbäume, Support-Vektor-Maschinen, Gaußsche Prozessregression (GPR) und neuronale Netze getestet. Ein Modell aus der Gaußschen Prozessregression erwies sich als das beste Modell.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die mit dem Modell berechneten Farbkoordinaten (x , y) im Vergleich zu denen der Referenz. Mit einem RMSE von 0,0014 für x und 0,0012 für y können die Farbkoordinaten ausreichend gut berechnet werden.

Die aus den Farbkoordinaten mit McCamy berechneten Farbtemperaturen sind in Abbildung 6 dargestellt.

Im Vergleich dazu zeigt ein anderes GPR-Modell die direkte Berechnung der Farbtemperatur aus den Kanalwerten (Abbildung 7). Durch die Modellierung der CCT direkt aus den Kanalwerten (RMSE=79,2) ist die Vorhersage der CCT wie erwartet genauer als die Modellierung der Farbkoordinaten und die Berechnung der CCT (RMSE=92,44).

Für die Berechnung der CIE-Tageslichtspektren unter Verwendung des CIE-Tageslichtmodells mit einem absoluten Wert wird ein Skalierungsfaktor benötigt. Dieser Skalierungsfaktor konnte durch Verwendung der Referenzspektren und Aufteilung der Daten in Trainings- und Testdaten ermittelt werden.

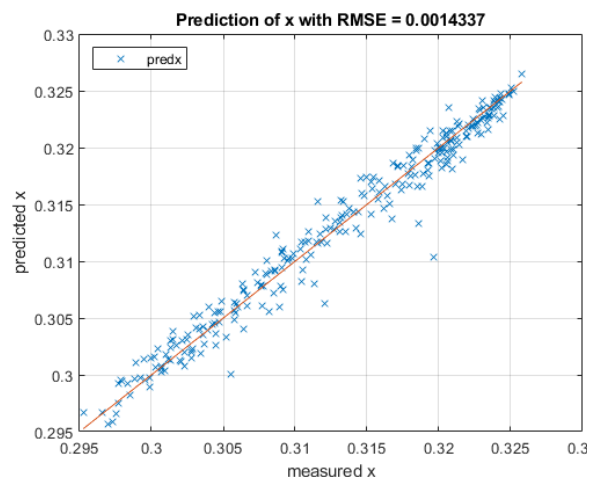


Abbildung 4: Berechnung der Farbkoordinate x mithilfe des GPR-Modells.

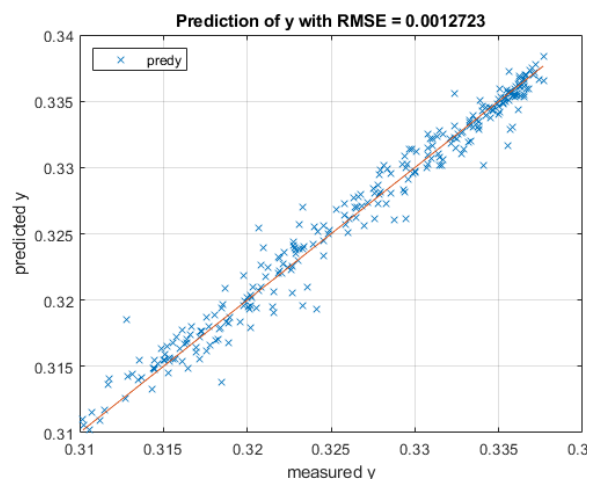


Abbildung 5: Berechnung der Farbkoordinate y mithilfe des GPR-Modells.

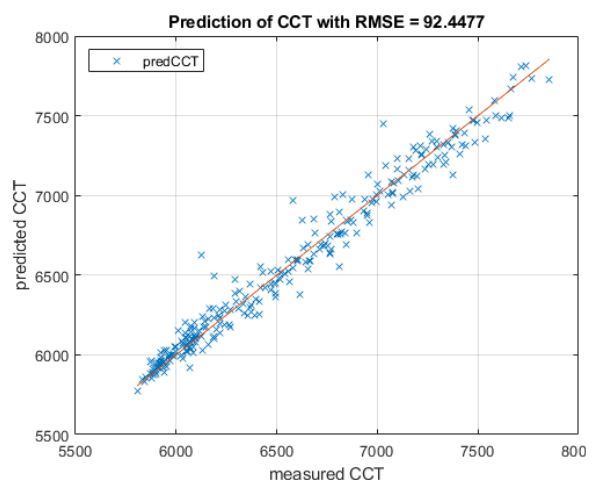


Abbildung 6: Berechnung der CCT aus den Farbkoordinaten nach McCamy.

Die PPFD wird unter Verwendung der beiden berechneten CCT sowie des CIE-Tageslichtmodells berechnet. Die Ergebnisse der beiden PPFD-Berechnungen werden in den Abbildungen 8 und 9 verglichen. Während die direkte Berechnung der CCT aus den Kanalwerten genauer ist als die Berechnung über die Farbortkoordinate, zeigen beide Methoden bei der Berechnung der PPFD ungefähr die gleiche Genauigkeit. Die Berechnung über die Farbortkoordinate ist mit einem RMSE=73 minimal besser als die über die Kanalwerte mit einem RMSE=74,2. Beide Bestimmungen weisen eine hohe Varianz auf und sind für eine präzise PPFD-Bestimmung nicht geeignet.

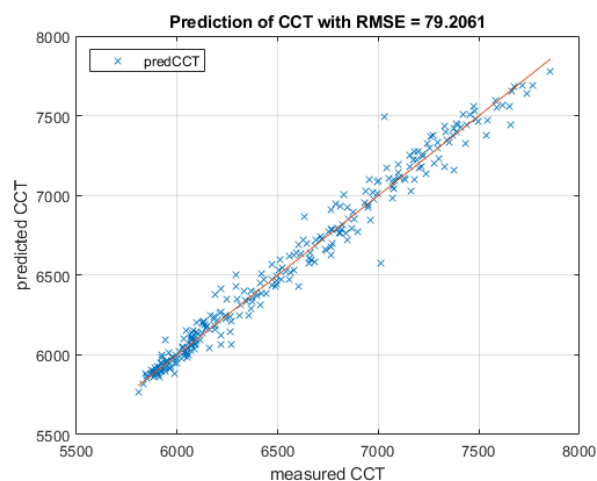


Abbildung 7: Berechnung der CCT anhand der Kanalwerte und dem GPR-Modell.

Die Berechnung über die Farbortkoordinate ist mit einem RMSE=73 minimal besser als die über die Kanalwerte mit einem RMSE=74,2. Beide Bestimmungen weisen eine hohe Varianz auf und sind für eine präzise PPFD-Bestimmung nicht geeignet.

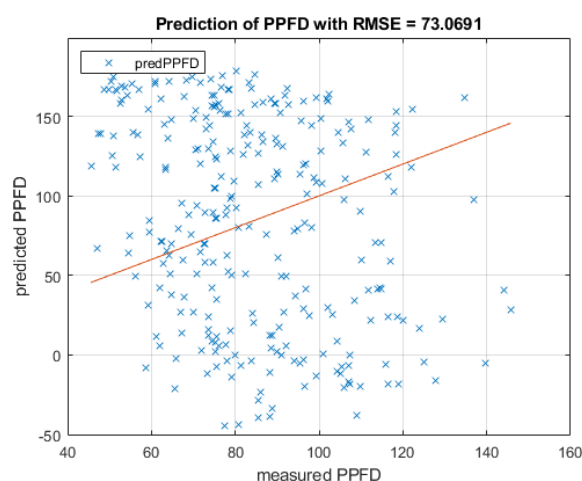


Abbildung 8: Berechnung der PPFD in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mithilfe des CIE-Tageslichtspektrums und Farbtemperaturberechnung nach McCamy.

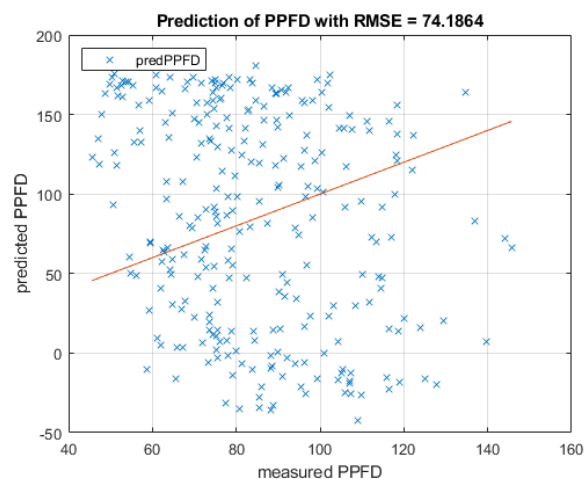


Abbildung 9: Berechnung der PPFD in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mithilfe des CIE-Tageslichtspektrums und Farbtemperaturberechnung mithilfe des GPR-Modells.

Methode 3

Bei der dritten Methode wurden ebenfalls verschiedene Ansätze wie lineare Regression, Regressionsbäume, Support-Vektor-Maschinen, Gaußsche Prozessregression (GPR) und neuronale Netze getestet, um die PPFD direkt aus den Kanalwerten zu bestimmen. Auch hier schnitt ein GPR-Ansatz am besten ab.

Abbildung 10 zeigt erneut den Vergleich zwischen der berechneten PPFD und der gemessenen Referenz (RMSE=3,06).

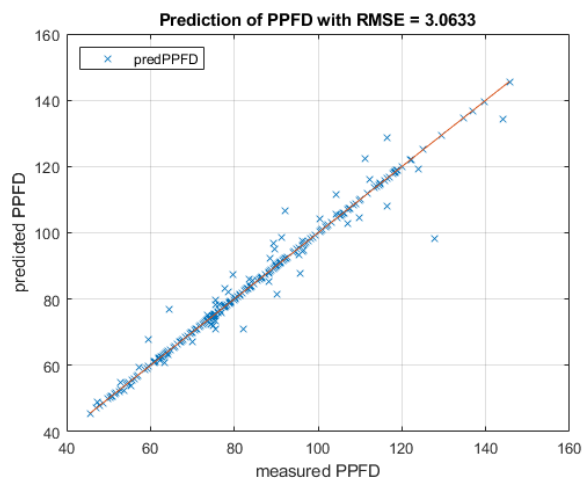


Abbildung 10: Berechnung der PPFD in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aus den gemessenen Kanalwerten unter Verwendung des GPR-Modells.

4 Diskussion

Mit Methode 1 und 3 ist es möglich, die PPFD zu berechnen. Wobei die dritte Methode die genaueste Bestimmung ermöglicht (siehe Tabelle 2). Methode 1 erfordert ein kalibriertes Spektrometer und einen Monochromator für die Berechnung der PPFD_n sowie ein Lichtlabor zur Aufnahme der Empfindlichkeitskurven der Spektralkanäle. Die daraus resultierende Genauigkeit bei der PPFD-Schätzung ist nicht genau genug, um diesen Aufwand zu rechtfertigen. Methode zwei verwendet das CIE-Tageslichtmodell und die CCT oder Farbkoordinaten (x, y, z) zur Bestimmung der PPFD. Die Bestimmung der CCT über beide Methoden ist nicht genau genug, um die PPFD anschließend genau zu bestimmen. Eine weitere Schwäche dieser Methode ist das CIE-Tageslichtmodell, das eine rein farbt temperaturabhängige Spektralverteilung vorsieht. Aufgrund von Standort, Wolken, Schatten oder Partikeln in der Atmosphäre kann die spektrale Verteilung am konkreten Messort jedoch erheblich vom Modell abweichen. Die Berücksichtigung von Standort und Bewölkung kann helfen, das Tageslichtspektrum besser zu modellieren. Auch die Verwendung echter xyz-Sensoren könnte die Bestimmung der CCT verbessern.

Mit der dritten Methode kann ein Modell gefunden werden, das die PPFD auf der Grundlage der Kanalwerte bestimmen kann. Für die Berechnung des Modells wird Rechenleistung benötigt, aber anschließend kann das Modell auch auf Mikrocontroller-Basis übertragen werden, was einen kostengünstigen Sensor mit einem

kostengünstigen Einplatinencomputer kombiniert und somit ein kostengünstiges Messsystem ergibt.

Tabelle-2: Vergleich des RMSE der drei Methoden.

	Methode 1	Methode 2 (xyz)	Methode 2 (CCT)	Methode 3
RMSE	86,75	73,0	74,0	3,06

5 Literaturverzeichnis

- [1] Van Lersel MW, Chappell M, Lea-Cox JD. Sensors for improved efficiency of irrigation in greenhouse and nursery production. HortTechnology 2013; 23: 735–746. DOI: 10.21273/HORTTECH.23.6.735.
- [2] McCree K. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. Agricultural Meteorology 1972; 10: 443–453. DOI: 10.1016/0002-1571(72)90045-3.
- [3] Albright LD, Both AJ, Chiu AJ. Controlling greenhouse light to a consistent daily integral. Transactions of the ASAE 2000; 43: 421–431. DOI: 10.13031/2013.2721.
- [4] Pinho P, Hytönen T, Rantanen M, Elomaa P, Halonen L. Dynamic control of supplemental lighting intensity in a greenhouse environment. Lighting Research and Technology 2013; 45: 295–304. DOI: 10.1177/1477153512444064.
- [5] Schwend T, Beck M, Prucker D, Peisl S, Mempel H. Test of a par sensor-based, dynamic regulation of led lighting in greenhouse cultivation of helianthus annuus. European Journal of Horticultural Science 2016; 81: 152–156. DOI: 10.17660/eJHS. 2016/81.3.3.
- [6] van lersel MW, Gianino D. An adaptive control approach for light-emitting diode lights can reduce the energy costs of supplemental lighting in greenhouses. HortScience 2017; 52: 72–77. DOI: 10.21273/HORTSCI11385-16.
- [7] Federer CA, Tanner CB. Sensors for measuring light available for photosynthesis. Ecology 1966; 47: 654–657. DOI: 10.2307/1933948.
- [8] McCree KJ. A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation. Agricultural Meteorology 1966; 3: 353–366. DOI: 10.1016/0002-1571(66)90017-3.
- [9] Biggs WW, Edison AR, Eastin JD, Brown KW, Maranville JW, Clegg MD. Photosynthesis light sensor and meter. Ecology 1971; 52: 125–131. DOI: 10.2307/1934743.

- [10] Muchow RC, Kerven GL. A low cost instrument for measurement of photosynthetically active radiation in field canopies. *Agricultural Meteorology* 1977; 18: 163–239. DOI: 10.1016/0002-1571(77) 90036-
- [11] Woodward FI. Instruments for the measurement of photosynthetically active radiation and red, far-red and blue light. *Journal of Applied Ecology* 1983; 20: 103–115. DOI: 10.2307/2403379.
- [12] Mims FM III. A 5-year study of a new kind of photosynthetically active radiation sensor. *Photochemistry and Photobiology* 2003; 77(1): 30–33. DOI: 10.1562/0031-8655(2003)0770030AYSOAN2.0.CO2.
- [13] Caya MVC, Alcantara JT, Carlos JS, Cereno SSB. Photosynthetically active radiation (par) sensor using an array of light sensors with the integration of data logging for agricultural application. In: 2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 377–381. DOI: 10.1109/ ccoms.2018.8463321.
- [14] Yadav D, Sumesh M, Beno T, Karanth S, Sadashivappa G. Design of photosynthetically active radiation sensor. *Examines in Physical Medicine and Rehabilitation* 2018; 1(5). DOI: 10.31031/ epmr.2018.01.000521.
- [15] Rajendran J, Leon-Salas WD, Fan X, Zhang Y, Vizcardo MA, Postigo M. On the development of a low-cost photosynthetically active radiation (par) sensor. In: 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1–5. DOI: 10.1109/iscas45731.2020. 9181220.
- [16] McCree K. The measurement of photosynthetically active radiation. *Solar Energy* 1973; 15: 83–87. DOI: 10.1016/0038-092X(73)90010-8.
- [17] Norman JM, Tanner CB, Thurtell GW. Photosynthetic light sensor for measurements in plant canopies. *Agronomy Journal* 1969; 61: 840–843. DOI: 10.2134/agronj1969.00021962006100060004x.
- [18] Ross J, Sulev M. Sources of errors in measurements of PAR. *Agricultural and Forest Meteorology* 2000; 100: 103–125. DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00144-6.
- [19] Barnes C, Tibbitts T, Sager J, Deitzer G, Bubenheim D, Koerner G, et al. Accuracy of quantum sensors measuring yield photon flux and photosynthetic photon flux. *HortScience* 1993; 28: 1197–1200. DOI: 10.21273/HORTSCI.28.12.1197.
- [20] Biosciences LC. Comparison of quantum sensors with different spectral sensitivities. LI-COR Biosciences Technical Note 2018, Retrived from, Spectral sensors to determine photosynthetic photon flux density 11 *Lighting Res. Technol.* 2022; 0: 1–12 <https://www.licor.com/documents/oi26ib7eb6wm5y5u9ebv4b3jodm09tf9>.
- [21] Blonquist M, Johns J. Accurate PAR measurement: comparison of eight quantum sensor models. Apogee Instruments Research Report 2018, Retrived 20th

August 2021 from, <https://www.apogeeinstruments.com/content/Comparison-of-Eight-Quantum-Sensor-Models.pdf>.

[22] Bäumker E, Zimmermann D, Schierle S, Woias P. A novel approach to obtain PAR with a multi-channel spectral microsensor, suitable for sensor node integration. *Sensors* 2021; 21: 3390. DOI: 10.3390/s21103390.

[23] Leon-Salas WD, Rajendran J, Vizcardo M, Postigo-Malaga M, Postigo-Malaga M. Measuring photosynthetically active radiation with a multichannel integrated spectral sensor: 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Daegu, South Korea, May 22–28:2021. DOI:10.1109/iscas51556.2021.9401321.

[24] Hegemann T, Balasus J, Trinh Q, Herzog A, Khanh T. Using spectral sensors to determine photosynthetic photon flux density in daylight – A theoretical approach. *Lighting Research & Technology*. April 2022. doi:10.1177/14771535221077881

[25] AMS. AS7341 11-channel multi-spectral digital sensor. Retrived 20th August 2021 from, https://ams.com/documents/20143/36005/AS7341_DS000504_3-00.pdf.

[26] Vora PL, Farrell JE, Tietz JD, Brainard DH. Digital color cameras - 2 - spectral response. HP Laboratories Technical Report 1997: 97–54.

[27] Hubel PM, Sherman D, Farrell JE. A comparison of methods of sensor spectral sensitivity estimation. HP Laboratories Technical Report 1994: 45–48.

[28] McCamy CS. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. DOI: 10.1002/col.5080170211

[29] CIE. Technical Report 015:2008 Colorimetry. 4th Edition. Vienna: CIE, Central Bureau, 2018. ISBN 978-3-902842-13-8. DOI: 10.25039/TR.015.2018.

Probandenversuch zur Ermittlung von Grenzwerten für Farbsäume bei Optiken für die Allgemeinbeleuchtung

Marie Henning

TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

BJB GmbH & Co. KG

Abstract/Zusammenfassung

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde ein Versuch zur Ermittlung von Grenzwerten für Farbsäume durchgeführt. Das Ziel dieses Versuches war es, Werte zu ermitteln die in der Optikentwicklung verwendet werden können um vorab beurteilen zu können, ob die Farbsäume störend sind oder akzeptiert bzw. nicht gesehen werden.

Dazu wurde ein Versuch im Labor aufgebaut, bei dem Probanden aus der Entwicklungsabteilung ihre Beurteilung zu 15 verschiedenen Optiken bezüglich der Farbsäume abgegeben haben. Diese subjektiven Bewertungen wurden anschließend mit Messwerten der Optiken verglichen. Es wurden dazu verschiedene Möglichkeiten der Auswertung erprobt.

Zudem wurde der Versuch in LightTools nachgebaut und ein Vergleich zwischen den Messwerten und den Simulationsergebnissen gezogen.

Index Terms: Farbsäume, Allgemeinbeleuchtung,

1 Einleitung

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde ein Probandenversuch durchgeführt, um Grenzwerte für Farbabstände von Farbsäumen zu ermitteln. Das Ziel bestand darin, festzustellen, welche Farbabstände als Grenzwerte für die Simulation von Farbsäumen verwendet werden können und ob es dabei Abweichungen zur Realität gibt. Der Versuch wurde in einem bestimmten Szenario durchgeführt, welches die realen Bedingungen widerspiegelte. Die Teilnehmer wurden gebeten, verschiedene Farbsäume zu beurteilen, indem sie die Zonen bestimmten, in denen sie den Übergang von einer Farbe zu einer anderen wahrnehmen konnten. Dabei wurden unterschiedliche Optiken verwendet, um sowohl gute als auch schlechte Ergebnisse abzudecken.

Nach Abschluss des Probandenversuchs wurden die erhobenen Daten analysiert. Es wurde überprüft, ob konsistente Muster bei den Bewertungen der Farbabstände identifiziert werden konnten. Anschließend wurde das Versuchsszenario in einer Simulation nachgebildet. Dabei wurden die ermittelten Grenzwerte der Farbabstände aus dem Probandenversuch als Referenz verwendet. In der Simulation wurde



überprüft, ob diese Grenzwerte auch gültig waren oder ob es größere Abweichungen gab. Die Ergebnisse des Probandenversuchs und der Simulation wurden analysiert und miteinander verglichen. Des Weiteren wurden die Grenzwerte aus dem Probandenversuch betrachtet und überprüft, ob sie auch für die Simulation geeignet sind.

Es folgen eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus, der Durchführung und der Ergebnisse des Probandenversuchs. Es wird aufgezeigt, wie die Grenzwerte für Farbabstände von Farbsäumen ermittelt und wie sie in der Simulation angewendet wurden, um eine realitätsnahe Darstellung zu erreichen.

2 Aufbau und Durchführung

Für die Durchführung des Versuches wurden zwei verschiedene Ansätze verwendet, zum einen die Verwendung einer Farbmesskamera und zum anderen die Befragung von Personen zu denselben Lichtbildern basierend auf ihrem subjektiven Empfinden.

Der Versuch wurde in einem Dunkellabor durchgeführt, um eine kontrollierte Umgebung für die Farbwahrnehmung zu gewährleisten. Der Aufbau ist in *Abbildung 2.1* aus der Sicht des Probanden dargestellt. Dieser umfasst eine weiße Papp-/Schaumstoff-Platte mit den Abmessungen 1,38 m x 2,37 m. Auf dieser Platte wurden Zonen eingezeichnet, die einer Zielscheibe ähneln.

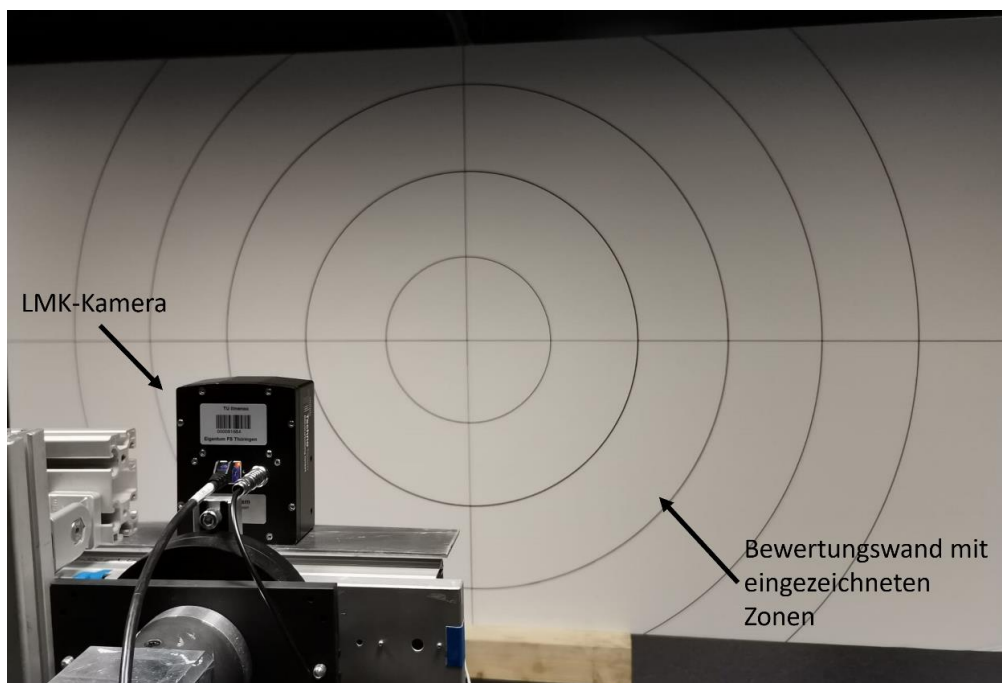


Abbildung 2.1: Versuchsaufbau des Probandenversuchs: Blickfeld des Probanden auf die Bewertungswand

In der *Abbildung 2.2* ist die Seitenansicht des Versuchsaufbaus dargestellt. Zur Durchführung des Probandenversuchs wurde das Leuchtmittel, bestehend aus Optik

und Platine, auf einer Vorrichtung parallel zur Wand positioniert. Der Abstand zwischen der Vorderseite der Optik und der Wand betrug $l = 1,52$ m. Die aktuelle Bewertung von Farbsäumen bei BJB erfolgt bereits anhand eines ähnlichen Aufbaus. Allerdings sind auf der Bewertungswand keine Zonen markiert.

In der Mitte oberhalb der Optik wurde die Farbmesskamera LMK 4 Color der Firma Techno Team angebracht. Ein Wagen auf einem Schienensystem wurde fixiert, um sicherzustellen, dass die Ausrichtung des Leuchtmittels und der Kamera zur Bewertungswand immer gleich blieb. Die Beobachtungswand wurde so ausgerichtet, dass sich der Mittelpunkt der Wand nahezu mittig zum geometrischen Mittelpunkt der Optik befand, obwohl dadurch eine Verzerrung im Kamerabild entstand. Dennoch wurde es für sinnvoller erachtet, die Optik mittig zur Platte auszurichten und nicht die Kamera. Um die Verzerrung so gering wie möglich zu halten, wurde das Objektiv der Kamera so nah wie möglich an den Mittelpunkt der Optik gebracht. Der Abstand in der Höhe zwischen dem Mittelpunkt des Kameraobjektivs und dem Mittelpunkt der Optik betrug 8 cm. Das Kameraobjektiv befand sich 6 cm näher an der Wand als das Leuchtmittel.

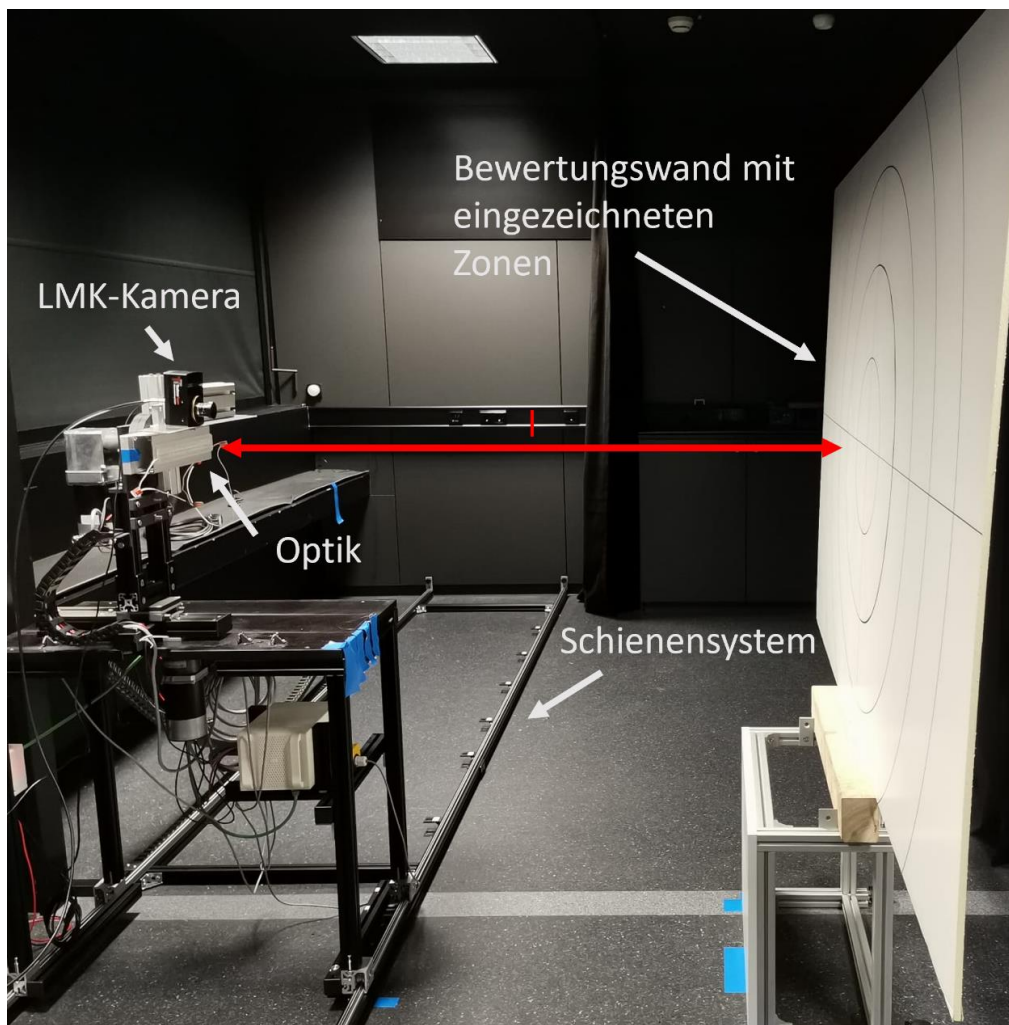
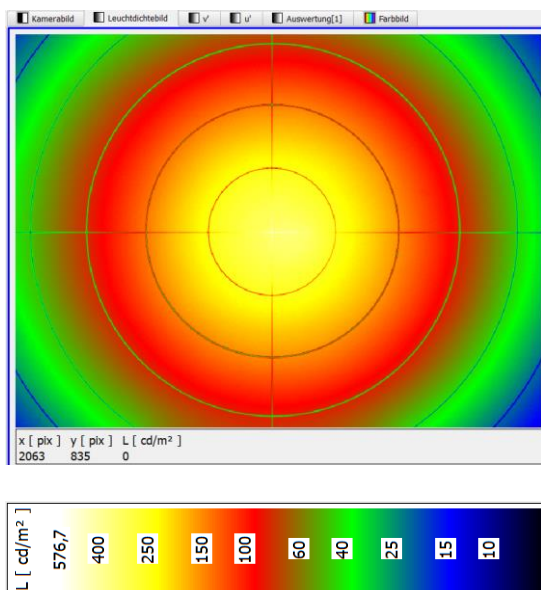


Abbildung 2.2: Versuchsaufbau des Probandenversuches: Seitenansicht

Der Versuch wurde mit 15 verschiedenen Optiken durchgeführt. Um eine detaillierte Bewertung der Optiken vorzunehmen, wurde von jeder Optik eine Aufnahme mit der Farbmesskamera gemacht. Die Kamera wurde über einen Laptop mit der Software LMK LabSoft verbunden, um das Bild zu erfassen. Aus den Aufnahmen wurden ein Leuchtdichtebild und ein Farbbild generiert. Die *Abbildung 2.3* stellt diese beiden Darstellungen am Beispiel der Optik A dar.

Das Leuchtdichtebild wird in einer Falschfarbendarstellung präsentiert. Normalerweise befindet sich rechts neben dem Bild eine Skala, die die Werte darstellt. In diesem Fall wurde die Skala unter dem Bild platziert, um eine bessere Darstellung zu gewährleisten. Das Farbbild berücksichtigt nicht nur die Farborte in den Koordinaten u' und v' , sondern auch die Leuchtdichte. Es gibt keine Skala für dieses Bild, aber wenn die Maus über das Bild bewegt wird, werden die entsprechenden Werte für u' , v' und L unter dem Diagramm angezeigt. Beide Diagramme wurden logarithmisch dargestellt.

a) Leuchtdichtebild



b) Farbbild

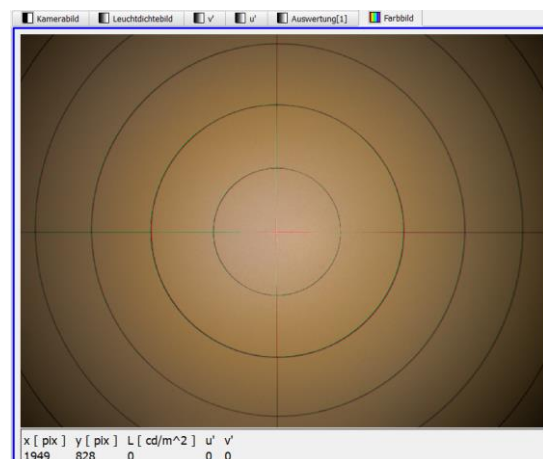
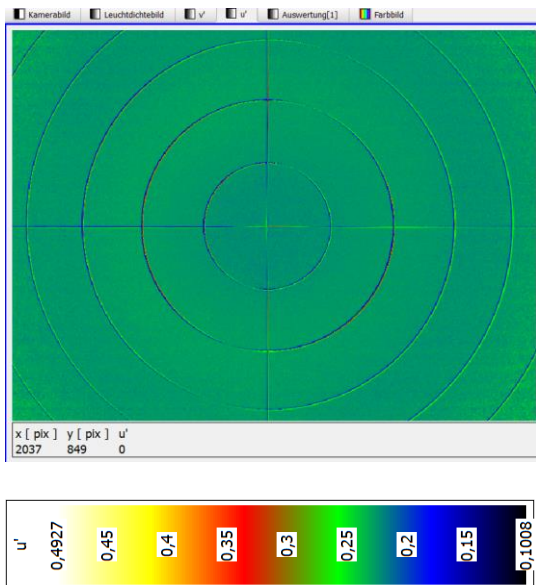


Abbildung 2.3: Kameraaufnahme der Optik A a) Leuchtdichtebild in Falschfarben b) Farbbild

In der *Abbildung 2.4* werden die grafische Darstellung der Farbortkoordinaten u' und v' in Falschfarben dargestellt. Anhand des Beispiels der Optik A lässt sich in b) gut erkennen, wie sich der Farbort in den verschiedenen Zonen verändert. Auch in a) ist dies sichtbar, allerdings schwerer zu erkennen. Durch Bewegen der Maus über das Bild in der Software werden unten links die jeweiligen u' - und v' -Werte angezeigt, die an der entsprechenden Stelle im Bild abgebildet sind.

a) u'



b) v'

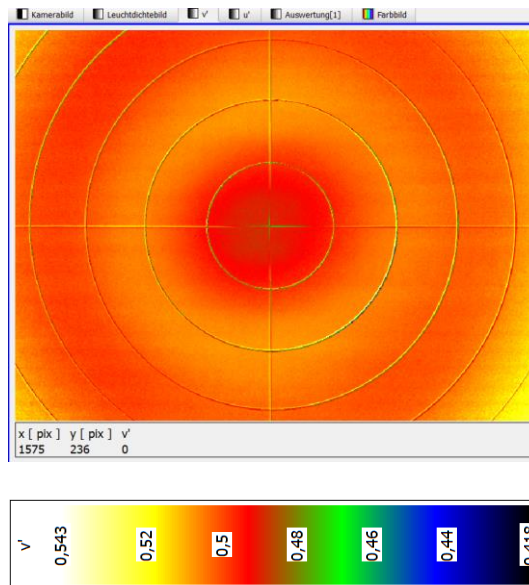


Abbildung 2.4: Farbkoordinaten der Kameraaufnahme der Optik A a) u' b) v'

In der *Abbildung 2.5* wird ein Bild mit Farbunterschieden in Falschfarbendarstellung gezeigt. Hierbei werden nicht nur die Farbunterschiede, sondern auch die Unterschiede in der Leuchtdichte berücksichtigt. Als Referenz wurde die Zone 4, also Kreisring Nummer 4, ausgewählt. Da die Software LabSoft nur rechteckige Regionen als Referenz zulässt und keine Kreisringe, wurde in den Ring eine kleine rechteckige Region mit der Nummer 1 eingezeichnet, die als Referenz verwendet wird. Dies war möglich, da die Optik eine rotationssymmetrische Abstrahlung aufweist.

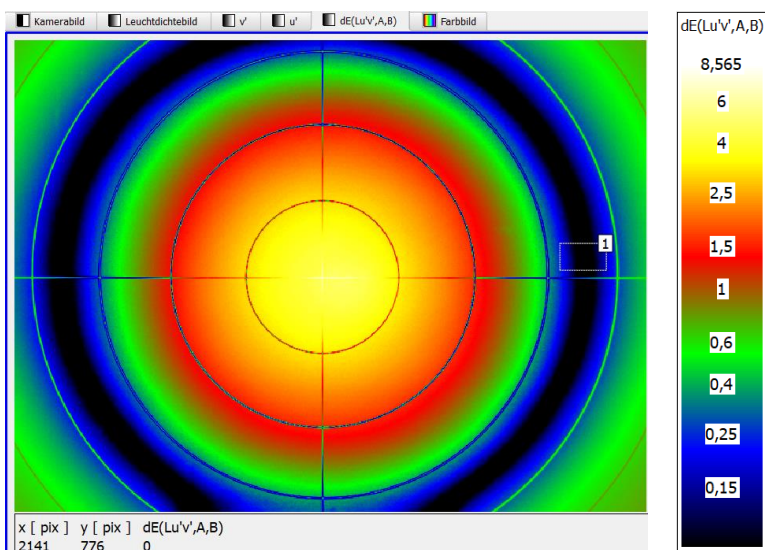


Abbildung 2.5: Kameraaufnahme der Optik A Farbunterschiedsbild mit der Referenz Region 1

In dem Bild, das von der ersten Optik aufgenommen wurde, wurden Regionen erzeugt, siehe *Abbildung 2.6*. Die Regionen, auf die im weiteren Verlauf der Arbeit Bezug genommen wird, werden als Zonen bezeichnet. Durch das Erstellen dieser Zonen wurden die schwarzen Linien eliminiert, um sicherzustellen, dass sie die Messergebnisse nicht beeinflussen. Die Zonen wurden zu Beginn nur einmal eingezeichnet und konnten für alle weiteren Aufnahmen übernommen werden, wodurch sie immer gleich groß und an derselben Stelle platziert waren. Die Zonen 6 und 7 wurden verwendet, um die horizontale und vertikale schwarze Linie zu eliminieren. In *Abbildung 2.7* ist im Farbwertflächendiagramm zu erkennen, dass die Messwerte in den Zonen 6 und 7 stark streuen und daher nicht berücksichtigt werden sollten.

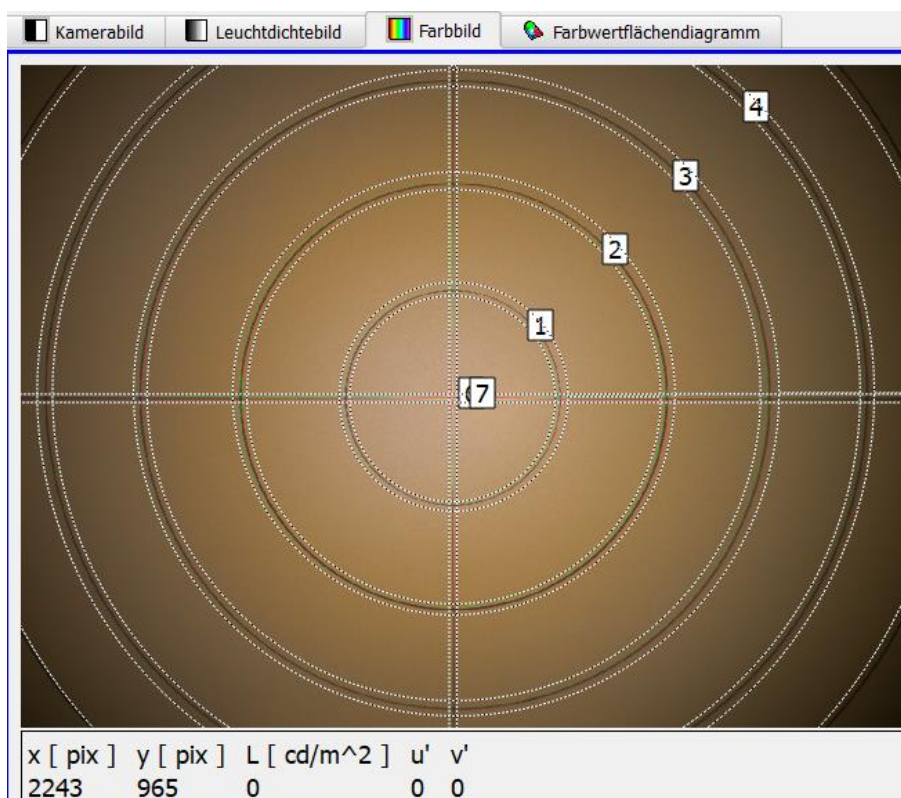


Abbildung 2.6: Farbbild des Lichtbildes der Optik A mit eingezeichneten Regionen

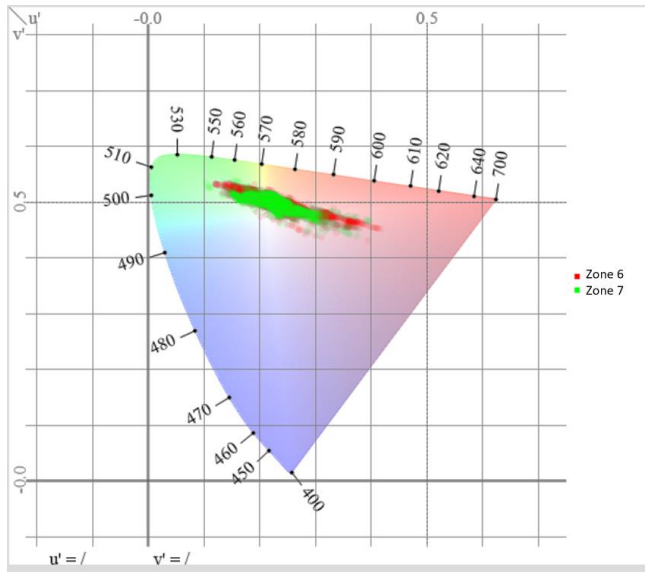
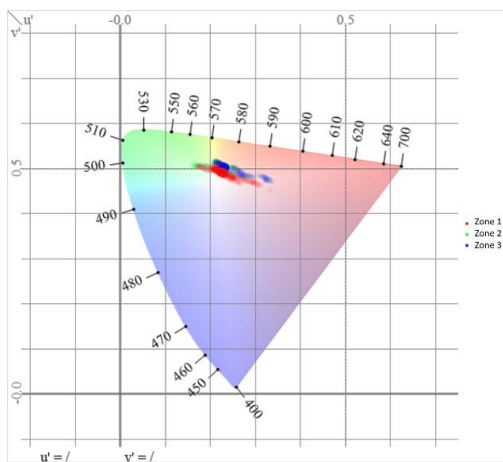


Abbildung 2.7: Farbwertflächendiagramm der Zonen 6 und 7 des Lichtbildes der Optik A: Messwerte der Zone 6 dargestellt in rot und Messwerte der Zone 7 dargestellt in grün

Anschließend wurde ein Farbwertflächendiagramm erstellt, das alle Messwerte der einzelnen Zonen in verschiedenen Farben darstellt. Dieses Diagramm in *Abbildung 2.8* ermöglicht es, die Streuung der Messwerte in jeder Zone deutlich zu erkennen. Im Hintergrund des Diagramms wird die CIE-Farbtabelle von 1976 mit den Farbkoordinaten u' und v' angezeigt. Die Daten des Farbwertflächendiagramms umfassen die Pixelkoordinaten x und y , die Leuchtdichte L und die Farbkoordinaten u' und v' für jeden Punkt. Die Daten wurden exportiert und anschließend in Excel zur weiteren Auswertung verwendet. Für das Farbwertflächendiagramm wurden pro Zone 50.000 Datenpunkte generiert, wobei eine Glättung von 1 angewendet wurde.

a)



b)

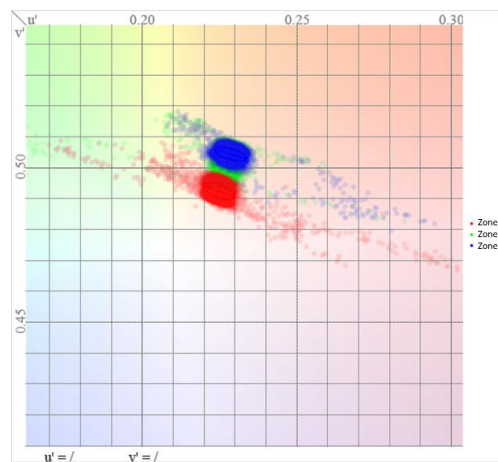
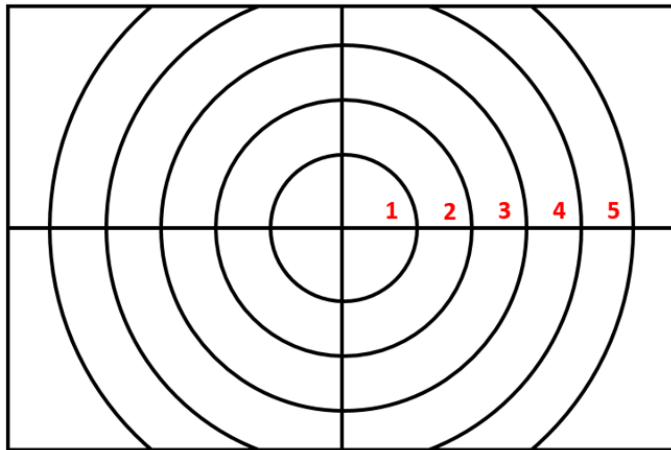


Abbildung 2.8: Farbwertflächendiagramm des Lichtbildes der Optik A der Zonen 1, 2 und 3 a) Original b) Ausschnitt vergrößert

Im Anschluss daran erfolgte der zweite Teil des Versuchs, bei dem die drei Probanden gemeinsam die Lichtbilder der verschiedenen Optiken begutachteten und ebendiese bewerteten. Im Zuge dessen füllten sie einen Bewertungsbogen aus. Zur Veranschaulichung ist ein Beispiel für die Optik A in *Abbildung 2.9* dargestellt.

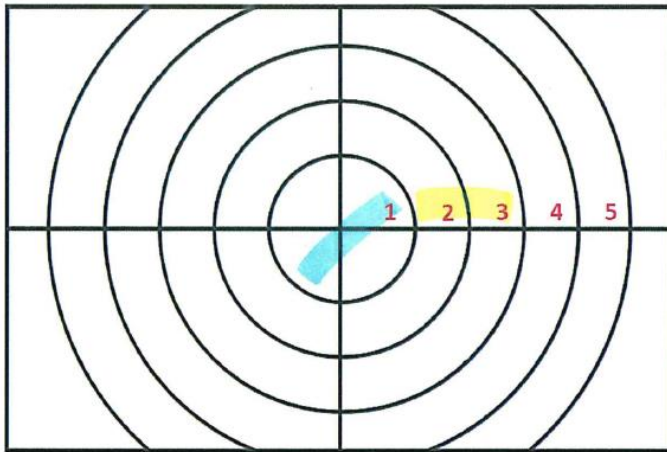


Referenz: Zone

Z1:
Z2:
Z3:
Z4:
Z5:

Abbildung 2.9: Probandenversuch: Leeres Bewertungsfeld für die Optik A

Die *Abbildung 2.9* stellt die Bewertungstafel mit den fünf Ringen, jeweils für jede Optik dar. Zunächst einigten sich die Probanden auf eine Referenzzone. Diese wurde so gewählt, dass sie sich annähernd bei 4000K befand und in der jeweiligen Zone ein möglichst homogener Farbverlauf vorlag. Das heißt, es fand kein Farbwechsel von beispielsweise blau zu gelb innerhalb der Zone statt. Um die 4000K-Zone zu bestimmen, wurde ein Vergleich mit einer Referenzquelle durchgeführt. Dabei wurde eine Platine mit 4000K-LEDs abwechselnd mit der zu bewertenden Optik eingeschaltet und verglichen. Anschließend wurden die einzelnen Zonen in Bezug zur Referenzzone bewertet. Dabei wurde versucht, die Zonen unabhängig von der spezifischen Abstrahlcharakteristik der Optik zu bewerten. Es gab nur zwei Bewertungsoptionen: Entweder wurde die jeweilige Zone als "in Ordnung" oder "nicht in Ordnung" gekennzeichnet. Zusätzlich wurden die Zonen, die als "nicht in Ordnung" bewertet wurden, in gelb oder blau markiert. Dies war von der Richtung, in welche sie nach Meinung der Probanden von der Referenz abwichen, abhängig. Ein Beispiel dafür ist in *Abbildung 2.10* für die Optik A zu sehen.



Referenz: Zone 4

Z1: }
 Z2: } nicht ok
 Z3: }
 Z4: }
 Z5: } ok

Abbildung 2.10: Probandenversuch: Ausgefülltes Bewertungsfeld für die Optik A

3 Bewertungsmethoden

Im Folgenden werden zwei verschiedene Bewertungsmethoden vorgestellt, die speziell für den Probandenversuch entwickelt wurden.

3.1 Bewertungsmethode 1

Die Daten des Farbwertflächendiagramms wurden in Excel importiert. Die Datei enthielt die Pixelpositionen x und y , die Farbkoordinaten u' und v' sowie die Leuchtdichte L für jede einzelne Zone.

Zunächst wurden die Werte der Zonen 6 und 7 aus *Abbildung 2.6* herausgefiltert, sodass nur die Zonen 1 bis 5 berücksichtigt wurden. Dadurch reduzierte sich die Anzahl der Messwerte pro Zone von jeweils 50.000 auf die in *Tabelle 3.1* dargestellten Werte.

Tabelle 3.1: Anzahl der Messwerte pro Zone

Zonenummer	Anzahl der Messwerte
1	36722
2	37033
3	37976
4	37559
5	33559

Exemplarisch wird die Auswertung der Optik A gezeigt. Zunächst wird die von den Probanden als Referenzzone ausgewählte Zone betrachtet, in diesem Fall Zone 4. Ein Ausschnitt der Auswertung dieser Zone ist in *Abbildung 3.1* dargestellt, auf den im Folgenden Bezug genommen wird.

Zuerst wurde der Mittelwert der Farbkoordinaten u' und v' dieser Zone ermittelt (Zellen F2 und G2). Anschließend wurde der Farbabstand der einzelnen Messwerte zum Mittelwert berechnet. Diese Werte sind fortlaufend in Spalte H zu finden. Der Mittelwert der berechneten Farbabstände wurde anschließend ermittelt. In Zelle N2 wird dieser als direkter Abstand von $u'v'$ angegeben, während er in Zelle N3 als SDCM (Standard Deviation of Colour Matching), also in Form von MacAdam-Ellipsen, angegeben wird. Zudem wurde die Standardabweichung der Farbabstände in Zelle Q2 bestimmt.

Des Weiteren wurde ein Farbabstand unter Berücksichtigung der Leuchtdichte ermittelt. Hierbei wurde zunächst der Mittelwert der Leuchtdichte in Zone 4 gebildet (Zelle I2). Daraufhin wurde der Farbabstand der einzelnen Messwerte zu den

Mittelwerten von u' , v' und L der Zone berechnet. Auch aus diesen Farbabständen wurde ein Mittelwert gebildet (Zelle N11). Die dazugehörige Standardabweichung ist in Zelle Q11 zu finden.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	N	Q
1	pX[4]	pY[4]	L (Lu'v')	u' (Lu'v')	v' (Lu'v')	Mittelwert u'	Mittelwert v'	Delta u'v'	Mittelwert L	Delta u'v' inkl. Leuchtdichte		Mittelwert der Farbabstände	Standardabweichung
2	336	12	45,75	0,2276	0,4979	0,226221418	0,500848815	0,00325515	61,91183663	0,261066284		0,002717735	0,001486104
3	339	12	46,28	0,2244	0,4982	0,226221418	0,500848815	0,00321462	61,91183663	0,252505892	SDCM:	2,470668248	
4	342	12	47,08	0,2268	0,4994	0,226221418	0,500848815	0,001560071	61,91183663	0,239568908			
5	345	12	46,93	0,2276	0,4984	0,226221418	0,500848815	0,002810193	61,91183663	0,242002946			
6	348	12	47,21	0,2276	0,498	0,226221418	0,500848815	0,003164844	61,91183663	0,237485158			
7	351	12	47,16	0,2272	0,4963	0,226221418	0,500848815	0,004652885	61,91183663	0,238317094			
8	354	12	48,17	0,2248	0,4986	0,226221418	0,500848815	0,002660375	61,91183663	0,221974091			
9	357	12	48,19	0,2273	0,4967	0,226221418	0,500848815	0,004286725	61,91183663	0,22167656			
10	360	12	48,23	0,2329	0,4955	0,226221418	0,500848815	0,008556476	61,91183663	0,221154616		inkl. Leuchtdichte	
11	363	12	49,26	0,2278	0,4977	0,226221418	0,500848815	0,003522351	61,91183663	0,204382823		0,129726467	0,076589467

Abbildung 3.1: Ausschnitt der Auswertung der Referenzzone 4 für die Optik A

Im Anschluss daran wurde die gleiche Prozedur für die Zonen 1, 2, 3 und 5 wiederholt. Der einzige Unterschied bestand darin, dass die zuvor ermittelten Mittelwerte der Referenzzone 4 als Referenzwerte für die anderen Zonen verwendet wurden. Dies bedeutet, dass in den Spalten F, G und I der anderen Zonen nicht ihre eigenen berechneten Mittelwerte zu finden sind, sondern die Mittelwerte der Referenzzone 4. Dadurch konnte der Abstand der Messwerte zum Mittelwert der Referenzzone berechnet werden.

Nach Abschluss der Auswertung für die fünf Zonen, wurden die Ergebnisse in einer Excel-Mappe mit den Auswertungen der Probanden zusammengefasst, wie in *Abbildung 3.2* und *Abbildung 3.3* dargestellt. In den Spalten A bis C sind die Auswertungen der Probanden zu sehen. Die Zonen, die als "nicht in Ordnung" markiert wurden, sind jeweils in der entsprechenden Farbe hervorgehoben, die nach Ansicht der Beobachter von der Referenzzone abweicht. In der *Abbildung 3.2* in Spalte H werden die Mittelwerte der Farbabstände der einzelnen Zonen im Vergleich zum Mittelwert der Referenzzone aufgeführt. Die Werte sind farblich gekennzeichnet und werden in der Einheit SDCM angegeben. Der Wert, der in kräftigem Rot dargestellt ist, vergleiche Zelle H4, ist der größte Wert und weicht somit am stärksten vom Mittelwert der Referenzzone ab. Der Wert in kräftigem Grün hingegen ist der kleinste Wert und liegt daher am nächsten am Mittelwert der Referenzzone. In der Regel entspricht dieser Wert auch dem Wert der jeweiligen Referenzzone. Die anderen Werte liegen entsprechend der Farbskala zwischen dem größten und dem kleinsten Wert. Diese Farbskala ist in *Abbildung 3.4* dargestellt und wird auch für die Hervorhebung der Mittelwerte der Farbabstände aus *Abbildung 3.3*, einschließlich der Leuchtdichte in Spalte L übernommen. In Spalte I und M werden die Standardabweichungen der Mittelwerte für die beiden verschiedenen Abstände dargestellt. Zudem wurde der Variationskoeffizient aus dem Quotienten der Standardabweichung und dem Mittelwert in Spalte J und N berechnet. Diese Spalten zeigen, dass die Streuung der Messwerte in den einzelnen Zonen stark variiert. In Spalte O und P sind schließlich die Mittelwerte der jeweiligen Zonen für u' und v' angegeben.

	A	B	C	D	E	H	I	J	
1		Probandenbewertung					Mittelwert der Farbabstände	Standardabweichung	Variationskoeffizient [%]
2	1	schlecht		Zone 1					
3	2	schlecht				0,00864471	0,002114289	24,45760471	
4	3	schlecht			SDCM:	7,858827273	1,922080909		
5	4	ok		Zone 2					
6	5	ok				0,00421202	0,00201256	47,78134957	
7	Gesamt	schlecht			SDCM:	3,829109091	1,8296		
8	Referenz	4		Zone 3					
9						0,00484026	0,00168126	34,73491093	
10					SDCM:	4,400236364	1,528418182		
11				Referenzzone 4					
12						0,002717735	0,001486104	54,68171106	
13					SDCM:	2,470668182	1,351003636		
14				Zone 5					
15						0,00659885	0,00361985	54,85577032	
16					SDCM:	5,998954545	3,290772727		

Abbildung 3.2: Zusammenfassende Auswertung der Optik A inklusive Probandenauswertungen nach der Bewertungsmethode 1

	A	B	C	D	L	M	N	O	P	
1		Probandenbewertung				der Farbabstände inkl. Leuchtdichte	Standardabweichung inkl. Leuchtdichte	Variationskoeffizient [%]: Standardabweichung durch Mittelwert	Mittelwert u' - der jeweiligen Zone	Mittelwert v' - der jeweiligen Zone
2	1	schlecht		Zone 1						
3	2	schlecht			3,709082964	0,419831987	11,31902389	0,224535228	0,492685284	
4	3	schlecht								
5	4	ok		Zone 2						
6	5	ok			2,153997175	0,426670493	19,80831258	0,227560261	0,50323753	
7	Gesamt	schlecht								
8	Referenz	4		Zone 3						
9					0,791958258	0,282270457	35,64208769	0,228138926	0,504609627	
10										
11				Referenzzone 4						
12					0,129726467	0,076589467	59,03919885	0,22622142	0,50084882	
13										
14				Zone 5						
15					0,441019748	0,08422837	19,09854835	0,228000188	0,50596844	

Abbildung 3.3: Zusammenfassende Auswertung der Optik A inklusive Probandenauswertungen nach der Bewertungsmethode 1 inklusive Berücksichtigung der Leuchtdichte



Abbildung 3.4: Farbskala für die farblich markierten Werte in der Gesamtauswertung der Optik A, aus Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3

3.2 Bewertungsmethode 2

Im Rahmen der zweiten Bewertungsmethode wurde in *Abbildung 3.5* eine waagerechte Linie als Region in das Bild eingezeichnet. Innerhalb dieser Region wurden die Pixelwerte sowie die Farbkoordinaten x , y , u' und v' der jeweiligen Pixel extrahiert. Anschließend erfolgte die Berechnung der ähnlichsten Farbtemperatur mithilfe von Gleichung (1).

$$CCT = 437 \times n^3 + 3601 \times n^2 + 6861 \times n + 5517 \quad (1)$$

Die Gleichung (2) ermöglicht die Berechnung von n .

$$n = \frac{x - 0,332}{0,1858 - y} \quad (2)$$

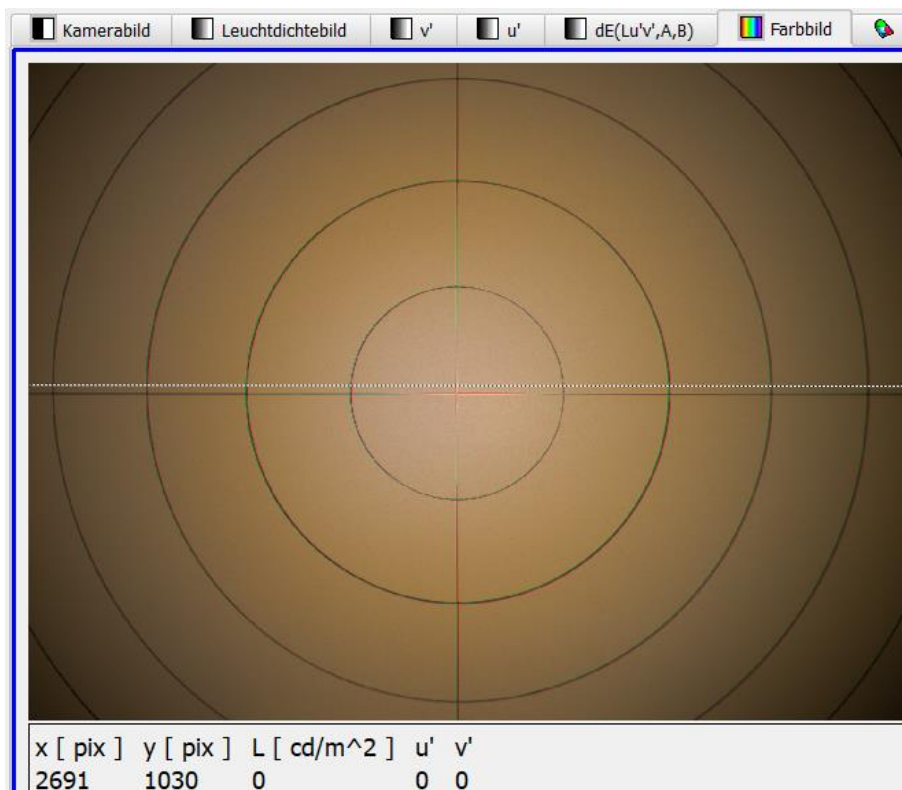


Abbildung 3.5: Kameraaufnahme der Optik A mit einer waagrecht eingezeichneten Region

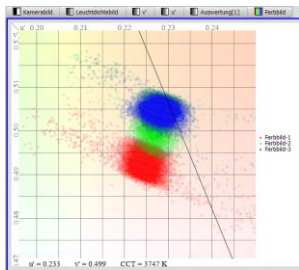
Für die Datenanalyse wurde ein Script in Matlab erstellt. Mit diesem Script wurde aus den einzelnen Messwerten der Region ein Polynom 9. Grades generiert. Anschließend wurden die Steigungen in den verschiedenen Zonen sowie die Schnittmenge der jeweiligen Zone mit der Referenzzone ermittelt.

Es wurden zunächst Versuche mithilfe der ähnlichsten Farbtemperatur durchgeführt. Die CCT-Werte erwiesen sich schnell als ungenau für die Betrachtung der

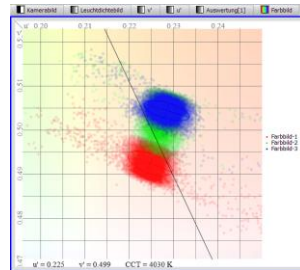
Farbunterschiede. In *Abbildung 3.6* sind drei Bilder aus der LMK LabSoft zu sehen, die das Farbwertflächendiagramm der Optik A im CIE 1976 Farbraum darstellen. In diesem Diagramm werden die Messwerte der Zone 1 bis 3 jeweils in den Farben rot, grün und blau visualisiert. Die Unterscheidung zwischen den drei Bildern liegt in der schwarzen Linie, der sogenannten Judd'schen Geraden, die den Planck'schen Kurvenzug an einem bestimmten Punkt schneidet.

In Bild a) nehmen alle Messwerte, die sich entlang dieser Geraden befinden, den Wert 3747 K an. Die Werte unterscheiden sich in u' und v' , jedoch entsprechen sie der ähnlichsten Farbtemperatur. Ähnlich verhält es sich in Bild b) mit 4030 K und in Bild c) mit 4162 K. Diese Beispiele verdeutlichen, dass die CCT-Werte für eine detailliertere Betrachtung zu ungenau sind, da verschiedene Messwerte denselben Wert annehmen würden.

a) 3747 K



b) 4030 K



c) 4162 K

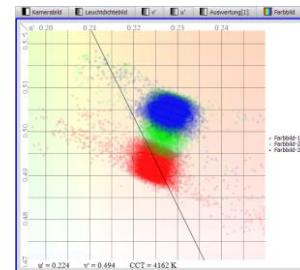


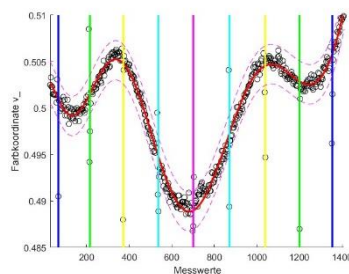
Abbildung 3.6: Farbwertflächendiagramm der Optik A im CIE 1976 Farbraum mit verschiedenen Judd'schen Geraden a) 3747 K b) 4030 K c) 4162 K

Auch Herr Rotscholl und Herr Neumann [1] teilen eine ähnliche Ansicht und betonen, dass die Farbtemperatur als Beschreibungsgröße für kleine Farbunterschiede ungeeignet ist und leicht zu Fehlinterpretationen führen kann. Allerdings halten sie eine generelle Zuordnung von Farbarten und eine grobe Abschätzung großer Farbunterschiede für legitim. Daher wurde die Entscheidung getroffen, die Auswertung mit den u' - und v' -Koordinaten fortzusetzen. Diese Werte bieten eine detailliertere und präzisere Darstellung der Farbabweichungen und ermöglichen eine genauere Beurteilung der Farbqualität von LED-Beleuchtungen.

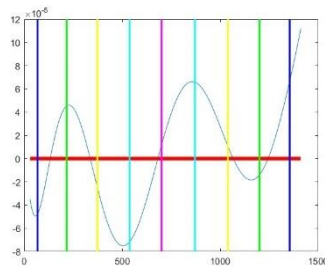
Für die Analyse der u' und v' Farbkoordinaten wurde schließlich ein Matlab-Script erstellt. Zunächst wurden die zuvor in einer Excel-Datei gespeicherten Messwerte in das Programm eingelesen. Anschließend erfolgte eine Filterung der Werte unter Verwendung eines Delta-Werts, der den Standardfehler für die Vorhersage darstellt. Ein Delta bedeutet, dass 68 % der Messwerte innerhalb der Grenzen liegen würden. In *Abbildung 3.7 a)* ist ersichtlich, dass sich außerhalb der Grenzen nur die Werte befinden, die auf den schwarzen Linien der Zonen liegen. Alle Werte, die außerhalb der durch das Delta definierten Grenzen lagen, wurden eliminiert. Aus den gefilterten Werten wurde ein Polynom 9. Grades erstellt. Anschließend wurden die erste und zweite Ableitung des Polynoms berechnet, um Extremstellen und Wendepunkte zu

ermitteln. Der Bereich jeder einzelnen Zone wurde aus dem Polynom extrahiert und die Steigung innerhalb dieses Bereichs wurde durch die erste Ableitung bestimmt. Hierbei wurde der Mittelwert der Steigung für jede Zone berechnet und zwischen der linken sowie rechten Zone unterschieden, da sich jede Zone zweimal, aber nicht zusammenhängend in der Region an der Bewertungswand befindet.

Die *Abbildung 3.7* zeigt drei verschiedene Grafiken, die zur Optik A gehören. a) In der ersten Grafik sind die einzelnen Messwerte der v' -Farbkoordinate durch schwarze Kreise dargestellt. Die rote Funktion repräsentiert ein Polynom 9. Grades, das den Verlauf der Messwerte wiedergibt. Die rot gestrichelten Linien links und rechts vom Polynom markieren die Grenzen, die durch das Delta definiert sind. Zusätzlich sind die verschiedenen Zonen durch senkrecht unterschiedlich farbige Linien gekennzeichnet. Die Zone 1 befindet sich beispielsweise zwischen den beiden cyanfarbenen Linien und wird durch die magentafarbene Linie in eine linke und eine rechte Hälfte geteilt. b) Die zweite Grafik stellt die erste Ableitung dar, die verwendet wird, um die Extrema zu ermitteln. c) Die dritte Grafik zeigt die zweite Ableitung, welche zur Bestimmung der Wendepunkte verwendet wird. In den Grafiken b) und c) stellt die waagerechte rote Linie die Nulllinie dar.

a) v' 

b) 1. Ableitung



c) 2. Ableitung

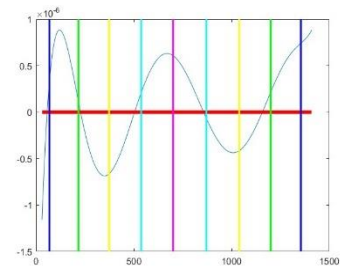


Abbildung 3.7: Grafiken zur Bewertung der Optik A a) Darstellung aller Messwerte v' , einschließlich des Polynoms und der durch das Delta definierten Grenzen b) Darstellung der ersten Ableitung zur Ermittlung der Extrema c) Darstellung der zweiten Ableitung zur Ermittlung der Wendepunkte

Die Schnittmenge zwischen der Referenzzone und jeder anderen Zone wurde ermittelt, um ihre Ähnlichkeit zu quantifizieren. Dieser Vorgang wurde durch den Vergleich der v' -Werte an der Stelle $x = 0$, erreicht. Wenn beispielsweise die Zone 4 als Referenzzone festgelegt wurde, wurde die Schnittmenge mit der Zone 1 bestimmt, indem die Werte von der Zone 1 bei $x = 0$ betrachtet wurden, um den prozentualen Übereinstimmungsanteil zu ermitteln. Dies ermöglichte eine quantitative Aussage darüber, inwiefern sich die Farbkoordinaten und damit die Farbtemperatur zwischen den Zonen ähnelten. Je höher der prozentuale Übereinstimmungsanteil, desto größer war die Ähnlichkeit zwischen den Zonen hinsichtlich des Farbeindrucks.

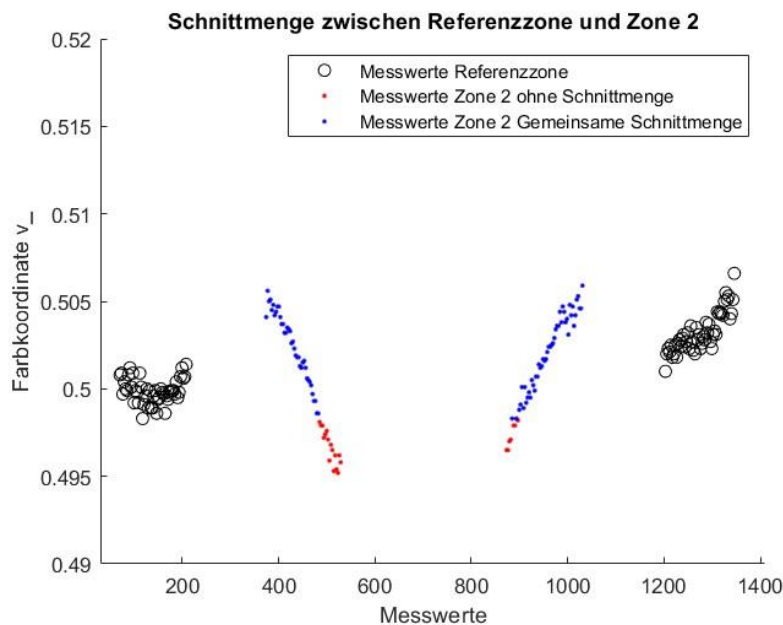


Abbildung 3.8: Schnittmenge der Referenzzone 4 und der Zone 2 der Optik A

Es wurde deutlich, dass eine Einbeziehung der Zone 5 in die Bewertung nicht sinnvoll war. Im Vergleich zu den anderen vier Zonen war die Zone 5 weniger als halb so groß und enthielt daher auch deutlich weniger Messwerte. Darüber hinaus wurde die Zone 5, insbesondere bei den 30 Grad Optiken, nur sehr schwach beleuchtet. Der FWHM von 30 Grad deckt gerade die ersten beiden Zonen ab, das bedeutet die Lichtstärke innerhalb dieses Bereiches erreicht mindestens 50 % des Maximalwertes. In den restlichen Zonen liegen die Werte unter 50 %. Dadurch wurde die Zone 5 nur minimal beleuchtet. Bei den beiden Optiken B V2 und V3 lagen die Werte in Zone 5 zwischen 9 und $12 \frac{cd}{m^2}$. Aus diesen Gründen wurde beschlossen, die Zone 5 bei der Bewertung nicht weiter zu berücksichtigen, um eine verzerrte Beurteilung zu vermeiden und den Fokus auf die repräsentativeren Zonen zu legen.

Zunächst wurde die Auswertung für die u' - und v' -Farbkoordinaten durchgeführt. Im Zuge dessen wurde deutlich, dass sich die Verläufe bzw. Formen der Kurven sehr ähnlich sehen. Jedoch unterscheiden sich die Werte erheblich. Bei genauer Betrachtung der Farbtafel von 1976 wird deutlich, dass der Farbverlauf zwischen gelb und blau durch die v' -Koordinate deutlicher erkennbar ist als durch die u' -Koordinate. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde die Entscheidung getroffen, die Auswertung ausschließlich anhand der v' -Koordinate durchzuführen.

Bei der Beurteilung der Farbveränderungen wurden vier Kriterien verwendet, um eine umfassende Analyse durchzuführen. Diese Kriterien umfassen die Steigung, die Schnittmenge, die Wendepunkte und die Extrema.

Die Steigung dient als Maß für die Intensität der Farbveränderung an einer bestimmten Stelle oder innerhalb einer Zone. Je größer die Steigung, desto größer ist die wahrgenommene Farbänderung an dieser Stelle oder in der Zone.

Die Schnittmenge zwischen einer Zone und der Referenzzone gibt Auskunft darüber, inwieweit die Farben der Zone mit den Farben der Referenzzone übereinstimmen. Durch die Bestimmung des prozentualen Anteils, der farblich mit der Referenzzone übereinstimmt, kann eine quantitative Bewertung der Farbähnlichkeit zwischen den Zonen vorgenommen werden.

Die Wendepunkte spielen eine wichtige Rolle bei der Identifizierung von starken Farbveränderungen. An diesen Punkten unterscheidet sich die Farbe signifikant von den benachbarten Bereichen, entweder durch einen Übergang von einer Rechtskurve zu einer Linkskurve oder umgekehrt. Die Steigung erreicht an den Wendepunkten ihr Maximum.

Die Extrema markieren die Stellen, mit der lokal größten bzw. kleinsten Farbkoordinate.

Im Rahmen der Auswertung wurde festgestellt, dass das Lichtbild der Optiken entweder nicht immer perfekt mittig ausgerichtet war oder dass die Optiken keine exakte Rotationssymmetrie aufwiesen. Dies führte dazu, dass sich die Wendepunkte oder Extrema gelegentlich auf der linken Seite einer Zone befanden, beispielsweise in der Zone 2, während sie auf der rechten Seite in der Zone 3 lagen. In solchen Fällen liegt die wahre Position des Wendepunktes oder Extrems vermutlich irgendwo in der Mitte der beiden Zonen oder knapp innerhalb einer der beiden Zonen. Dieses Erkenntnis verdeutlicht, dass eine genaue Bestimmung des tatsächlichen Verlaufs der Farbänderung eine gewisse Flexibilität erfordert, um den wahrscheinlichen Bereich des Wendepunktes oder Extrems angemessen abzudecken.

Auch bei dieser Bewertungsmethode wurde die Auswertung basierend auf dem Abstrahlwinkel unterteilt. Ein Beispiel für die Auswertung der A ist in *Tabelle 3.2* dargestellt. Die Tabelle umfasst verschiedene Spalten mit unterschiedlichen Informationen. In der ersten Spalte sind die Zonennummern aufgeführt, während die Bewertung der Probanden in der zweiten Spalte vermerkt ist. Die Felder der Probandenbewertungen sind entsprechend der Abweichung in den gelben oder blauen Bereich eingefärbt, während die Referenzzone in grün dargestellt ist. Die dritte Spalte führt die stärkste absolute Steigung auf, wobei die Steigungen von der Zone 1 links und der Zone 1 rechts verglichen wurden und die größere Steigung in dieser Spalte vermerkt ist. Den Mittelwert der Steigungen der jeweiligen Zone links und rechts ist in der vierten Spalte zu finden. Die Schnittmenge in Bezug auf die Referenzzone wird in der fünften Spalte angezeigt. In der sechsten Spalte wird mit einem "X" markiert, ob sich in der Zone ein Wendepunkt befindet. Die Spalten sieben und acht zeigen ebenfalls mit einem "X" an, ob sich in der Zone ein Maximum oder Minimum befindet. In der sechsten bis achten Spalte wird hinter dem "X" gegebenenfalls ein "(l)" oder "(r)" angezeigt. Dies kennzeichnet, dass sich der Wendepunkt oder das Extrema nur in einer der beiden Zonen, entweder der linken oder der rechten, befindet. Das deutet darauf hin, dass die Abstrahlung der Optik nicht rotationssymmetrisch ist. In der letzten Spalte werden Bedingungen aufgeführt, unter denen die jeweilige Zone als "nicht in

Ordnung" betrachtet wird. Wenn mehr als ein Argument angegeben ist, wird die Zone als "nicht in Ordnung" eingestuft. Die Farbskala für die Steigungswerte ist in *Abbildung 3.9* dargestellt.

*Tabelle 3.2: Auswertung der 30° Optik A in Bezug auf Steigung, Schnittmenge, Wendepunkte und Extremwerte in dem Verlauf der v'-Farbkoordinate aus der Region in *Abbildung 3.5* nach Bewertungsmethode 2 mit einer Begründung warum die jeweilige Zone nicht in Ordnung ist*

	A	stärkste absolute Steigung [x10 ⁻⁵]	Mittelwert aus Steigung [x10 ⁻⁵]	Schnittmenge [%]	Wendepunkt	Max	Min	Warum n.i.O?
1	schlecht	4,93	4,3	0	X (r)		X (l)	- Hohe Steigung - keine Schnittmenge - Wendepunkt - Minimum
2	schlecht	6,07	5,205	79,41	X (l)			- Hohe Steigung - Wendepunkt
3	schlecht	2,66	1,94	80,41	X	X		- Wendepunkt - Maximum
4	ok	2,74	2,555	100			X	- Minimum



*Abbildung 3.9: Farbskala für die farblich markierten Steigungswerte in der Auswertung der Optik A nach Bewertungsmethode 2 (aus *Tabelle 3.2*)*

Eine hohe Steigung liegt vor, wenn der Mittelwert der Steigungen größer als $3,2 \times 10^{-5}$ ist. Wenn es keine Schnittmenge gibt, bedeutet dies 0 % Übereinstimmung, während eine geringe Schnittmenge weniger als 50 % Übereinstimmung bedeutet. Zusätzlich wird angegeben, ob in der Zone ein Wendepunkt sowie ein Minimum oder Maximum auftritt.

Das Ziel besteht darin, eine möglichst geringe Steigung und eine möglichst hohe Schnittmenge zu erreichen. Des Weiteren sollten keine Wendepunkte in den Zonen vorhanden sein, da dies auf eine signifikante Farbveränderung hindeuten würde.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Bewertungsmethoden 1 und 2 genauer erläutert.

4.1 Ergebnisse Bewertungsmethode 1

Für alle 15 Optiken wurden analoge Auswertungen durchgeführt. Für die abschließende Zusammenfassung wurden die Werte auf zwei Nachkommastellen gerundet. Während der Auswertung der verschiedenen Optiken wurde deutlich, dass es sinnvoll ist, die Optiken entsprechend ihres Halbwertswinkels aufzuteilen. Eine Auswertung für alle drei Halbwertswinkel (30° , 60° und 90°) gemeinsam war nicht möglich. Es wurde versucht, die Lichtbilder unabhängig vom Abstrahlwinkel durch die Probanden zu beurteilen. Allerdings war es beispielsweise bei einer 30° Optik aufgrund einer sehr geringen Leuchtdichte im Randbereich nicht möglich, die Farbunterschiede korrekt zu erkennen.

In *Tabelle 4.1* sind die Auswertungen der 30° -Optiken zusammengefasst. Diese Tabelle zeigt in Spalte 2 und 3 die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte. In Spalte 2 ist der größte Wert aufgeführt, der als „in Ordnung“ deklariert wurde. Während in Spalte 3 der kleinste Wert angegeben wird, der als „nicht mehr in Ordnung“ angegeben wurde. In Spalte 4 und 5 sind entsprechend die MacAdam-Ellipsen in SDCM angeführt, die den Einfluss der Leuchtdichte nicht berücksichtigen.

Tabelle 4.1: Auswertung der 30° -Optiken: Spalte 2 und 3 zeigen die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte, in Spalte 4 und 5 sind entsprechend die MacAdam-Ellipsen in SDCM angeführt

Artikelnummer	„In Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	„Nicht in Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	„In Ordnung“ - SDCM	„Nicht in Ordnung“ - SDCM
A	0,44	0,79	6,00	3,83
B V2	0,65	1,84	3,70	3,48
B V3	0,37	0,71	3,31	5,59
A mit Anderer LED	0,40	0,66	5,75	3,81
C	7,18	-	16,32	-
D	0,37	0,76	3,69	4,90

Am Beispiel der Optik A wird deutlich, dass die Auswertung in MacAdam-Ellipsen ohne Berücksichtigung der Leuchtdichte für 30°-Optiken nicht sinnvoll ist. In diesem Fall hat die Zone mit dem größten Wert, die noch als akzeptabel angesehen wird, einen Wert von 6 SDCM, während die Zone, die als „nicht mehr in Ordnung“ betrachtet wird, einen Wert von 3,83 SDCM aufweist. Dies verdeutlicht die Unzulänglichkeit der reinen MacAdam-Ellipsen-Bewertung für die Beurteilung von Farbabweichungen bei 30°-Optiken. Unter Berücksichtigung der Leuchtdichte ergeben sich andere Ergebnisse. In diesem Fall ist der Wert der Zone, die als „in Ordnung“ betrachtet wird, kleiner als der Wert der Zone, die als „nicht mehr in Ordnung“ gilt. Der Grund für diese Veränderung liegt in der geringen Leuchtdichte in Zone 5. Da eine 30°-Optik eng abstrahlt, werden die Zonen 1 und 2 deutlich stärker beleuchtet als die äußeren Zonen. Die Probanden haben angegeben, dass sie Zone 5 in Bezug auf Zone 4 als akzeptabel empfinden. Rein aufgrund des Farbunterschieds in SDCM betrachtet, ist Zone 5 jedoch „nicht in Ordnung“. Wenn jedoch die Leuchtdichte berücksichtigt wird und die Tatsache, dass Zone 5 sehr dunkel ist, ist die Abweichung von Zone 4 nicht mehr als signifikant zu betrachten. Das zeigt, dass es bei großen Leuchtdichteunterschieden einen Einfluss auf Farbabweichungen gibt und eine alleinige Betrachtung der MacAdam-Ellipsen nicht ausreicht, um eine korrekte Bewertung vorzunehmen. Das gleiche Phänomen tritt auch bei den zwei 30°-Optiken, der B V2 und der A mit der Anderer LED, auf. In diesen Fällen ist Zone 5 aufgrund der geringen Leuchtdichte deutlich dunkler als die umliegenden Zonen. Obwohl die Farbabweichung in SDCM für Zone 5 als nicht akzeptabel betrachtet werden kann, haben die Probanden aufgrund der Berücksichtigung der Leuchtdichte angegeben, dass sie die Zone dennoch als „in Ordnung“ empfinden.

Die Optik C weist eine deutlich abweichende Bewertung im Vergleich zu den anderen Optiken auf. Die Farbabstände sind hier im Vergleich zu den anderen Optiken sehr groß, insbesondere in den Zonen 1 und 2, die eine stärkere Neigung zu bläulichen Farbtönen aufweisen. Jedoch sind dies auch die am stärksten beleuchteten Zonen. In *Tabelle 4.2* wird deutlich, dass die maximale Leuchtdichte bei der Optik C signifikant höher ist als bei allen anderen Optiken. Eine Vermutung besteht darin, dass die Probanden Schwierigkeiten hatten, eine klare Unterscheidung zwischen Helligkeit und Bläulichkeit vorzunehmen. Dies könnte erklären, warum die Farbabweichungen bei dieser Optik möglicherweise nicht gut erkannt wurden. Darüber hinaus wird vermutet, dass der bläulichere Farbton aufgrund der Hellempfindlichkeitskurve des Auges nicht so deutlich wahrgenommen werden konnte. Die Hellempfindlichkeitskurve zeigt, dass das Auge Farben im grünen oder gelben Bereich besser wahrnimmt als blaue Farbtöne. Dieser Unterschied in der Hellempfindlichkeit könnte dazu beitragen, dass die bläulichen Farbabweichungen bei der Optik C möglicherweise weniger stark wahrgenommen wurden und somit die Bewertung der Farbabstände beeinflusst wurde. Es sind weitere Untersuchungen denkbar, um das Phänomen der abweichenden Wahrnehmung und Bewertung der Optik C genauer zu untersuchen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Platine hinter der Optik mit einem geringeren Strom

zu betreiben, um die Leuchtdichte zu reduzieren. Dadurch könnte eine Minimierung der Leuchtdichte erreicht werden, was wiederum dazu führen könnte, dass die Farbsäume in den beiden inneren Zonen deutlicher sichtbar werden.

Tabelle 4.2: Maximale Leuchtdichten der 30° Optiken

Artikelnummer	Maximale Leuchtdichte [$\frac{cd}{m^2}$]
A	567,7
B V2	160,1
B V3	144,6
A mit Anderer LED	781,7
C	819,4
D	417,9

Ohne Berücksichtigung der Optik C würde ein potenzieller Grenzwert zwischen 0,65 und 0,66 liegen. Diese Werte werden in *Tabelle 4.1* durch die Farbe Gelb hervorgehoben. Allerdings stellt sich die Frage, wie repräsentativ dieser Wert ist, da der Unterschied zwischen den beiden Werten nur 0,01 beträgt. Es ist wichtig zu beachten, dass die Festlegung eines Grenzwerts eine Herausforderung darstellt und verschiedene Faktoren berücksichtigt werden müssen, wie zum Beispiel die Anforderungen der Anwendung, die Wahrnehmung der Farbabweichungen durch die Benutzer und die spezifischen Eigenschaften der betrachteten Optiken. Es kann sinnvoll sein, weitere Untersuchungen durchzuführen und zusätzliche Informationen zu sammeln, um eine fundierte Entscheidung über einen geeigneten Grenzwert zu treffen. Des Weiteren sollten die Simulationsergebnisse ausgewertet und mit den Messergebnissen verglichen werden, bevor ein finaler Entschluss gefasst wird. Dieser Vergleich ermöglicht eine umfassendere und verlässlichere Beurteilung der Farbabweichungen und der Grenzwertfestlegung.

Die Auswertung der 60°-Optiken ist in *Tabelle 4.3* zu finden. Dort werden ebenfalls in Spalte 2 und 3 die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte dargestellt. Der größte Wert in Spalte 2 wurde als „in Ordnung“ bewertet, während der kleinste Wert in Spalte 3 als „nicht mehr in Ordnung“ betrachtet wurde. Die Spalten 4 und 5 enthalten die entsprechenden MacAdam-Ellipsen in SDCM, die den Einfluss der Leuchtdichte nicht berücksichtigen.

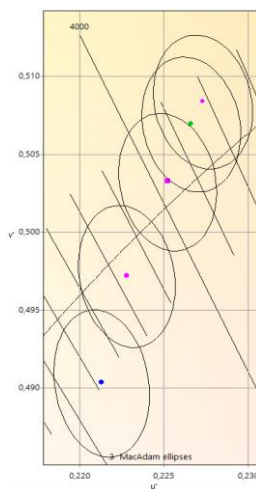
Tabelle 4.3: Auswertung der 60°-Optiken: Spalte 2 und 3 zeigen die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte, in Spalte 4 und 5 sind entsprechend die MacAdam-Ellipsen in SDCM angeführt

Artikelnummer	“In Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	“Nicht in Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	“In Ordnung“ - SDCM	“Nicht in Ordnung“ - SDCM
E	0,52	0,73	2,64	9,65
F	0,68	-	5,55	-
G	0,87	1,14	9,76	16,00

Bei Betrachtung der *Tabelle 4.3* ist ein Widerspruch erkennbar. Der Farbabstand der Optik G, der noch als “in Ordnung“ gilt, beträgt 0,87. Im Gegensatz dazu wurde der Farbabstand der Optik E als „nicht mehr in Ordnung“ deklariert und liegt bei 0,73. Dies bedeutet, dass bei der Optik G eine größere Toleranz akzeptiert wird.

Um den Grund für diese größere Toleranz bei der Optik G herauszufinden, wurde eine genauere Analyse durchgeführt. Dafür wurden die Mittelwerte der einzelnen Zonen in den ColorCalculator von OSRAM Sylvania eingegeben und visualisiert. Die *Abbildung 4.1* repräsentiert a) die Darstellung der Mittelwerte der Optik G in der CIE-Farbtafel 1976 und b) die Legende. Der grün markierte Kreis repräsentiert den Mittelwert der Referenzzone, während der blaue Kreis die Zone 1 darstellt, die als zu blau und somit als „nicht mehr in Ordnung“ betrachtet wurde. Die rosa Symbole repräsentieren alle Zonen, die als “in Ordnung“ deklariert wurden.

a)



b)



Abbildung 4.1: a) Darstellung der Mittelwerte der Optik G in der CIE-Farbtafel 1976
 b) Legende

Der Abstand zwischen der Zone 2 und dem Mittelwert der Referenzzone 4 weist den Wert 0,87 auf. In diesem Fall liegt die Zone 2 näher an der Zone 3 als an der Zone 4. Die Zone 3 liegt auch näher an den 4000K, die als Referenz dienen sollten. Dies wirft die Frage auf, warum die Probanden, die Zone 4 und nicht die Zone 3 als Referenz gewählt haben. Um dies genauer zu untersuchen, wurde die u' und v' Darstellung in der Labsoft Software genauer betrachtet, wie in *Abbildung 4.2* dargestellt.

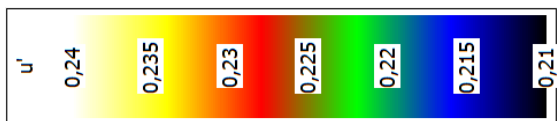
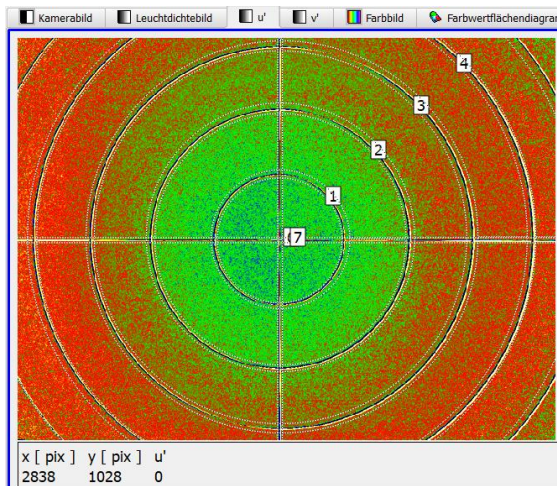
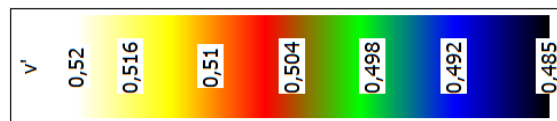
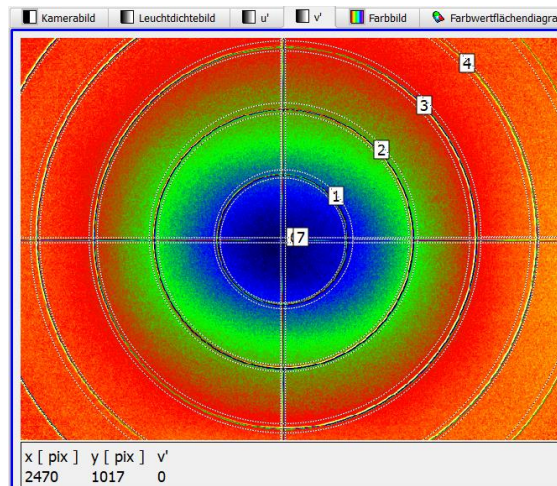
a) u' b) v' 

Abbildung 4.2: Farbkoordinaten der Kameraaufnahme der Optik G a) u' b) v'

Die *Abbildung 4.2 b)* verdeutlicht, dass innerhalb der Zone 3 ein Farbwechsel stattgefunden hat. Dies könnte erklären, warum diese Zone vermutlich nicht als Referenz gewählt wurde, da die Referenzzone nicht nur in etwa 4000K entsprechen, sondern auch möglichst farblich homogen sein sollte. An dieser Stelle sind zwei Kritikpunkte anzumerken. Erstens ist die erarbeitete Methode nicht geeignet, wenn ein Farbwechsel innerhalb einer Zone auftritt. Zweitens ist der Mittelwert einer solchen Zone nicht repräsentativ, da beispielsweise die eine Hälfte der Messwerte über 4000K liegt und die andere Hälfte darunter, was sich im Mittelwert neutralisiert. Dadurch könnte fälschlicherweise angenommen werden, dass eine perfekt homogene 4000K Referenzzone vorliegt, obwohl dies in der Realität nicht der Fall ist.

Bei den 60°-Optiken tritt das Problem mit dem Leuchtdichteunterschied, wie es bei den 30°-Optiken der Fall war, nicht mehr auf. Aus den Werten in *Tabelle 4.3* wird deutlich, dass die Werte ohne Berücksichtigung der Leuchtdichte in SDCM und die Werte mit Berücksichtigung der Leuchtdichte immer eine ähnliche Tendenz aufweisen. Daher lässt sich daraus schließen, dass die Bewertung nicht unabhängig vom Abstrahlwinkel durchgeführt werden kann. Bei den 60°-Optiken wurden jedoch nur drei Optiken dieser

Art bewertet. Diese Anzahl wird als zu gering betrachtet, um eine fundierte Aussage über einen Grenzwert zu treffen.

Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse in der *Tabelle 4.4* eine spezifische Bewertung für die 90°-Optiken widerspiegeln. Ähnlich wie bei den Ergebnissen der 30°- und 60°-Optiken in der *Tabelle 4.1* und der *Tabelle 4.3* zeigen die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte in den Spalten 2 und 3 eine Tendenz, welcher Wert als "in Ordnung" bzw. „nicht mehr in Ordnung“ betrachtet wird. In den Spalten 4 und 5 werden die entsprechenden MacAdam-Ellipsen in SDCM angegeben, ohne Berücksichtigung des Leuchtdichteinflusses.

Die Auswertung der 90°-Optiken ermöglicht eine Analyse und Bewertung des Farbabstands für diesen spezifischen Abstrahlwinkel. Es ist jedoch zu beachten, dass bei den 90°-Optiken nur 4 Optiken bewertet wurden, was keine ausreichende Anzahl für valide Schlussfolgerungen darstellt.

Tabelle 4.4: Auswertung der 90°-Optiken: Spalte 2 und 3 zeigen die Farbabstände unter Berücksichtigung der Leuchtdichte, in Spalte 4 und 5 sind entsprechend die MacAdam-Ellipsen in SDCM angeführt

Artikelnummer	“In Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	“Nicht in Ordnung“ - inkl. Leuchtdichte	“In Ordnung“ - SDCM	“Nicht in Ordnung“ - SDCM
H	0,28	-	2,51	-
I	0,28	-	2,45	-
J	0,57	-	3,52	-
K	0,17	0,21	4,74	6,48

Bei den 90°-Optiken tritt in der Regel seltener das Problem von Farbsäumen im Lichtbild auf, was sich auch in *Tabelle 4.4* widerspiegelt. Bei 3 von 4 Optiken wurde im Lichtbild keine Zone als "nicht in Ordnung" deklariert. Allerdings zeigen die Werte, die die Berücksichtigung der Leuchtdichte einschließen, einen Widerspruch zu den Optiken, bei denen ein farbsaumfreies Lichtbild festgestellt wurde. Die Werte der Optiken H, I und J, die als "in Ordnung" bewertet wurden, sind im Vergleich zum Wert der Optik K, der als "nicht in Ordnung" eingestuft wurde, größer.

Die Werte in den MacAdam-Ellipsen entsprechen dem, was von den Probanden auf der Wand gesehen wurde. Aufgrund dieser Beobachtung wird es als sinnvoll erachtet, bei breitstrahlenden Optiken die Bewertung in SDCM vorzunehmen. Ein Grenzwert von 4,74 SDCM könnte als vorläufiger Richtwert festgehalten werden. Allerdings ist es

notwendig, den Versuch mit weiteren 90°-Optiken zu erweitern, um einen verifizierten Grenzwert zu bestimmen.

Bei dieser Bewertungsmethode wurden die Mittelwerte der jeweiligen Zonen betrachtet. Wie bereits erwähnt, kann dies dazu führen, dass Zonen, in denen Farbwechsel stattfinden, messtechnisch als "in Ordnung" eingestuft werden, obwohl sie es nicht sind. Es wurde jedoch deutlich, dass die Streuung der Messwerte sehr groß ist, wie durch den Variationskoeffizienten veranschaulicht, der sich aus dem Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert ergibt. Dieser ist exemplarisch in *Abbildung 3.2* dargestellt. Dort sind Streuungen bei den Farbabständen ohne Berücksichtigung der Leuchtdichte im Bereich von 24 % bis 55 % zu beobachten, während die Streuung bei den Abständen, die die Leuchtdichte berücksichtigen, zwischen 11 % und 59 % liegt. Dies wurde auch durch die Betrachtung der Farbwertflächendiagramme bestätigt. Folglich ist es nicht sinnvoll, sich ausschließlich auf die Mittelwerte der einzelnen Zonen zu verlassen.

Die Optiken M und L konnten von den Probanden nicht beurteilt werden, da das Lichtbild Flecken aufwies. Da bei der Bewertung die Mittelwerte der einzelnen Zonen verwendet werden, können diese Flecken nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist es lediglich möglich, Optiken zu bewerten, die eine rotationssymmetrische Abstrahlung und Farbverteilung aufweisen. Diese Aussage wurde durch die Messergebnisse bestätigt, die in *Abbildung 4.3* und *Abbildung 4.4* dargestellt sind. Insgesamt wurden somit 13 Optiken in die Beurteilung einbezogen.

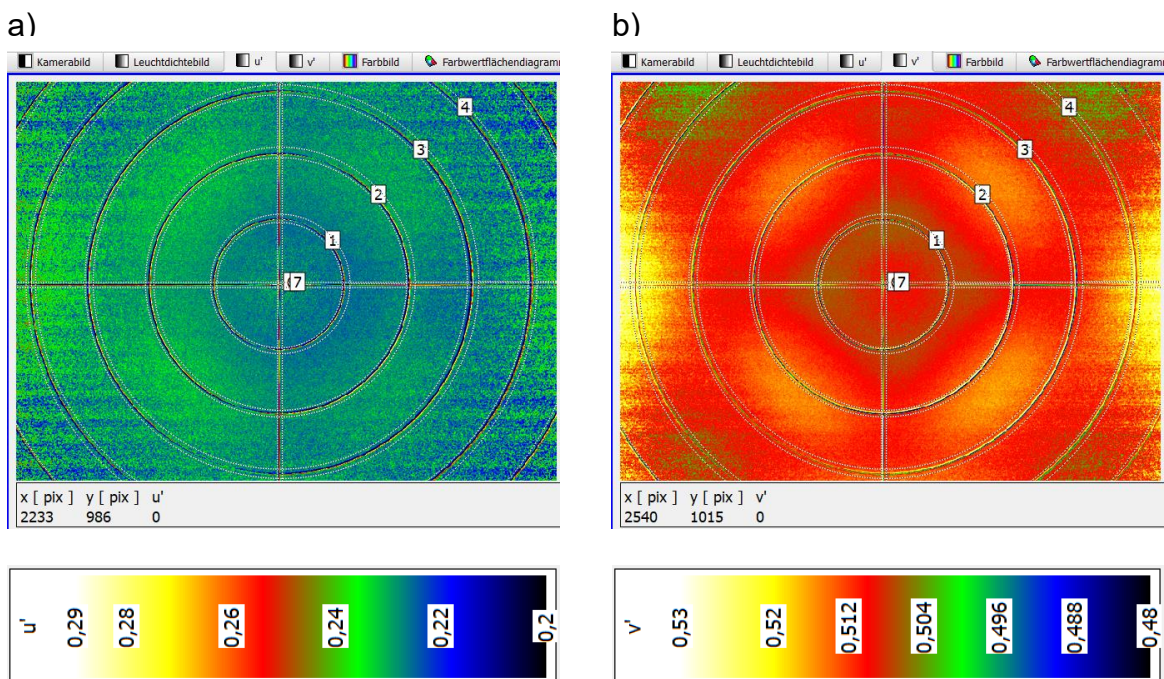


Abbildung 4.3: Farbkordinaten der Kameraaufnahme der Optik L a) u' b) v'

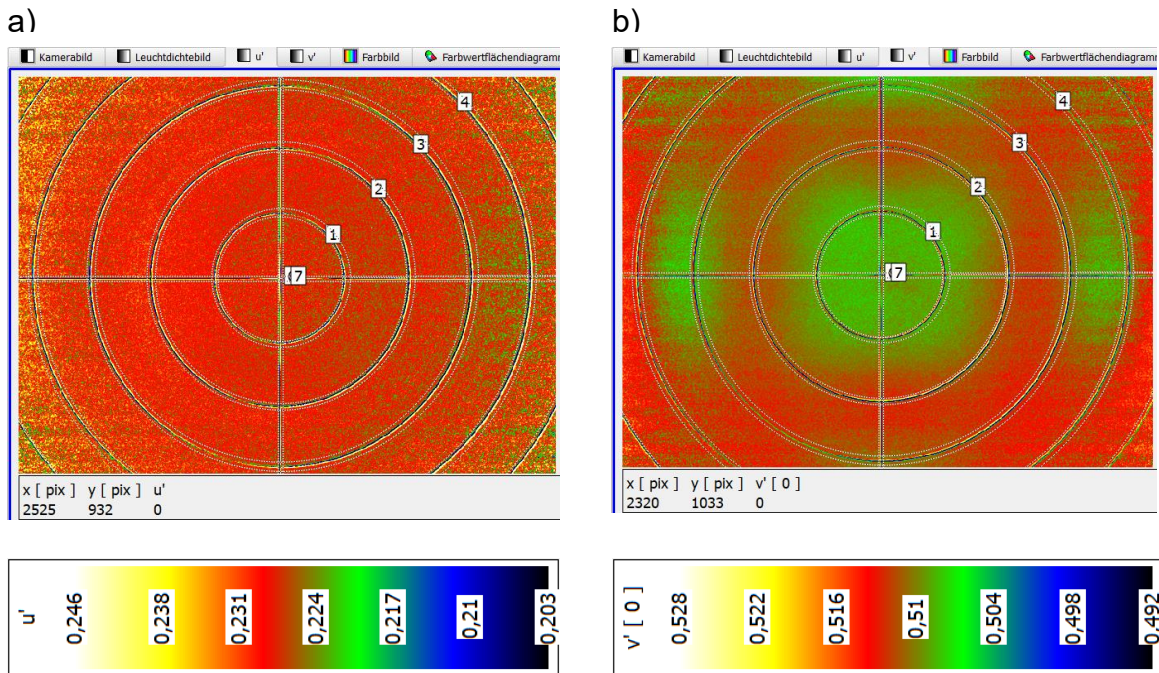


Abbildung 4.4: Farbkoordinaten der Kameraaufnahme der Optik M a) u' b) v'

4.2 Ergebnisse Bewertungsmethode 2

In der *Tabelle 4.5* werden die Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 30° Optiken aufgeführt. Hierbei wird dargelegt, welche Zonen der jeweiligen Optik als "in Ordnung" oder als "nicht in Ordnung" eingestuft wurden. In grün sind die Referenzzonen hinterlegt.

Tabelle 4.5: Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 30° Optiken

Zonen-nr.	A	B V2	B V3	C	D	A mit Anderer LED
1	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Ok	Schlecht	Schlecht
2	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Ok	Schlecht	Schlecht
3	Schlecht	Schlecht	Schlecht	Ok	Schlecht	Schlecht
4	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

In der *Tabelle 4.6* ist die maximale Differenz in v' dargestellt, welche bei den 30° Optiken im Durchschnitt am größten ist. Bei diesen Optiken hat sich gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Steigung, die Schnittmenge und die Wendepunkte bei der Bewertung zu berücksichtigen. Bezüglich der Extremwerte besteht noch Unsicherheit, ob sie ein

gutes Bewertungskriterium darstellen. Denn sie repräsentieren lediglich lokale Minima und Maxima, ohne die Umgebung zu berücksichtigen. Es könnte sein, dass eines der lokalen Minima genau der Referenzfarbe entspricht. In erster Linie geht es jedoch darum, die Farbwechsel zu beschreiben, und dies geschieht gut über die Wendepunkte und die Steigung. Daher sollten, wenn die maximale Differenz, Stand jetzt, über 0,0181 liegt, immer diese drei Kriterien zur Bewertung herangezogen werden. Durch die Berücksichtigung zusätzlicher Optiken kann sich der Grenzwert natürlich verändern.

Tabelle 4.6: maximale Differenz der v' Koordinate im Lichtbild der 30° Optik an der Bewertungswand

Artikelnummer	Maximale Differenz in v'
A	0,024
B V2	0,0195
B V3	0,024
C	0,0238
D	0,0215
A mit Anderer LED	0,0181

Die Ergebnisse der Messauswertung aller 30° Optiken sind in *Tabelle 4.7* und *Tabelle 4.8* zusammengefasst. In diesen Tabellen wird erläutert, aus welchen Gründen bestimmte Zonen als "in Ordnung" oder als "nicht in Ordnung" betrachtet werden.

Tabelle 4.7: Bewertung der einzelnen Zonen für die folgenden 30° Optiken: A, B V2 und B V3

Zonen- nr.	A	B V2	B V3
1	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - keine Schnittmenge - Wendepunkt (r) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - keine Schnittmenge 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - keine Schnittmenge
2	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wendepunkt (l) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wendepunkt
3	<ul style="list-style-type: none"> - Wendepunkt 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt
4			

Bei den Optiken A, B V2 und V3 aus *Tabelle 4.7* sowie der Optik A mit Anderer LED aus *Tabelle 4.8* stimmen die Auswertungen der Messergebnisse mit den Bewertungen der Probanden überein. Zone 1, 2 und 3 wurden jeweils als ungünstig eingestuft, da sie mindestens eines der folgenden Kriterien erfüllen: hohe Steigung, geringe oder keine Schnittmenge oder das Vorhandensein eines Wendepunktes. Zone 4 wurde bei allen vier Optiken als Referenzzone festgelegt und daher als "in Ordnung" betrachtet. In dieser Zone sind weder eine hohe Steigung, eine geringe Schnittmenge noch ein Wendepunkt vorhanden.

Tabelle 4.8: Bewertung der einzelnen Zonen für die folgenden 30° Optiken: C, D und A mit Anderer LED

Zonen-nr.	C	D	A mit Anderer LED
1	<ul style="list-style-type: none"> - keine Schnittmenge - Wendepunkt (r) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - keine Schnittmenge - Wendepunkt (r) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - wenig Schnittmenge - Wendepunkt (r)
2	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Keine Schnittmenge - Wendepunkt (r) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt (l) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wendepunkt (l)
3	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Steigung - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt 	<ul style="list-style-type: none"> - Wenig Schnittmenge - Wendepunkt (l) 	<ul style="list-style-type: none"> - Wendepunkt
4		<ul style="list-style-type: none"> - Wendepunkt (r) 	

Bei der Optik C weichen die Messergebnisse von den Bewertungen der Probanden ab. Dies ist auf dieselbe Begründung wie bei der Bewertungsmethode 1 zurückzuführen. Insbesondere die ersten beiden Zonen wurden zu hell beleuchtet, sodass eine Unterscheidung zwischen Helligkeit und Bläulichkeit nicht möglich war. Daher führen diese Umstände zu Abweichungen zwischen den Probandenbewertungen und den Messergebnissen. Zusätzlich dazu wurde auch die dritte Zone messtechnisch als "nicht in Ordnung" eingestuft.

Auch bei der D stimmt die Bewertung nicht mit den Messergebnissen überein. Sogar die Referenzzone 4 wird bei dieser Optik als "nicht in Ordnung" eingestuft, da sich in dieser Zone ein Wendepunkt befindet. Es besteht eine Diskrepanz zwischen den Bewertungen der Probanden und den ermittelten Messergebnissen dieser Optik. In Abbildung 39 werden die Messwerte und das Polynom 9. Grades der Optik des Mitbewerbers 1 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass das Polynom die Messwerte in den rechten Bereichen von Zone 1 und Zone 2 nicht korrekt abbildet. Zudem ist ersichtlich, dass sich die Verteilung nicht in der Mitte befindet. Der Wendepunkt, der dazu führt, dass Zone 4 als "nicht in Ordnung" betrachtet wird, liegt in Zone 4 links. In Zone 4 rechts hingegen liegt kein Wendepunkt, dafür aber in Zone 3 rechts. Wenn die Verteilung symmetrisch wäre, würde der Wendepunkt vermutlich

irgendwo dazwischen oder knapp innerhalb einer der beiden Zonen liegen. Diese beiden Faktoren können Einflüsse sein, die darauf hinweisen, dass die Probandenbeurteilung durch die Messergebnisse nicht angemessen widerspiegelt wird.

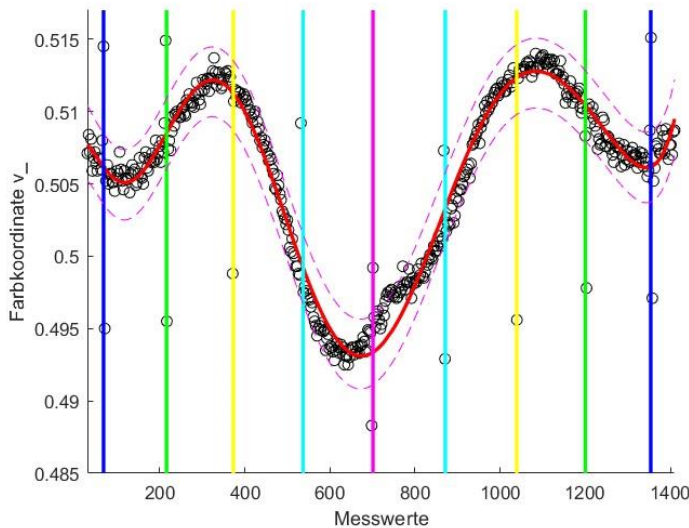


Abbildung 4.5: v' Messwerte und Polynom 9. Grades der D Optik

Die Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 60° Optiken sind in *Tabelle 4.9* aufgeführt. Sowohl bei den Optiken E als auch F wurden alle Zonen als "in Ordnung" eingestuft. Bei der Optik G hingegen wurde lediglich Zone 1 als "nicht in Ordnung" bewertet, während die restlichen drei Zonen als "in Ordnung" gelten.

Tabelle 4.9: Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 60° Optiken

Zonennr.	E	G	F
1	Ok	Schlecht	Ok
2	Ok	Ok	Ok
3	Ok	Ok	Ok
4	Ok	Ok	Ok

Die Optik G weist eine maximale Differenz in v' auf, die größer als 0,0181 ist. Daher ist es ratsam, bei der Bewertung dieser Optik die Steigung, die Schnittmenge und die Wendepunkte zu berücksichtigen. In *Tabelle 4.10* sind die maximalen Differenzen in v' für alle 60° Optiken aufgeführt. Die restlichen Optiken weisen maximale Differenzen in v' auf, die unterhalb von 0,0181 liegen. Für diese Optiken sollten ausschließlich die Steigung und die Schnittmenge betrachtet werden, da die Wendepunkte in diesem Fall

weniger aussagekräftig sind. Es gibt Farbwechsel von lokalen Minima zu lokalen Maxima, jedoch liegen diese so nah beieinander, dass der Wendepunkt keine relevante Rolle spielt.

Tabelle 4.10: maximale Differenz der v' Koordinate im Lichtbild der 60° Optik an der Bewertungswand

Artikelnummer	Maximale Differenz in v'
E	0,0157
G	0,0239
F	0,0112

Bei den 60° Optiken stimmt keine Optik vollständig mit den Probandenaussagen überein, sondern es sind immer nur einzelne Zonen, die mit diesen übereinstimmen. Die Auswertungen sind in *Tabelle 4.11* dargestellt.

Bei der Optik E würde nach der Bewertungsmethode eine Zone als "nicht in Ordnung" eingestuft werden, nämlich die Zone 4. In dieser Zone ist die Steigung größer als $3,2 \times 10^{-5}$, was den Probandenurteilen widerspricht. Bei der Optik G werden nicht nur die Zone 1, wie von den Probanden beurteilt, als "nicht in Ordnung" betrachtet, sondern auch die die Zonen 2 und 3. Die Optik F weist zwei Zonen auf, die messtechnisch als "nicht in Ordnung" deklariert werden würden, nämlich die Zone 1 und die Zone 4 aufgrund einer zu geringen Schnittmenge.

Tabelle 4.11: Bewertung der einzelnen Zonen für die 60° Optiken

Zonen- nr.	E	G	F
1		- keine Schnittmenge	- geringe Schnittmenge
2		- Hohe Steigung - keine Schnittmenge - Wendepunkt	
3		- Hohe Steigung - Wenig Schnittmenge	

Zonen- nr.	E	G	F
4	- Hohe Steigung		- Geringe Schnittmenge

Die Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 90° Optiken sind in *Tabelle 4.12* dargestellt. Bei den Optiken H, I und J wurden alle Zonen als "in Ordnung" eingestuft. Bei der Optik des Mitbewerbers 3 hingegen wurde nur Zone 4 als "nicht in Ordnung" bewertet, während die restlichen drei Zonen als "in Ordnung" gelten.

Tabelle 4.12: Bewertungen der Probanden für die einzelnen Zonen der 90° Optiken

Zonen- nr.	H	I	K	J
1	Ok	Ok	Ok	Ok
2	Ok	Ok	Ok	Ok
3	Ok	Ok	Ok	Ok
4	Ok	Ok	Schlecht	Ok

In *Tabelle 4.13* sind die maximalen Differenzen in v' für alle 90° Optiken aufgeführt. Bei allen vier Optiken liegen die maximalen Differenzen in v' unterhalb von 0,0181, was bedeutet, dass nur die beiden Kriterien Steigung und Schnittmenge berücksichtigt werden sollten.

Tabelle 4.13: maximale Differenz der v' Koordinate im Lichtbild der 90° Optik an der Bewertungswand

Artikelnummer	Maximale Differenz in v'
H	0,0045
I	0,0053
K	0,0139
J	0,0063

In *Tabelle 4.14* sind die Bewertungen der einzelnen Zonen der 90° Optiken aufgeführt. Bei den Optiken H, I und K stimmen die Messergebnisse genau mit den Bewertungen der Probanden überein. Bei der Optik J würden messtechnisch die Zonen 3 und 4

aufgrund der geringen Schnittmenge als "nicht in Ordnung" eingestuft werden, während die Probanden diese Zonen als "in Ordnung" bewertet haben.

Tabelle 4.14: Bewertung der einzelnen Zonen für die folgende 90° Optiken: H, I, K und J

Zonen-nr.	H	I	K	J
1				
2				
3				- Geringe Schnittmenge
4			- Hohe Steigung - Geringe Schnittmenge	- Geringe Schnittmenge

5 Simulation

Abschließend wurde das Szenario in LightTools nachgestellt, um zu überprüfen, ob ähnliche Werte wie bei den Messungen erzielt werden können. Durch die Simulation sollen weitere Erkenntnisse gewonnen werden und es kann eine Validierung der Messergebnisse erfolgen. Es ist wichtig, die Übereinstimmung zwischen den beiden Methoden zu überprüfen, um sicherzustellen, dass die Simulation ein geeignetes Werkzeug für die Untersuchung der Farbabweichungen und deren Ursachen ist.

Die Simulation wurde an der Optik A durchgeführt. Bei der Durchführung der Simulation wurden mehrere wichtige Einflussfaktoren berücksichtigt, darunter ein Lichtquellenmodell sowie Informationen über Material- und Oberflächeneigenschaften. Diese Faktoren spielen eine entscheidende Rolle in der Simulation und sollten sorgfältig berücksichtigt werden.

Die genaue Modellierung der Lichtquellen ist von entscheidender Bedeutung, da sie die Ausbreitung und Interaktion des Lichts beeinflussen. Dies beinhaltet die Berücksichtigung von Parametern wie Spektrum, Intensität, Richtung und anderen relevanten Eigenschaften der Lichtquelle. Um die Strahlendaten der LED messen zu können, wurden fünf LEDs von der Platine abgelötet und einzeln auf separaten Platinen wieder aufgelötet. Vor der Vermessung der Strahlendaten wurden die LEDs in der U-Kugel überprüft, um sicherzustellen, dass sie durch die Lötvorgänge keine Defekte aufweisen. Die Ergebnisse der Messungen aus der Ulbricht-Kugel sind in der *Tabelle 5.1* aufgeführt, wobei die Strahlendaten der LED Nr. 3 extern vermessen

wurden. Bei der Betrachtung der fünf einzelnen LEDs untereinander wurde deutlich, dass sich ihre Farbtemperaturen voneinander unterscheiden. Insbesondere zwischen der Platine 2 und der Platine 5 wurde ein Farbunterschied von 181 K festgestellt. Dies verdeutlicht, dass innerhalb dieser Auswahl von fünf LEDs, die einen Teil der insgesamt 24 Leuchtdioden auf der Platine darstellen, verschiedene Farbtemperaturen vorhanden sind. Somit ist offensichtlich, dass eine Variation der Farbtemperatur innerhalb der einzelnen LEDs auf der Platine besteht.

Tabelle 5.1: Messergebnisse aus der Ulbricht-Kugel der fünf einzelnen LEDs der Signify Platine zur Strahlendatenvermessung

Nr.	Lichtstrom [lm]	Farbtemperatur [K]	CRI
1	52,0	4093	83,3
2	51,1	4101	82,9
3	49,3	4096	83,0
4	51,4	3966	82,6
5	51,9	3920	82,0

Die Materialeigenschaften der Objekte im simulierten Szenario haben einen erheblichen Einfluss auf die Lichtausbreitung, Reflexion, Brechung und Absorption. Daher ist es wichtig, die richtigen Materialeigenschaften auszuwählen und sie genau zu modellieren, um realistische Simulationsergebnisse zu erzielen. Gerade bei transmittierenden Bauteilen ist der Brechungsindex der jeweiligen Materialien eine entscheidende Eigenschaft. Für die Optik A wurde das entsprechende Polycarbonat, aus dem sie gefertigt ist, in der Simulation berücksichtigt. Für die Papp-/Schaumstoff-Platte, die als Bewertungswand diente, wurde in der Simulation ein Papiermaterial ausgewählt. Da die genaue Bezeichnung des Materials nicht bekannt war und die Reflexion anstatt der Transmission im Vordergrund stand, war die genaue Materialbezeichnung weniger relevant. Dennoch ist dies ein Bereich, in dem noch Verbesserungen in der Simulation erzielt werden können.

Die Oberflächeneigenschaften von Objekten wie Glanz, Rauheit, Transparenz und Streuung beeinflussen die Lichtverteilung und das Erscheinungsbild. Eine genaue Modellierung dieser Eigenschaften ist entscheidend, um realistische Simulationsergebnisse zu erzielen. Bei der Papp-/Schaumstoff-Platte, die als Bewertungswand fungierte, war insbesondere die Oberflächenbeschaffenheit und Reflektivität von Bedeutung. Daher wurde eine Vermessung der Oberfläche unter verschiedenen Winkeln (0°, 20°, 40° und 60°) und für verschiedene Wellenlängen (465 nm, 525 nm, 630 nm) mit dem Mini Diff durchgeführt. Die gemessenen Daten wurden

dann in das LightTools-Format exportiert und in die Simulation eingebunden, um die optischen Eigenschaften der Oberfläche korrekt zu berücksichtigen.

Des Weiteren sollten die 3D-Geometrien der optischen Elemente möglichst den realen Gegebenheiten entsprechen und auch fertigungsrelevante Radien und Formschrägen berücksichtigen.

Aufgrund der höheren Variationskoeffizienten wurde die Bewertungsmethode zwei als geeigneter angesehen als die Methode eins. Aus diesem Grund wurde bei der Auswertung der Simulationsergebnisse auch die Bewertungsmethode zwei angewendet.

Im Anschluss wurden die Ergebnisse der Messungen mit den Simulationsergebnissen verglichen. Die Messergebnisse sind in *Tabelle 5.2* und der oberen Zeile von *Tabelle 5.4* aufgeführt. Die Simulationsergebnisse sind hingegen in *Tabelle 5.3* und der unteren Zeile von *Tabelle 5.4* dargestellt.

Für die Filterung der Simulationsergebnisse wurde zweimal Delta verwendet, im Gegensatz zur Auswertung der Messergebnisse, bei der nur einmal Delta angewendet wurde. Der Delta-Wert, gibt Auskunft über den Standardfehler für die Vorhersage. Dieser Unterschied ergibt sich daraus, dass in der Simulation die schwarzen Linien nicht dargestellt wurden, wodurch andere Reflexionen, wie sie bei der realen Bewertungswand auftraten, nicht berücksichtigt wurden. Durch die Verwendung eines doppelten Delta wurden 95 % der Messwerte zur Erstellung des Polynoms 9. Grades einbezogen.

Die absoluten Werte der Steigung unterscheiden sich zwischen Messung und Simulation. Sowohl ist bei der Messung als auch bei der Simulation die steilste Steigung in der Zone 2 und die Steigung mit der zweithöchsten Steigung in der Zone 1 zu beobachten. Bei der Messung folgt darauf die Zone 4 und schließlich die Zone 3 mit der geringsten Steigung. In der Simulation hingegen ergibt sich ein anderes Ergebnis, da dort die Steigung in der Zone 4 geringer ist als in der Zone 3. Die Farbskala der beiden Auswertungen ist in *Abbildung 5.1* dargestellt.

Im Vergleich der Schnittmengen ist zu erkennen, dass bei der Messung nur Zone 1 eine Schnittmenge aufweist, die weniger als 50 % Übereinstimmung mit der Referenzzone hat. In der Simulation hingegen umfasst eine geringe Schnittmenge die Zonen 1 bis 3, bei der weniger als 50 % Übereinstimmung mit der Referenzzone besteht.

In der Messung sowie in der Simulation befinden sich die Wendepunkte und Extremwerte in denselben Zonen.

Tabelle 5.2: Auswertung der Messwerte der 30° Optik A in Bezug auf Steigung, Schnittmenge, Wendepunkte und Extremwerte

	A	stärkste absolute Steigung [x10 ⁻⁵]	Mittelwert aus Steigung [x10 ⁻⁵]	Schnittmenge [%]	Wendepunkt	Max	Min	Warum n.i.O.?
1	schlecht	4,93	4,3	0	X (r)		X (l)	- Hohe Steigung - keine Schnittmenge - Wendepunkt - Minimum
2	schlecht	6,07	5,205	79,41	X (l)			- Hohe Steigung - Wendepunkt
3	schlecht	2,66	1,94	80,41	X	X		- Wendepunkt - Maximum
4	ok	2,74	2,555	100			X	- Minimum

Tabelle 5.3: Auswertung der Simulationsergebnisse der 30° Optik A in Bezug auf Steigung, Schnittmenge, Wendepunkte und Extremwerte

	A	stärkste absolute Steigung [x10 ⁻⁵]	Mittelwert aus Steigung [x10 ⁻⁵]	Schnittmenge [%]	Wendepunkt	Max	Min	Warum n.i.O.?
1	schlecht	7,7	6,785	16,52	X (l)		X (re)	- Hohe Steigung - Geringe Schnittmenge - Wendepunkt - Minimum
2	schlecht	8	7,07	16,81	X (r)			- Hohe Steigung - Geringe Schnittmenge - Wendepunkt
3	schlecht	6,14	5,67	7,55	X	X		- Hohe Steigung - Geringe Schnittmenge - Wendepunkt - Maximum
4	ok	4,04	3,82	100			X	- Minimum



Abbildung 5.1: Farbskala für die farblich markierten Steigungswerte in der Auswertung der Optik A nach Bewertungsmethode 2 – Messergebnisse und Simulationsergebnisse (aus Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3)

Die maximale Differenz in v' beträgt in der Messung 0,0240 und in der Simulation 0,0241. Diese Werte stimmen also sehr gut miteinander überein. Die Bewertung der Probanden, dass Zone 1 bis 3 als "nicht in Ordnung" und nur Zone 4 als "in Ordnung" bewertet wurden, wird sowohl von den Messwerten als auch von den Simulationswerten bestätigt, wenn auch mit verschiedenen Kriterien.

In den Diagrammen von v' in *Tabelle 5.4* ist zu erkennen, dass sich die Extremwerte in der Mitte von Zone 1 und auf den gelben Linien zwischen Zone 2 und 3 zwischen

Messung und Simulation unterscheiden. Die Werte der Simulation sind absolut betrachtet größer als die der Messung. Der Abfall der Kurve nach Zone 3 ist in der Simulation viel stärker ausgeprägt als in den Messwerten.

Die Kurve der Simulationsergebnisse ist insgesamt symmetrischer als die der Messergebnisse, was auch in der 1. und 2. Ableitung deutlich sichtbar ist. Dies könnte darauf hindeuten, dass in der Simulation keine Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen erfolgte, wie beispielsweise Einfallstellen der Optik oder Fertigungstoleranzen bei der Bestückung der Platine.

Tabelle 5.4: Vergleich der Diagramme der Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen

	v'	1. Ableitung	2. Ableitung
Messung			
Simulation			

Um die Eignung der Methode zur Bewertung von Farbabständen bei Farbsäumen zu überprüfen, ist es ratsam, weitere Simulationen zur Auswertung hinzuzufügen. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit bekannten Referenzwerten oder Messdaten können die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Methode bewertet werden. Wenn die Simulationsergebnisse konsistent und vergleichbar mit den Referenzwerten oder Messdaten sind, spricht dies für die Eignung der Methode zur Bewertung von Farbabständen bei Farbsäumen.

6 Zusammenfassung und Verbesserungsvorschläge

Insgesamt wurden zwei verschiedene Bewertungsmethoden zur Beurteilung der Farbsäume betrachtet. Bewertungsmethode 1 basiert auf der Mittelwertbildung aller Messwerte einer Zone mit Standardabweichung, während Bewertungsmethode 2 einen waagerechten Schnitt durch die Bewertungsebene verwendet und Kriterien wie Steigung und Schnittmenge berücksichtigt.

Bei Bewertungsmethode 1 haben die durchgeführten Versuche in Bezug auf die Leuchtdichte und den Abstrahlwinkel wertvolle Erkenntnisse geliefert. Es wurde festgestellt, dass es keinen festen Grenzwert für alle Abstrahlwinkel gibt, da die Beurteilung stark von der Leuchtdichte abhängt. Engstrahlende Optiken sollten daher unter Berücksichtigung der Leuchtdichte bewertet werden, während für breitstrahlende Optiken die MacAdam-Methode zur Beurteilung geeignet ist, sofern keine großen Standardabweichungen bei den Mittelwerten vorliegen. Es wurde jedoch deutlich, dass die Streuung der Messwerte groß ist, wie durch den Variationskoeffizienten verdeutlicht. Dies wurde auch durch die Betrachtung der Farbwertflächendiagramme bestätigt. Daher ist es nicht ratsam, sich allein auf die Mittelwerte zu verlassen. Eine Erhöhung der Anzahl der Zonen könnte dazu beitragen, kleinere Bereiche abzudecken und eine präzisere Beurteilung der Optiken zu ermöglichen.

Bei der Bewertungsmethode 2 sind eine geringe Steigung und eine hohe Schnittmenge erstrebenswert, und weitere Versuche sind erforderlich, um die genauen Werte für eine maximale Steigung und eine minimale Schnittmenge zu ermitteln. Durch die Untersuchung zusätzlicher Optiken kann auch die Bedeutung der Betrachtung der Wendepunkte und Extremwerte ermittelt werden.

Für Bewertungsmethode 2 wurde ein potenzieller Verbesserungsvorschlag erarbeitet, um das Problem der außermittigen Ausrichtung und nicht rotationssymmetrischen Abstrahlung der Optiken anzugehen. Es wurde in Betracht gezogen, die Polynome der v' -Messwerte durch eine Symmetrisierung der jeweiligen linken und rechten Messwerte mittels Mittelwertbildung anzupassen. Durch die Berechnung des Durchschnitts der Farbwerte auf beiden Seiten sollte ein Ausgleich geschaffen werden, um die Auswirkungen der fehlenden Rotationssymmetrie zu minimieren. Dieser Ansatz zielte darauf ab, eine symmetrischere Verlaufskurve für die v' -Polynome zu erzeugen und somit eine präzisere Auswertung zu ermöglichen. Durch die Anwendung dieses Verfahrens sollte eine verbesserte Analyse und Vergleichbarkeit der Farbveränderungen zwischen den Zonen, unabhängig von potenziellen Asymmetrien im Lichtbild der Optiken, erreicht werden. Es ist jedoch zu beachten, dass dieser Verbesserungsvorschlag bisher noch nicht umgesetzt wurde, da noch nicht bekannt ist, ob dies die Messwerte beeinflusst oder verfälscht. Weitere Untersuchungen und Tests wären erforderlich, um die Auswirkungen dieser Symmetrisierungsmethode auf die Messergebnisse zu beurteilen.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Bewertungsmethode besteht darin, Polynome 9. Grades für die einzelnen Zonen zu bilden, anstatt für alle Messpunkte ein einziges gemeinsames Polynom zu erzeugen. Dadurch können die Messwerte besser abgebildet werden.

Die Aufnahme mit der Kamera umfasste nicht den gesamten Bereich der Bewertungswand, wodurch in der Simulation eine grobe Abschätzung des verwendeten Bereichs basierend auf dem Kamerabild vorgenommen werden musste. Als Verbesserungsvorschlag für zukünftige Durchführungen könnte die Ausrichtung der Kamera so angepasst werden, dass die gesamte Breite der Wand auf der Aufnahme sichtbar ist. Dadurch wäre eine präzisere Erfassung des gesamten Bewertungsbereichs möglich.

Allgemein stellte sich als Herausforderung heraus, eine geeignete Referenzzone festzulegen, da sich die Werte innerhalb der Zonen verändern können. Es ist anzunehmen, dass weitere Untersuchungen und Methoden erforderlich sind, um eine geeignete Referenzzone zu bestimmen.

Als Verbesserungsvorschlag könnte von den Probanden erfragt werden, in welcher Zone sie einen Farbwechsel wahrnehmen und ob dieser von gelb nach blau oder umgekehrt erfolgt. Diese zusätzlichen Informationen könnten dazu beitragen, die Bewertung zu präzisieren.

Insgesamt liefert der durchgeführte Versuch wichtige Erkenntnisse und zeigt Möglichkeiten zur Verbesserung der Methodik auf, um zuverlässigere Bewertungen von Optiken vorzunehmen. Weitere Untersuchungen und Experimente sind erforderlich, um die Ergebnisse zu verifizieren und das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Leuchtdichte, Abstrahlwinkel und Farbabstand weiter zu vertiefen.

7 References

- [1] Rotscholl, I. und Neumann, C. „Die Farbtemperatur in der Lichttechnik.“ https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/Bereiche/MB/lichttechnik/Lux_junior/2015/Rotscholl_Lux_junior_2015.pdf (Zugriff am: 4. Juli 2023).

Lichtstärkeinheit im europäischen Vergleich - Stand der Bearbeitung des aktuellen EURAMET- Schlüsselvergleichs -

Maatje Hilmer, Johannes Ledig

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Abstract

Die nationalen Metrologieinstitute (NMIs) der Mitgliedsstaaten der Meterkonvention verpflichteten sich 1999 in einer gemeinsamen Vereinbarung, dem „Mutual Recognition Arrangement (MRA)“, zur gegenseitigen Anerkennung der in den NMIs bewahrten Normale und der ausgestellten Ergebnisberichte. Diese Vereinbarung beinhaltet die Aufforderung zu regelmäßig durchgeführten Schlüsselvergleichen um jeweils die Äquivalenz der realisierten Einheiten mit einem Vergleichsreferenzwert, dem „Key Comparison Reference Value“ (KCRV), festzustellen.

Mit der Veröffentlichung des Abschlussberichts im Mai 2022 wurde der aktuelle weltweite Lichtstärkevergleich von 2014 abgeschlossen. Den in diesem Vergleich ermittelte KCRV gilt es nun in den einzelnen Metrologieregionen (Regional Metrology Organizations – RMOs) in einem abgeleiteten Vergleich weiterzugeben.

Anfang 2020 startete ein RMO-Schlüsselvergleich in der EURAMET-Region. Auf dieser Vergleichsebene kann jedes Institut mit der nötigen technischen Kompetenz teilnehmen. Für diesen Sternvergleich mittels glühlampenbasierten Lichtstärkenormallampen vom Typ Osram Wi41/G haben sich 21 Institutionen angemeldet. Als Pilotlabor, welches die Organisation, die Koordination vom Entwurf des Technischen Protokolls für den Ablauf des Vergleichs sowie die Durchführung und Auswertung der Vergleichsmessungen übernimmt, fungiert das METAS, das NMI der Schweiz.

Der KCRV aus dem aktuellen Weltvergleich wird in diesen abgeleiteten Vergleich anhand der Link-Labore PTB (Deutschland), METAS (Schweiz) und IO-CSIC (Spanien) eingebracht.

Die Messungen am Pilotlabor wurden im Dezember 2022 abgeschlossen und die Teilnehmer sind nun angehalten, ihre TransfERNormale abzuholen, bis April 2023 die notwendigen Rückmessungen in ihren Laboren durchzuführen und dem Piloten die Ergebnisse zur finalen Auswertung mitzuteilen.



1. Einleitung

Die nationalen Metrologie Institute (NMIs) der Mitgliedsstaaten der Meterkonvention verpflichteten sich 1999 in einer gemeinsamen Vereinbarung dem „Mutual Recognition Arrangement (MRA)“ zur gegenseitigen Anerkennung der in den NMIs bewahrten Normalen und der ausgestellten Ergebnisberichte.

Diese Vereinbarung beinhaltet die Aufforderung zu regelmäßig durchgeführten Schlüsselvergleichen um die Äquivalenz der realisierten Einheiten mit einem Referenzwert, dem „Key Comparison Reference Value“ (KCRV) festzustellen. Die Äquivalenz nationaler Normale im Bereich der Photometrie und Radiometrie wird durch, vom Consultative Committee of Photometry and Radiometry (CCPR) ausgewählte und organisierte, Schlüsselvergleiche festgestellt. Seit Inkrafttreten des MRA wurden für die Lichtstärke zwei weltweite Schlüsselvergleiche durchgeführt. Der erste Schlüsselvergleich wurde 1998/99 durchgeführt und der Zweite, der CCPR-K3.2014 startete im Jahr 2014 und wurde im Mai 2022 mit Veröffentlichung des Abschlussberichtes abgeschlossen. Der in diesem zweiten weltweiten Vergleich ermittelte KCRV wird nun in den jeweiligen Regional Metrology Organisations (RMO) in abgeleiteten Vergleichen an Institute weitergegeben, die nicht am weltweiten Vergleich teilnehmen konnten. In der EURAMET-Region startete ein abgeleiteter Schlüsselvergleich Anfang 2020.

Im Folgenden wird kurz der aktuelle Weltvergleich für die Lichtstärke umrissen und einige Aspekte zur Organisation zum Ablauf und aktuellen Stand des derzeit noch laufenden EURAMET-Schlüsselvergleichs vorgestellt.

2. CCPR-K3.2014 globaler Schlüsselvergleich für die Lichtstärke

Das CCPR beschloss 2009, dass ein zweiter weltweiter Schlüsselvergleich für die Lichtstärke stattfinden sollte. Als Pilotlabor, welches die Messungen durchführen und auswerten sollte, wurde das NRC, das nationale Metrologie Institut Kanadas, bestimmt. Aus 5 verschiedenen RMOs wurden insgesamt 12 Teilnehmer ausgewählt. Voraussetzung für die teilnehmenden Institute waren unter anderem eine eigene Realisierung der Lichtstärkeeinheit, Mitgliedschaft im CCPR, Vorhandensein der notwendigen technischen Voraussetzungen und die Bereitschaft, den KCRV in den jeweiligen RMOs in abgeleiteten Schlüsselvergleichen weiterzugeben.

Der Transport der Lichtstärkeeinheit erfolgte ausschließlich unter Verwendung von Glühlampen für wissenschaftliche Zwecke. Nach Befragung der Teilnehmer wurden als zulässige Lampentypen OSRAM Wi41/G und Polaron LIS-T75 ausgewählt.

Aufgrund der Empfindlichkeit der Transfernormale wurde der Vergleich als Sternvergleich durchgeführt und die relativen Vergleichsmessungen fanden sämtlich am National Research Council (NRC) in Kanada von 2014-2015 statt. Die Normallampen wurden zunächst am Institut des jeweiligen Teilnehmers gemessen; anschließend wurden die Normale per Handtransport oder Versand an das NRC nach Kanada gegeben, wo die entscheidenden Vergleichsmessungen durch das

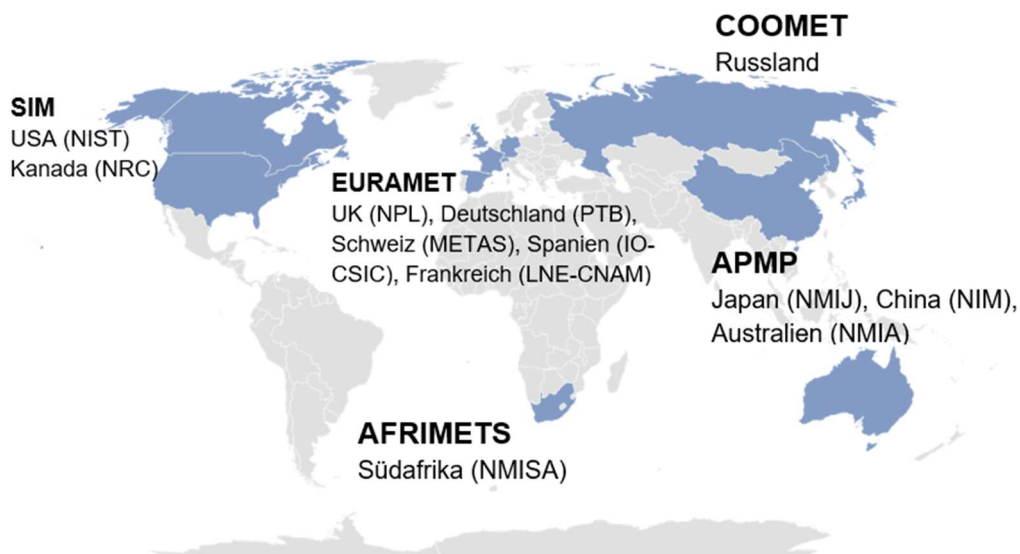


Abbildung 1: Weltkarte, Staaten der Institute die am CCPR-K3.2014 teilgenommen haben sind blau eingefärbt.

© Australian Bureau of Statistics, GeoNames, Geospatial Data Edit, Microsoft, Navinfo, OpenStreetMap, TomTom, Wikipedia

Pilotlabor durchgeführt wurden. 2015 konnten die Teilnehmer ihre Normallampen wieder abholen und die erforderlichen Rückmessungen durchführen. Die PTB brachte ihre Einheit mit einer Lampengruppe, bestehend aus sechs Lampen vom Typ OSRAM Wi41/G, welche direkt an das nationale Normal für die Lichtstärke angeschlossen wurden, in den Vergleich ein. Das NRC wertete die Messungen aus und 2022 wurde der finale Bericht des CCPR Schlüsselvergleichs veröffentlicht.

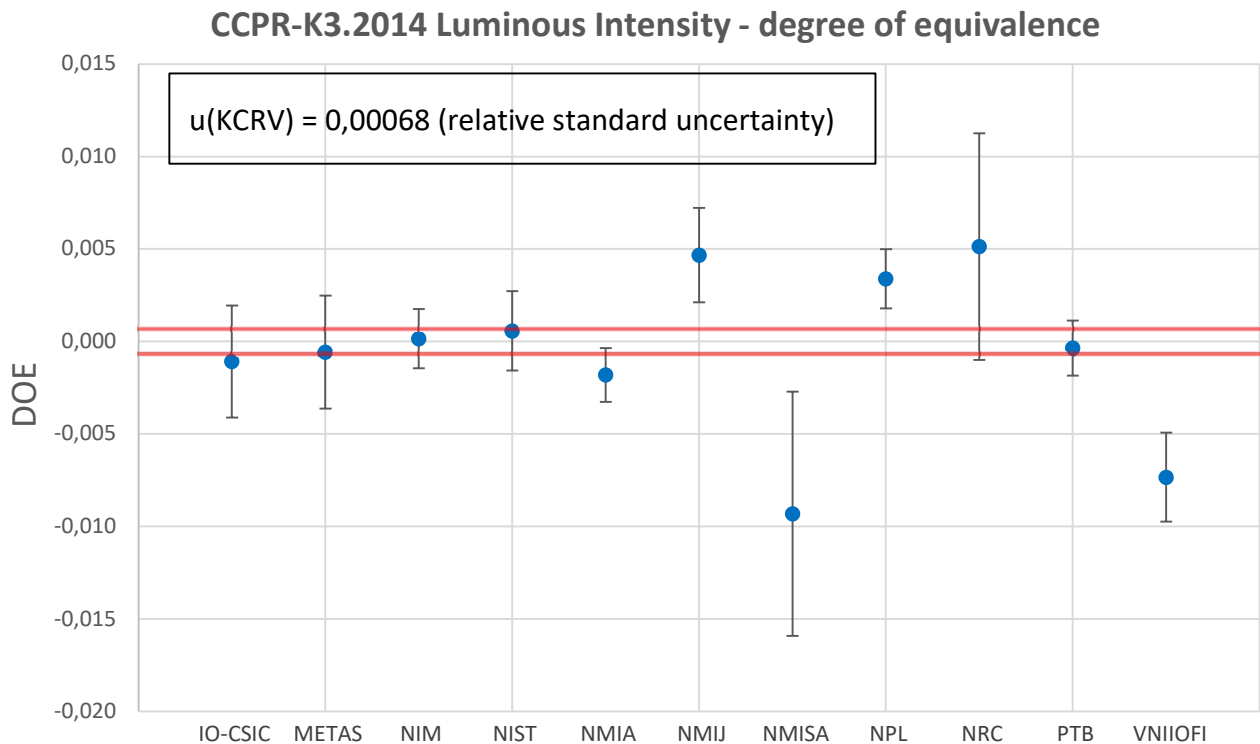


Abbildung 2: Ergebnis des CCPR-K3.2014, Daten entnommen aus [1]

Abbildung zwei zeigt das Ergebnis des CCPR Schlüsselvergleichs. Es ist die relative Abweichung der Lichtstärkewerte der Teilnehmer jeweils mit der beigeordneten relativen Standardunsicherheit (schwarzer Balken) vom ermittelten KCRV dargestellt. In rot ist die Standardabweichung des KCRV selbst dargestellt.

Das technische Protokoll ^[5] und der vollständige Abschlussbericht ^[1] des aktuellen weltweiten Schlüsselvergleichs für die Lichtstärke, dem CCPR-K3.2014, wurden auf folgender Webseite veröffentlicht: <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=719>
Der Abschlussbericht enthält unter anderem Beschreibungen der Messapparaturen und -abläufe sowie die Berechnung der Messunsicherheit für die Lichtstärkewerte der einzelnen Teilnehmer.

3. EURAMET Key Comparison EURAMET.PR-K3.2020

Nach Abschluss des weltweiten Schlüsselvergleichs für die Lichtstärke muss das Ergebnis, der Key Comparison Reference Value (KCRV), desselbigen in den einzelnen RMOs an Institute weitergegeben werden, die nicht Teilnehmer am Weltvergleich waren. Im RMO EURAMET geschieht dies durch den Anfang 2020 beschlossenen abgeleiteten Schlüsselvergleich EURAMET.PR-K3.2020. Anders als im CCPR-Vergleich müssen die Teilnehmer beim abgeleiteten EURAMET-Vergleich zwar eine Rückführung der Einheit Candela vorweisen, eine eigene Realisierung ist jedoch keine Voraussetzung. Auf dieser Vergleichsebene kann jedes Institut mit der nötigen technischen Kompetenz teilnehmen.

Zusätzlich zu Instituten aus 18 Ländern der EURAMET-Region nehmen das NMI Usbekistan aus der RMO COOMET und das NMI Saudi-Arabiens aus der RMO GULFMET teil.



Abbildung 3: Staaten der Teilnehmer am EURAMET.PR-K3.2014 sind blau eingefärbt

Das Pilotlabor, welches die Organisation, die Koordination vom Entwurf des technischen Protokolls und für den Ablauf des Vergleichs sowie die Durchführung und Auswertung der Vergleichsmessungen übernimmt, ist das METAS, das NMI der Schweiz. Als Linklabore zum KCRV des CCPR-K3.2014 fungieren das METAS (Schweiz), die PTB (Deutschland) und das IO-CSIC (Spanien). Diese Institute sind dazu angehalten, ihre Transfornormale so zu kalibrieren, dass die Werte für die Lichtstärke die Größe der Einheit Candela zum Zeitpunkt der Messungen im CCPR-Schlüsselvergleich darstellen.

Aufgrund der großen Teilnehmerzahl wurde entschieden, als Transfornormal nur ein Glühlampentyp als Transfornormal zu verwenden, die WI41/G-Glühlampe von OSRAM. Jeder Teilnehmer soll eine Lampengruppe von mindestens 3 und maximal 6 Lampen bereitstellen. Bei der WI41/G-Glühlampe handelt es sich um eine Glühlampe für wissenschaftliche Zwecke. Sie ist gasgefüllt, hat einen E27-Sockel und laut Hersteller für einen Betrieb bei einer Stromstärke von ca. 6 A und eine Spannung von etwa 31 V spezifiziert. Der Leuchtkörper besteht aus einem, mäanderförmig in einer Ebene angeordnetem, Filament und der konische Glaskolben ist einseitig mit einer schwarzen, lichtundurchlässigen Maske mit einem Fenster beschichtet. Der Aufbau der Lampe ist dazu ausgelegt Streulicht zu vermindern (z.B. durch Spiegelungen in der Lampe sowie dem Einfluss vom Lampenhintergrund) und möglichst ideale Eigenschaften, wie z.B. ein definierter Lichtschwerpunkt und ein möglichst homogenes Strahlungsfeld in Messrichtung, zur Bestimmung einer Lichtstärke, zu bieten. Die Transfornormallampen müssen von den Teilnehmern vorgealtert werden und werden mit Gleichstrom mit festgelegter Polarität betrieben. Glühlampen eignen sich, besonders aufgrund ihrer Eigenschaft nur während des Betriebes zu altern, als Transfornormal in Vergleichsmessungen, die über einen längeren Zeitraum stattfinden. Die Betriebsdauer der Normale soll während der Vergleichsmessungen möglichst geringgehalten werden und zur Überwachung der Stabilität wird bei jeder Messung stromlos die Lampenspannung direkt am Lampensockel gemessen. Messungen zur Bestimmung der Lichtstärke werden mindestens zweimal durchgeführt, wobei die Lampe nach jeder Messung neu ausgerichtet wird, um die Reproduzierbarkeit einschätzen zu können. Die Messunsicherheit soll nach dem "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM)^[2] ermittelt werden. Die PTB ermittelt die Messunsicherheit, die den Lichtstärkewerten der Transfornormallampen zugeordnet ist, nach der CIE 198:2011^[3]. Für die Substitutionsmethode „Lampe kalibriert Lampe“ wird die



Abbildung 4: Foto einer Lichtstärkenormallampe vom Typ OSRAM WI41/G

Messunsicherheit gemäß „CIE E13 Calibration of a luminous standard (source based)^[4]“ ermittelt.

Aufgrund der fragilen TransfERNormale erfolgt der EURAMET-Vergleich als ein Sternvergleich. Jeder Teilnehmer nimmt mit einem eigenen Satz von TransfERNormalen teil. Diese wurden zunächst in den Laboren der Teilnehmer gemessen; diese Initialmessungen erfolgten im Jahr 2021. Danach erfolgte der Transfer der Glühlampen zum Piloten (METAS), welcher die Hauptmessungen durchführte. Als Termin für die Anlieferung war zunächst Januar 2021 vereinbart. Aufgrund von Verzögerungen durch die Corona-Pandemie musste dieser Termin mehrfach verschoben werden und erst Mitte 2022 waren die Normale aller Teilnehmer am METAS bereitgestellt worden. Da Normallampen sehr empfindlich auf Erschütterungen reagieren, entschieden sich viele der Teilnehmer dafür, die Lampen per Handtransport im METAS abzuliefern. Starke Erschütterungen während des Transportes führen nicht unbedingt zu sichtbaren Schäden am Normal, aber die vorher kalibrierten Eigenschaften der Lampe, z.B. die Lichtstärke oder die Alterungskoeffizienten, können sich verändern.

Die Hauptmessungen der Lampen, es handelt sich dabei um relative Vergleichsmessungen nach der Substitutionsmethode, wurden am METAS durchgeführt. Diese sind bereits beendet und die Teilnehmer können seit Februar 2023 ihre Normale abzuholen bzw. abholen lassen. Im nächsten Schritt erfolgen die Rückmessungen in den Laboren der Teilnehmer, um beispielsweise die Alterung der Normale und die Unversehrtheit derselbigen festzustellen. Anschließend sollen die Messergebnisse der Initialmessungen und Rückmessungen dem Piloten mitgeteilt werden.

Alle Messungen am Pilotlabor sind Relativmessungen; die Einheit Candela wird durch die Linklabore eingebracht, wobei mit den von den Linklaboren berichteten Lichtstärkewerten vom Piloten der KCRV aus dem letzten Weltvergleich ermittelt und die Ablage der Teilnehmer vom KCRV berechnet wird.

Zum jetzigen Zeitpunkt wird der EURAMET-Schlüsselvergleich voraussichtlich im Juni 2024 mit Veröffentlichung eines Abschlussberichtes abgeschlossen sein, diesem gehen mehrere Versionen und mindestens zwei Entwürfe voraus.

4. Messungen in der PTB

Als Linklabor hat die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) die Aufgabe, die gleiche Einheit der Lichtstärke in den EURAMET.PR-K3.2020 einzubringen, die auch im CCPR-Schlüsselvergleich eingebracht wurde. Die den TransfERNormalen zugeordneten Lichtstärkewerte müssen die Größe der Lichtstärkeeinheit zum Zeitpunkt der Messungen des CCPR-K3.2014 darstellen.

Am aktuellen EURAMET-Vergleich nimmt die PTB mit einer Lampengruppe bestehend aus sechs Osram Wi41/G Glühlampen teil. Die einzelnen Glühlampen wurden ausgewählt aufgrund ihrer Reproduzierbarkeit, Stabilität und geringen

Alterung. Diese Eigenschaften wurden über viele Jahre (im Mittel etwa 30 Jahre), und daraus folgend durchschnittlich über etwa 30 Betriebsstunden hinweg, überwacht und dokumentiert. Eine wichtige Eigenschaft einer Wi41/G Glühlampe, um eine besonders hohe Reproduzierbarkeit zu erreichen, ist die geometrische Ausrichtung der Lampe. Wie gut eine Lampe reproduzierbar ausgerichtet werden kann, ist z.B. von der Ausprägung des mäanderförmigen Filaments abhängig. Ein Beispiel für die Ausrichtung einer Wi41/G Glühlampe ist im Anhang 1 gelistet.

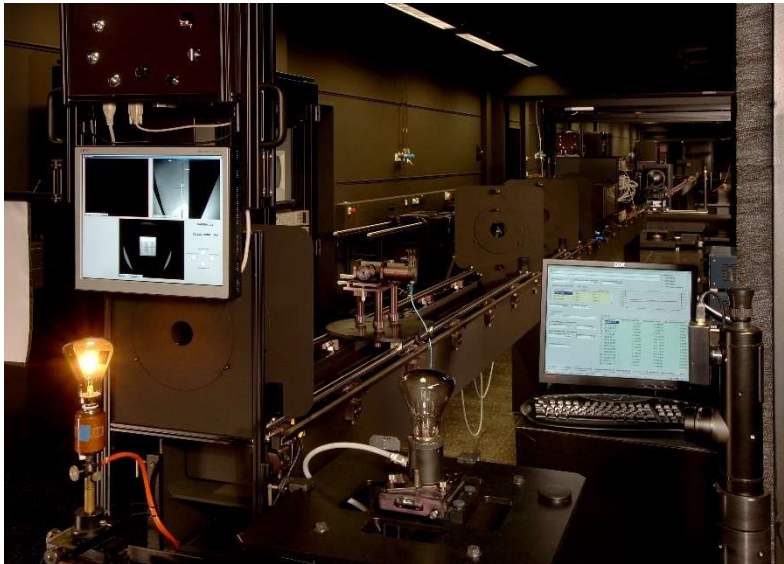


Abbildung 5: Foto vom Messplatz Photometerbank der PTB

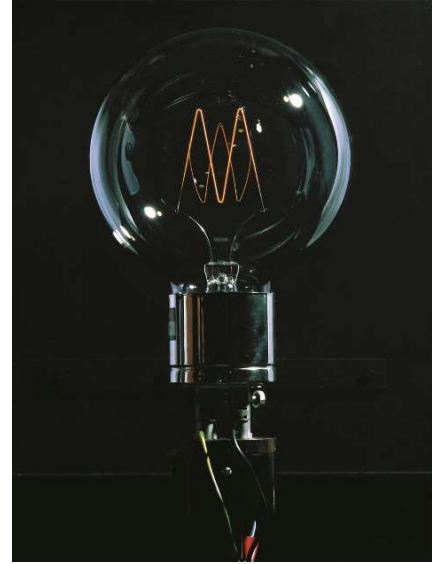


Abbildung 6: Foto einer Toshiba Glühlampe

Die Lichtstärkeeinheit wird in der PTB mit einer Lampengruppe aus 17 Toshiba Glühlampen - welche das nationale Normal für die Lichtstärkeeinheit bilden - bewahrt. Glühlampen altern nur, während sie betrieben werden, daher werden die Toshiba Lampen auch nur wenige Minuten jedes Jahr bei einer sehr niedrigen Verteilungstemperatur betrieben. Die Größe der Einheit für die Lichtstärke, die Candela, wurde seit dem letzten CCPR-Schlüsselvergleich nicht verändert. Aufgrund dessen sind die Normallampen, die im EURAMET-Vergleich verwendet wurden, direkt an das nationale Normal angeschlossen worden. Die Kalibrierung der 6 Transfornormallampen wurde nach der Substitutionsmethode gegen das nationale Normal durchgeführt und durch Vergleiche mit weiteren Lampengruppen vom Typ WI41/G, die in der PTB als Bezugs- und Transfornormale eingesetzt werden, verifiziert.

In der PTB finden Messungen von Größen der gerichteten Photometrie an der Photometerbank statt. Der Messplatz Photometerbank erstreckt sich über sechs separat klimatisierte Messräume und besteht aus drei verschiedenen Photometerbänken, die mit einer gemeinsamen optischen Achse so (koaxial) angeordnet sind, dass Messentfernungen bis zu 40 m möglich sind. Hinter einem

Rolltor (in Abbildung 5 ist das Rolltor geöffnet) werden die Lichtquellen betrieben und mithilfe von einem Kamerasystem in sechs Freiheitsgraden ausgerichtet. Auf Schienen fährt ein Photometerbankwagen, der bis zu 6 Empfänger gleichzeitig in einem Photometerkarussell aufnehmen kann. Für die Messungen im EURAMET-Vergleich wurden zwei Photometerköpfe ausgewählt, die sich in ihren Eigenschaften wie z.B. der photometrischen Empfindlichkeit, der spektralen Fehlanpassung usw. unterscheiden. Die 6 Transfernornallampen werden mit Gleichstrom stromkonstant betrieben. Die Lampenstromstärke wurde dabei so gewählt, dass die Glühlampen eine Verteilungstemperatur um die 2800K haben.

Zur Verminderung des Einflusses von Fremdlicht und Streulicht werden Streulichtblenden zwischen der Lampe und den Empfängern so platziert, dass ein Lichtkanal geschaffen wird und kein Licht, welches nicht direkt von der Lampe ausgesendet wird, den Empfänger beleuchten kann und die Lampe zudem nichts außerhalb des Lichtkanals beleuchtet.

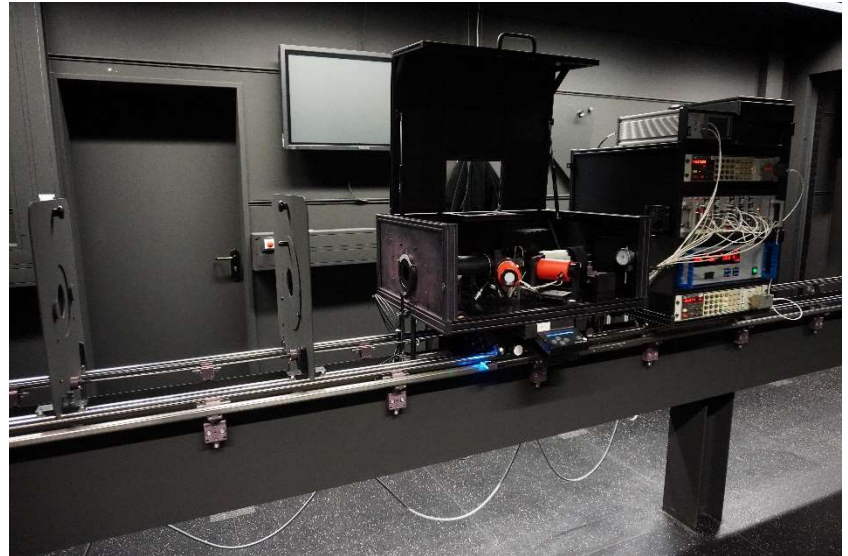


Abbildung 7: Foto vom geöffneten Photometerbankwagen mit Photometerkarussell, Anhänger mit Ausrüstung zur Messung der Photoströme sowie Streulichtblenden

5. Schlussfolgerung

Schlüsselvergleiche wie der CCPR- und der EURAMET-Vergleich dienen der Äquivalenzfeststellung zwischen NMIs mit dem Ziel der gegenseitigen Anerkennung der Ergebnisberichte und der nationalen Normale nach dem MRA. Für Messgerätehersteller, die Lampen- und Leuchtenindustrie und auch für Kalibrierlaboratorien mit einer Rückführung auf ein NMI sind solche Vergleiche der Schlüssel zur Erschließung internationaler Absatzmärkte.

In der PTB sind Vergleiche mit anderen Instituten, mit eigener Realisierung bzw. Rückführung auf eine andere Realisierung der Einheit Candela, eine Grundlage der Qualitätssicherung nach der DIN EN 17025.

6. Akronyme

CCPR Consultative Committee of Photometry and Radiometry

KCRV Key Comparison Reference Value

CIPM Comité international des poids et mesures

RMO Regional Metrology Organisation

NMI National Metrology Institute

EURAMET European Association of National Metrology Institutes

GUM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement

CIE Commission internationale l'Eclairage

7. Literatur- und Quellennachweise

[1] Arnold Gaertner, Éric Côté, Joaquin Campos, Gaël Obein, Peter Blattner, Reto Schafer, Liu Hui, Jiang Xiaomei, Cameron Miller, Yuqin Zong, Errol Atkinson, Erik Thorvaldson, Kenichi Kinoshita, Rheinhardt Sieberhagen, Irma Rabe, Teresa Goodman, Barry Scott, Armin Sperling, Detlef Lindner, Boris Khlevnoy, Evgeniy Ivashin. *CCPR Key Comparison CCPR-K3.2014, Luminous Intensity, Final Report, 2022-May-20*

[2] JCGM, “*JCGM 100 – Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of uncertainty in measurement*”, BIPM, Sèvres/Frankreich, September 2008

[3] CIE Publication 198:2011, *Determination of measurement uncertainties in photometry*, CIE-Commission internationale de l'Eclairage, Wien/Österreich

[4] CIE Publication 198-SP1, *Determination of measurement uncertainties in photometry -Supplement 1: Modules and Examples for the determination of measurement uncertainties*, CIE - Commission internationale de l'Eclairage, Wien/Österreich

[5] CCPR Key Comparison CCPR-K3.2014, *Luminous Intensity, Technical Protocol*, 2014-January-15

[6] EURAMET Key Comparison EURAMET.PR-K3.2020, *Luminous Intensity, Technical Protocol*, Version: 1.3

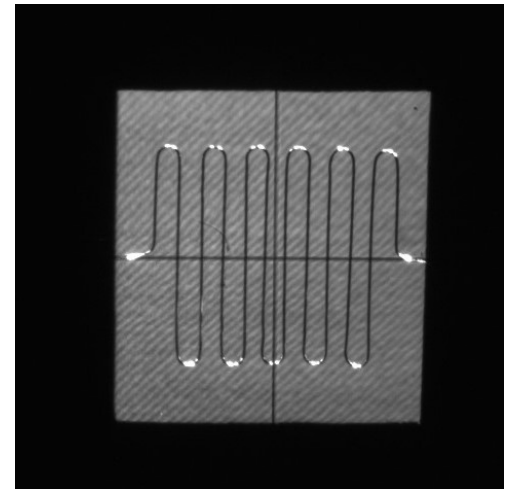
[7] CIPM, *Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes*, 1999-Oktober-14

Bildquelle: PTB (falls nicht anders angegeben)

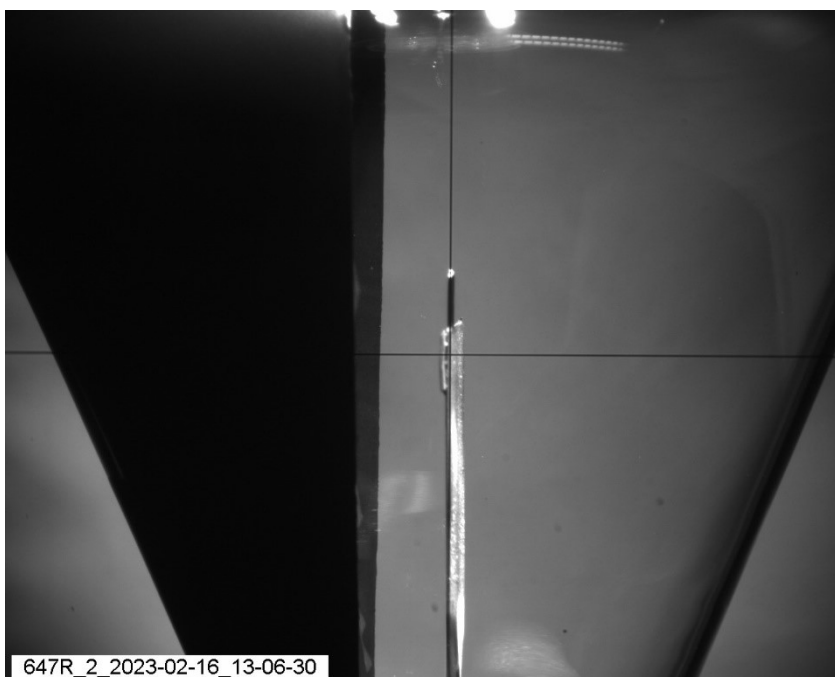
Anhang 1: Beispiel für die kamerabasierte Ausrichtung einer WI41/G-Glühlampe



Seitenansicht rechts



Vorderansicht



Seitenansicht links

3D techniques for presenting lighting parameters

Mag. Eng. Metin Aydanov Ibryamov, PhD student;

Assoc. Prof. Orlin Lyubomirov Petrov, PhD

University of Ruse; Ruse; BULGARIA

e-mail: mibryamov@uni-ruse.bg

opetrov@uni-ruse.bg

Abstract

Light plays an essential role in a person's perception of the world. Light determines how people sense and relish every element: hue, consistency, space, and shape. In the global lighting society, products require the creation of more intelligent lighting control systems that can adjust many parameters. New opportunities are created with the development of computer technology to design more accurate visualizations and simulations of the three-dimensional world. These lighting control systems can be viewed in a computer-generated 3D environment.

This report aims to study the lighting parameters that can be performed virtually. The idea is to facilitate the learning of both students and instructors of lighting design. 3D visualization and testing make it easy to experiment with lights from a design perspective.

At the end of the report, conclusions and some recommendations from the research are drawn and formulated.

Index Terms: lighting virtual laboratory, e-learning, education, system engineering software, lighting parameters.

1 Introduction

The perception of the realization and design of each element such as color, texture, shape and space depends on the illumination. There are many different types of light sources, creating different illuminations of objects and surfaces. In general, they are divided into two main groups: natural and artificial. The natural sources of the world include the sun, stars, thunder, jellyfish, lamps, etc. Artificial light sources can be: light bulb, fire, candle, lamp, etc. In order to achieve the desired effect, it is necessary to study the properties and characteristics of light.



The rapid development of humanity's digitization in recent decades has invariably affected lighting as well. Until recently, there were two different approaches to lighting design. In the first approach, also called engineering, the design of the lighting installation was carried out taking into account the needs of the person in order to create the necessary levels of illuminance and quality of lighting. In the second - design approach, the person trying to create some object that will be adjusted on the spot according to the lighting installation [1]. Through the popularization of computer graphics in design, it became possible to create a virtual image of the designed object. This naturally requires a rigorous calculation of the light distribution and illuminance, taking into account all the processes of light reflection and transmission. In turn, these calculations and developing led to the emergence of a new profession: lighting design [1].

Applying 3D environments in education and practice leads to a new level of perception and understanding of the surrounding world. These environments offer highly immersive and interactive learning. Students can engage with subject matter more tangibly and realistically by providing a three-dimensional representation of objects and worlds. This enhances their understanding and retention of complex concepts. On the other hand, testing their knowledge through virtual environments provides an interesting and motivating approach to learning and self-assessment [2].

The integration of three-dimensional technologies has been successfully applied in studying object illumination parameters, environmental perception versus light source type, and experimental deployment of artificial light sources.

Using real-world lighting references is the best approach to achieving realistic 3D lighting. In the 3D industry, HDRI (High Dynamic Range Imaging) lighting is used to create lighting scenarios inspired by real life. The quality of HDRI lighting depends on the HDRI map used, which significantly impacts the results we can achieve with HDRI lighting [3].

HDR Light Studio is a 3D lighting software providing unlimited unique lighting designs and setups in 3D scenes that can be rendered in all standard 3D software solutions used in the industry [3].

3D environments foster a sense of exploration and discovery. Users can navigate and manipulate objects, simulate experiments, and participate in virtual scenarios that are inaccessible or impractical in classroom or practice settings. This hands-on approach encourages active learning, critical thinking, and problem-solving skills.

In practical terms, the potential is limitless, albeit costly, when confined solely to learning objectives. Virtual learning applications are widely used to enable distance learning for students, especially during the pandemic. The popularity of apps that depict real-life objects and three-dimensional environments is growing. Computer technology advances have paved the way for more accurate visualizations and simulations of the three-dimensional realm, opening up new possibilities. The

integration of three-dimensional technologies has entered various industries and educational environments. This paper discusses one approach to developing a training program focusing on illumination techniques and their application in e-learning.

2 Theoretical part

When the international "SI" system was compiled, the numerical measurement of light technical quantities was of great importance. Here are some of these basic quantities [4]:

- Light intensity – J, cd (candela);
- Thermodynamic temperature – Θ , K (Kelvin).

1 cd – the intensity of light emitted in a perpendicular direction from the surface facing $1/600000$ of an absolute black body at the solidification temperature of platinum at a pressure of 101325 Pa (Pascal). In lighting technology, it is accepted that the light intensity is denoted by I instead of the letter J.

Thermodynamic temperature is an absolute measure of the average total internal energy of an object or objects [5]. This internal energy generally represents the energy of motion of the object/objects, also known as kinetic energy, plus the contribution of other factors.

2.1 Luminous flux

Luminous flux Φ is that part of the radiant flux that the visual analyser perceives as light. Luminous flux is the visible part of the energy emission of a light source per unit time. It is measured in the unit of lumen (lm).

It was found that a uniform radiant flux with a wavelength of $\lambda = 555$ nm (maximum value of yellow-green color) and a power = 1 corresponds to a light flux $\Phi = 683$ lm. in connection with this, the so-called light or photometric equivalent $K = 683$ lm/W. It gives the relationship between the "luminous watt" unit, in which electromagnetic radiation is measured, and the lumen unit.

The luminous flux of 1 lumen is obtained from an absolute black body with a surface $S = 5305$ at a platinum (Pt) solidification temperature, which is $T = 2046$ K [4].

2.2 Light intensity

Light intensity quantitatively characterizes the spatial distribution of light flux. It is calculated according to the formula (1):

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad \left(I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} \right) \quad (1)$$

where $d\Phi$ is the fraction of the light flux that is emitted uniformly through a solid angle $d\Omega$.

A light source has a luminous intensity of one candela when it emits one lumen in a certain spatial angle, i.e. in a globe photometer, emits 12.57 lm [4].

2.3 Illumination

The illumination E serves as a quantitative assessment of the degree of illumination of a given surface. In general terms, this represents a density distribution of the luminous flux on the illuminated surface. It is calculated according to the formula (2):

$$E = \frac{d\Phi}{dS} ; \quad \left(\text{or } E = \frac{\Phi}{S} \right) \quad (2)$$

where Φ luminous flux, lm;

S – the area of the illuminated surface on which the light flux Φ falls, $1m^2$.

Illumination is measured in units of lux (lx); $1lx = 1lm/1m^2$.

Thanks to the adaptability of the human eye, the interval of illuminance values in which a person is able to see varies in a large range: from 0.0003 lx (moonless night) - 10 lx (at night or in dark rooms) to hundreds of thousands lx (clear sunny day). Experiments have shown that the ability to see increases logarithmically with the increase in illuminance, i.e. when the illumination increases ten (10) times, the ability to see doubles.

Illumination, together with brightness, is a basic standard quantitative characteristic of lighting systems. It is standardized by national standards [4].

3 Computer-aided design

The software is developed as a portable application, so it does not require prior installation. The user is required to do nothing more than launch the application and begin their training.

The user can click in the viewport and drag the mouse to rotate the camera, allowing them to see the background and atmosphere in the scene. The ground texture can be turned on and off by the "Checker: On/Off" button (Figure 1).

From the "Texture Set" drop-down menu, the user can choose one of the textures to be applied to the object, and from "Texture Type", he can view the types of maps that make up the material. When the map is selected, it is previewed in "Texture type preview".

It is not enough to give color to a model and add glitter to create a natural material. Each object has micro details that make it unique. Figure 1 shows an example of asphalt. If only color is added and reflection is removed, the result will be only dark material. In order to avoid such types of problems, textures describing each parameter of the material are used. The set of textures (maps) forms one material, which is called a texture set. Each texture affects material values differently.

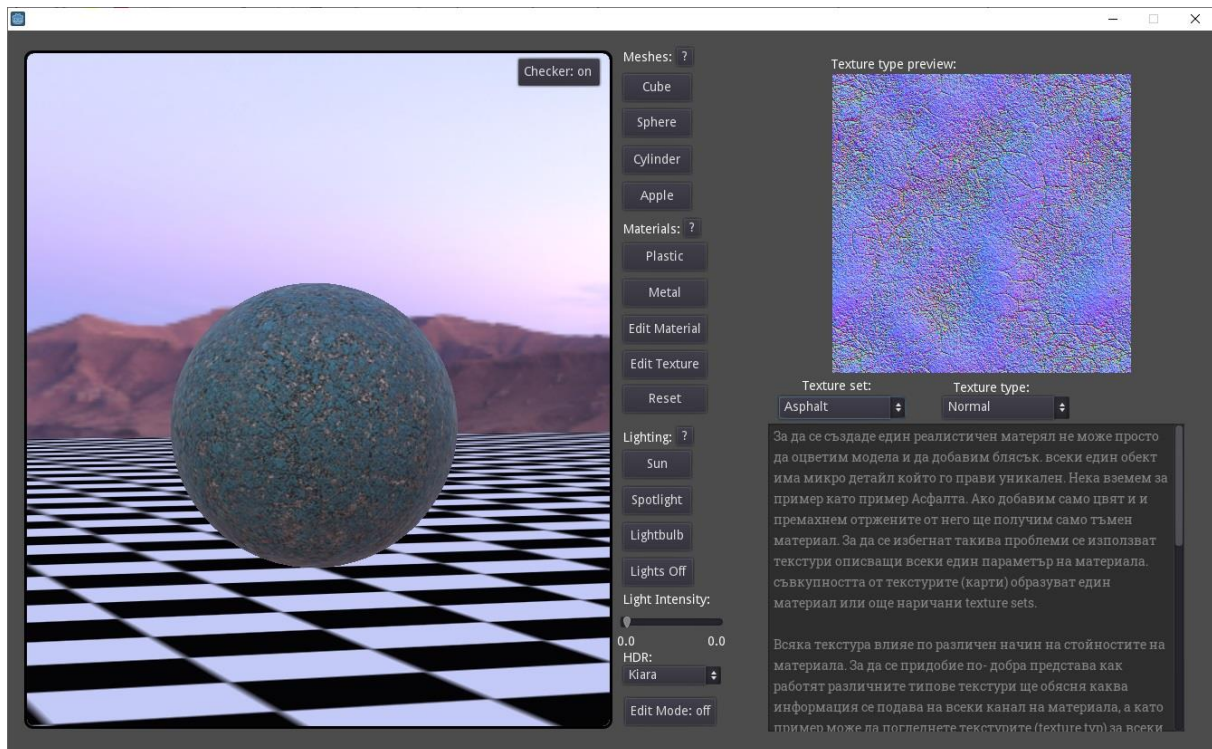


Figure 1. Applied asphalt texture on a sphere

The interface is divided into four main categories:

- Meshes (objects);
- Materials;
- Lighting;
- Light intensity.

The first category, Meshes (objects), explains what 3D objects are and allows the generation of different types of objects based on the name of the buttons.

The second category is about materials, and as in the last part, the "Question" button generates a detailed explanation of the different types of materials and textures in 3D. Each button affects the material applied to the selected model from the previous category. The "Plastic" button applies to the selected object a plastic material using real values (PBR), and the "Metal" button performs the same procedure, applying a metal material. The user can create his material, which can be done after pressing the "Edit Material" button. The "Edit Texture" button allows the user to apply different types of textures to the selected object.

The third category controls the lighting in the viewport. The "Question" button, as with the other categories, generates a detailed explanation of the different types of lighting and a help code. The first three buttons add one of three types of lighting to the scene: sun, spotlight or lightbulb. The "Lights off" button turns off/removes the light sources in the scene.

In the fourth section, the light intensity can be adjusted. The default is set to mountain sunset (Kiara) and can be changed anytime. HDR (High Dynamic Range) – this type of lighting is relatively new to the visual industry. The purpose of this lighting is to simulate the real atmosphere and lighting.

Figure 2 shows the implementation of an apple object with a checker set to off and sunlighting.

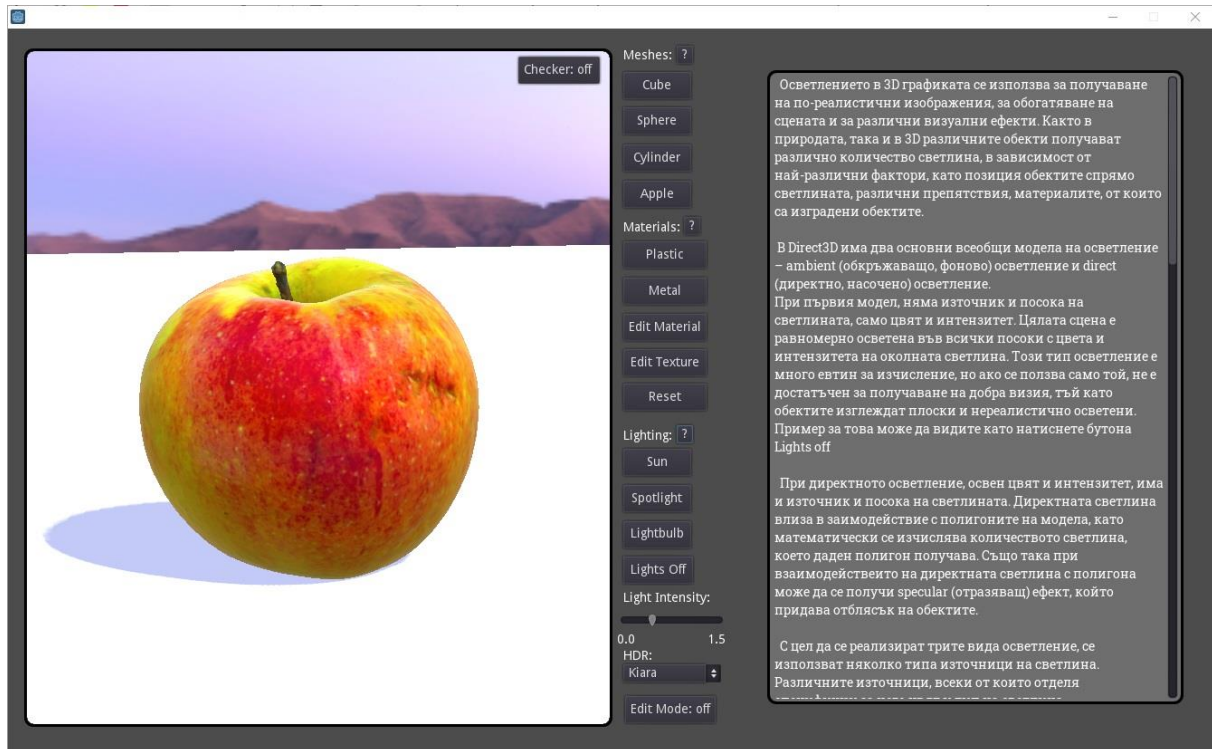


Figure 2. Apple with Sun lighting

Lighting in 3D graphics is used to obtain more realistic images, enrich the scene and for various visual effects. Both in nature and in 3D, different objects receive different amounts of light, depending on various factors, such as the position of the objects relative to the light and different obstacles that the objects are made of.

In Direct3D, there are two main universal lighting models:

- ambient (surrounding, background) lighting;
- direct (direct, directional) lighting.

The first model has no light source and direction, only color and intensity. The entire scene is uniformly illuminated in all directions with the color and intensity of the environment. This type of lighting is very cheap to compute, but if used alone, more is needed to get a good look, as objects look flat and unrealistically lit. An example of this can be obtained after pressing the "Lights Off" button.

In direct lighting, in addition to color and intensity, there is a source and direction of the light. Direct light interacts with the model's polygons, mathematically calculating the

light a given polygon receives. Also, when direct light interacts with the polygon, a reflective effect (specular) can be produced that glares at objects.

4 Conclusion

The 3D-generated objects utilizing computer-designed lighting models and their testing show a variety of approaches to the teaching and thinking of the students.

Such an application enables testing with various materials, illuminances and light sources in a virtual environment. This innovation in experimenting with a computer graphics system is quite a practical relief, given what an expensive and time-consuming process the same would be under real-world conditions. Also, this process would practically need specialized equipment under certain conditions.

There is a way to review the possibilities of lighting design solutions after performing the necessary experiments until obtaining the most optimal and acceptable approach to lighting.

5 References

- [1] V. Budak; D. Makarov, "Computer Graphics: New Horizons in the Education of Lighting Designers and Engineers", In: CEUR Workshop Proceedings, 2020.
- [2] E. Ibryamova, G. Stefanov, "Developing and Implementing a Labyrinth Game for Self-Assessment", Proceedings of the 21st International Conference on Computer Systems and Technologies '20, Ruse, Bulgaria, pp. 106–110, 2020.
- [3] The Coach House, <https://www.lightmap.co.uk/learning/whatishdr/lightstudio/>, Nottinghamshire, United Kingdom, accessed June 2023.
- [4] O. Petrov, "Lighting and installation technology," Textbook, Ruse, Bulgaria, pp. 1-8, 2021.
- [5] National Institute of Standards and Technology, <https://www.nist.gov/>, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, U.S.A., accessed June 2023.

Untersuchung der Duv-Präferenz in Abhängigkeit von korrelierter Farbtemperatur (CCT), Farbgamut und betrachteten Objekten

Elisabeth Kemmler, M.Sc., Paul Myland, M.Sc., Julian Klages, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Kurzfassung

Der Weißpunkt einer im Innenraum verwendeten LED-Lichtquelle hat einen entscheidenden Einfluss darauf, ob Menschen die Beleuchtung akzeptieren oder nicht. Daher wurden in den letzten Jahren vermehrt Präferenzuntersuchungen zum Weißpunkt durchgeführt, um die Innenraumbeleuchtung mit LED zu optimieren. Die Studienergebnisse zeigten, dass die Testpersonen bei verschiedenen CCTs negative Duv-Werte präferieren. Allerdings wurde bei diesen Studien weder eine Einordnung in einen bestimmten Kontext vorgenommen, noch die Auswahl vorhandener und beleuchteter, farbiger Objekte begründet. Deshalb wurde im Rahmen einer eigenen Probandenstudie untersucht, welchen Einfluss die korrelierte Farbtemperatur, der Farbgamut und die betrachteten Objekte auf den präferierten Duv-Wert und somit Weißpunkt haben. Die Untersuchung ergab, dass für die CCT 4000 K Duv-Werte zwischen -0,0045 und -0,0015, also nahe des Planck'schen Kurvenzugs, präferiert wurden. Farbige Objekte hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Präferenz. Der Einfluss des Farbgamuts konnte nicht vollständig geklärt werden.

Index Terms: Innenraumbeleuchtung, Weißpunkt, CCT, Duv, Präferenz



1 Motivation

Aus der neueren Literatur des 21. Jahrhunderts ist bekannt, dass die Farbqualität einer qualitativ hochwertigen Beleuchtung einen entscheidenden Einfluss auf die Nutzerakzeptanz hat [1]. Vor allem die Qualität des wahrgenommenen Weißtones der Lichtquelle spielt dabei eine wichtige Rolle [1]. Ist die Qualität des Weißtons in einem Raum nicht akzeptabel (z.B., weil das Weiß einen stark sichtbaren Grünstich hat), wird dadurch grundsätzlich die visuelle Akzeptanz aller anderen Farbqualitätsaspekte verhindert [1]. Deshalb ist es wichtig bei der Innenraumbeleuchtung mit LED darauf zu achten, welcher Weißpunkt für welche Anwendung gewählt wird.

Der Weißpunkt einer weißen LED-Lichtquelle kann mithilfe der korrelierten Farbtemperatur CCT und dem sogenannten Duv vollständig und auf intuitive Weise beschrieben werden [2]. Der Duv-Wert gibt dabei die Lage des Farbortes in Bezug auf den Planck'schen Kurvenzug an [2]. Bei einem negativen Duv-Wert ist der Weißpunkt in Richtung Purpurlinie verschoben [3]. Bei einem positiven Duv-Wert liegt eine Verschiebung des Weißpunkts ins Gelb-Grünliche vor [3].

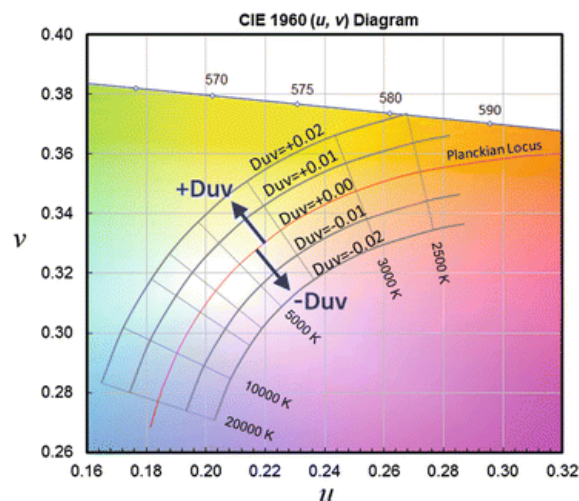


Abbildung 1: Visualisierung von Duv-Skalen in Bezug auf den Planck'schen Kurvenzug in der u-v-Farbtabelle [3]

In den letzten Jahren haben verschiedene Forschungsgruppen Untersuchungen zur Weißpunktpräferenz durchgeführt. Das Ziel dieser Studien war es, den von Probanden präferierten Duv-Wert für eine oder mehrere bestimmte CCTs zu ermitteln. Die Ergebnisse der Studien sind jedoch zu hinterfragen, da weder eine Einordnung in einen bestimmten Kontext vorgenommen noch die Auswahl vorhandener und beleuchteter, farbiger Objekte begründet wurde. Vor diesem Hintergrund wurde in einer eigenen Probandenstudie untersucht, inwiefern die korrelierte Farbtemperatur, der Farbgamut und die betrachteten Objekte einen Einfluss auf den präferierten Duv-Wert und somit auf den präferierten Weißpunkt haben.

2 Methodik

2.1 Studienaufbau

Die Probandenstudie wurde in einem Labor des Fachgebiets für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung an der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Der weißgestrichene Raum hat eine Größe von 3.07 m x 3.00 m x 2.53 m (Länge x Breite x Höhe) und war auf 22° C klimatisiert. Für den Versuch mussten die Testpersonen auf einem Stuhl in der Raummitte Platz nehmen und die Wand vor sich betrachten. An dieser Wand wurden im Laufe der Studie verschiedenfarbige Testfarbtafeln befestigt. Mithilfe der Testfarbtafeln sollte ursprünglich der Einfluss vorhandener farbiger Objekte sowie der Einfluss des Farbgamuts auf die Duv-Präferenz untersucht werden. Allerdings zeigte eine Vorversuchsmessung, dass die durch eine Duv-Änderung wahrgenommene Sättigungsänderung ΔE_{ab} deutlich geringer war als der wahrgenommene Helligkeitsunterschied ΔE_j . Deshalb wurde entschieden, zum einen Testfarbtafeln zu verwenden, deren Helligkeitskomponente sich bei einer Duv-Änderung stark verändert, und zum anderen Testfarbtafeln zu verwenden, deren Helligkeitskomponente sich bei einer Duv-Änderung kaum verändert. Außerdem wurde beschlossen, die Duv-Präferenz zum Vergleich nur für eine weiße Fläche also ohne (farbige) Testobjekte zu bestimmen. Somit wurde die Duv-Präferenz in drei verschiedenen Szenarien untersucht: 1. Keine Testobjekte an der Wand, 2. Farbsamples mit hoher Helligkeitsveränderung an der Wand, 3. Farbsamples mit niedriger Helligkeitsveränderung an der Wand (s. Abbildung 2).

Als Lichtquelle wurde ein LED-System mit sechs einzeln ansteuerbaren Kanälen (Rot, Grün, Blau, Amber, Cyan und Lime) verwendet. Die Beleuchtungsstärke E wurde auf 300 lx eingestellt, was einem Richtwert für Museumsbeleuchtung entspricht. Für die Weißpunkte wurde eine konstante CCT von 4000 K (neutralweiß) gewählt und die Duv-Werte wurden zwischen -0,024 und +0,024 in 0,003 großen Schritten variiert.

2.2 Studienablauf

Zu Beginn der Studie wurden die Probanden auf Farbfehlsichtigkeit geprüft. Anschließend wurden sie in den Laborraum geführt, wo sie sich 5 Minuten lang auf einen Weißpunkt adaptieren mussten. Dabei war es zufällig, ob dieser Weißpunkt a) CCT = 4000 K & $D_{uv} = -0,024$ oder b) CCT = 4000 K & $D_{uv} = +0,024$ war. Nach der Adaptationszeit wurde die Duv-Präferenz mithilfe des adaptiven Staircase-Verfahrens ermittelt. Als Nächstes wurde der andere Weißpunkt (b oder a) als Startweißpunkt an der Lichtquelle eingestellt. Nach 2 weiteren Minuten Adaptationszeit wurde die Duv-Präferenz erneut mit dem adaptiven Staircase-Verfahren bestimmt. Danach mussten sich die Probanden 2 Minuten auf den Weißpunkt CCT = 4000 K & $D_{uv} = 0$ adaptieren und schließlich ihren bevorzugten Duv-Wert über die Herstellungsmethode selbst einstellen.

Dieser Ablauf wurde für alle drei Szenarien wiederholt. Der einzige Unterschied war, dass die Adaptationszeit vor Beginn des ersten adaptiven Staircase-Verfahrens in Szenario 2 und Szenario 3 jeweils nur 2 statt 5 Minuten betrug.

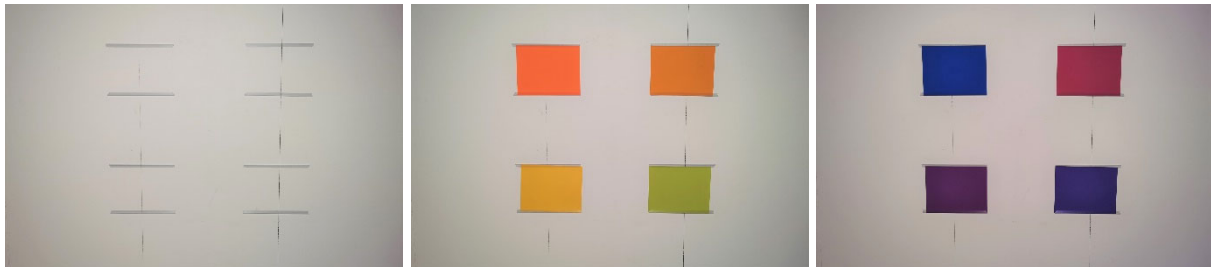


Abbildung 2: Die verschiedenen Szenarien der Probandenstudie mit unterschiedlichen Testobjekten [4]

3 Ergebnisse

3.1 Probanden

Insgesamt nahmen 24 Personen – 8 Frauen und 16 Männer – an der Studie teil. Das Alter der Testpersonen lag zwischen 22 und 40 Jahren ($M = 27,42$; $SD = 4,3$). Alle Probanden verfügten über eine normale Farbsehfähigkeit.

3.2 Duv-Präferenz

Die Duv-Präferenz der einzelnen Probanden wurde für die Messreihen, bei denen das adaptive Staircase-Verfahren angewandt wurde, aus den Duv-Werten an den Umkehrpunkten berechnet. Für die Messreihen, bei denen die Herstellungsmethode zum Einsatz kam, war keine zusätzliche Berechnung erforderlich. Hier wurden die Duv-Werte als Ergebnis berücksichtigt, welche die Probanden selbst eingestellt haben.

Die bevorzugten Duv-Werte aller Probanden sind nach den drei Szenarien getrennt in Abbildung 3 und Tabelle 1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Minimalwerte in allen drei Szenarien gleich sind. Dasselbe gilt für die Maximalwerte. Allerdings handelt es sich dabei in den Szenarien 2 und 3 um Ausreißer. Die eigentliche Streuung ist im Vergleich zu Szenario 1 wesentlich geringer, wie man anhand der Länge und Position der Boxplot-Whisker sehen kann. Auch der Interquartilsabstand, in dem sich die mittleren 50 % der Daten befinden, ist in Szenario 1 größer als in den Szenarien 2 und 3. Dennoch liegen alle drei Mediane innerhalb aller Boxgrenzen aller drei Boxplots. Außerdem handelt es sich bei allen drei Medianen um negative Duv-Werte. In Szenario 1 beträgt der Median $D_{uv} = -0.003$, in Szenario 2 $D_{uv} = -0.0015$ und in Szenario 3 $D_{uv} = -0.0045$. Ein durchgeführter Hypothesentest hat ergeben, dass es zwischen den Bewertungen der drei betrachteten Szenarien keine signifikanten Unterschiede gibt.

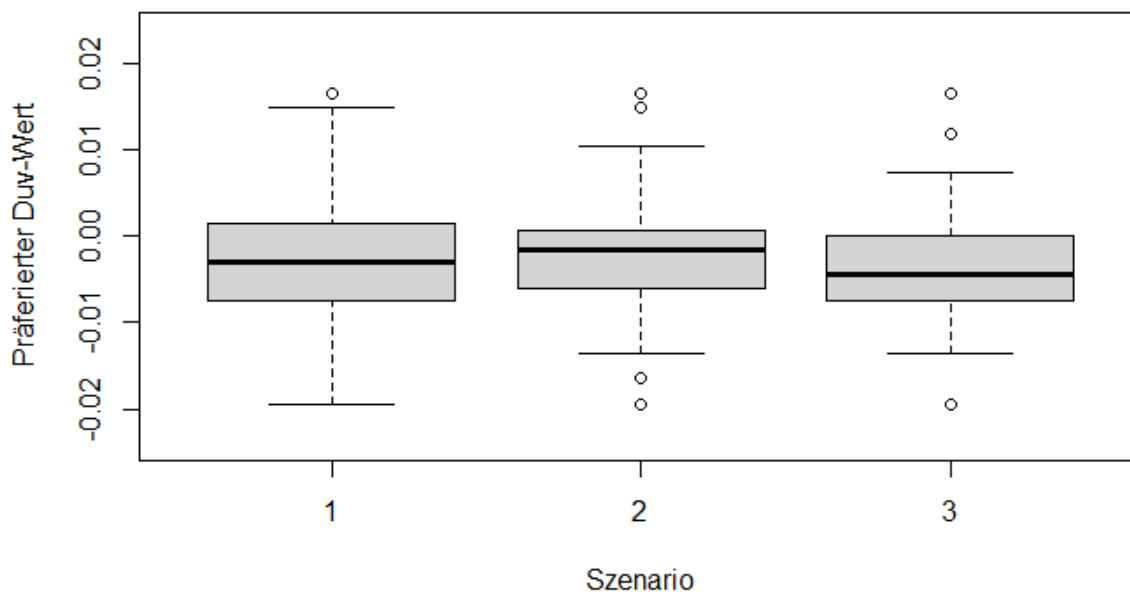


Abbildung 3: Boxplots der präferierten Duv-Werte bei 4000 K in den drei verschiedenen Szenarien (1. Keine Testobjekte an der Wand, 2. Farbsamples mit hoher Helligkeitsveränderung an der Wand, 3. Farbsamples mit niedriger Helligkeitsveränderung an der Wand) [4]

Tabelle 1: Duv-Präferenz aller Probanden bei 4000 K in den drei verschiedenen Szenarien (1. Keine Testobjekte an der Wand, 2. Farbsamples mit hoher Helligkeitsveränderung an der Wand, 3. Farbsamples mit niedriger Helligkeitsveränderung an der Wand) [4]

Szenario	Minimum (0%)	Unteres Quartil (25 %)	Median (50 %)	Oberes Quartil (75 %)	Maximum (100 %)
1	-0.0195	-0.0075	-0.0030	+0.0015	+0.0165
2	-0.0195	-0.0060	-0.0015	-0.0003	+0.0165
3	-0.0195	-0.0075	-0.0045	0	+0.0165

4 Diskussion

Da es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien ohne und mit farbigen Testobjekten gibt, ist davon auszugehen, dass die Duv-Präferenz in erster Linie vom wahrgenommenen Weißton abhängt und nicht von der Farberscheinung vorhandener farbiger Objekte. Zudem kann die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Szenarien 2 und 3 so interpretiert werden, dass auch die Helligkeitsänderung keinen signifikanten Einfluss auf die Duv-Präferenz gehabt hat. Die Testobjektwahl lässt keinen

Rückschluss auf einen möglichen Einfluss des Farbgamuts auf die Duv-Präferenz zu. Deshalb ist eine weitere Studie mit besser ausgewählten Testobjekten notwendig, um diesbezüglich eine fundierte Aussage treffen zu können. Da die Untersuchung für eine CCT (4000 K) im neutralweißen Bereich durchgeführt wurde, war die Annahme vor Studienbeginn, dass die präferierten Duv-Werte in der Nähe des Planck'schen Kurvenzug liegen. Diese Hypothese wurde die Studienergebnisse bestätigt. Die am weitesten vom Planck'schen Kurvenzug entfernte Interquartilsabstandsgrenze lag bei $D_{uv} = -0.0075$. Aufgrund der Resultate anderer Studien ist davon auszugehen, dass sich dieser Wert für CCTs im warm- oder kaltweißen Bereich verändert. Dieser Unterschied wird aller Voraussicht aber nicht zu groß sein, da ein Duv-Wert von $\pm 0,01$ bereits einem deutlich verfärbten Weißpunkt entspricht.

5 Fazit

Im Rahmen einer Probandenstudie wurde untersucht, inwiefern die korrelierte Farbtemperatur, der Farbgamut und vorhandene farbige Objekte einen Einfluss auf die Duv-Präferenz und somit auf die Weißpunktpräferenz haben.

Die Duv-Präferenz wurde in einem Labor bei einer Beleuchtungsstärke von 300 lux und einer CCT von 4000 K für drei verschiedene Szenarien ermittelt: 1. Keine Testobjekte an der Wand, 2. Farbsamples mit hoher Helligkeitsveränderung an der Wand, 3. Farbsamples mit niedriger Helligkeitsveränderung an der Wand. Dabei sind sowohl das adaptive Staircase-Verfahren als auch die Herstellungsmethode als Datenerhebungsverfahren zum Einsatz gekommen. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Testpersonen Weißpunkte mit leicht negativen Duv-Werten bevorzugen. In Szenario 1 liegt der präferierte Duv-Wert bei $D_{uv} = -0,003$, in Szenario 2 bei $D_{uv} = -0,0015$ und in Szenario 3 bei $D_{uv} = -0,0045$. Damit wurde experimentell bestätigt, dass die bevorzugten Duv-Werte für neutralweiße CCTs nahe des Planck'schen Kurvenzugs liegen. Es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der drei Szenarien, was zu der Schlussfolgerung führt, dass die Duv-Präferenz in erster Linie vom wahrgenommenen Weißton der Wand abhängt und nicht von vorhandenen farbigen Testobjekten. Der Einfluss des Farbgamuts konnte aufgrund der Testobjektauswahl nicht geklärt werden, so dass eine weitere Untersuchung erforderlich ist.

6 Referenzen

- [1] T. Q. Khanh, P. Bodrogi und Q. V. Trinh, *Color quality of semiconductor and conventional light sources*, Weinheim: Wiley-VCH, 2017.
- [2] Y. Ohno, „Practical Use and Calculation of CCT and Duv,“ *LEUKOS*, pp. 47-55, 2014.

- [3] Y. Ohno, „Color Quality,“ in *Solid State Lighting Reliability Part 2. Components to Systems*, Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 179–199.
- [4] E. Kemmler, *Präferenzuntersuchung des Weißpunktes (Duv) in Abhängigkeit der Farbtemperatur, des Farbgamut und der betrachteten Objekte*, Darmstadt, Hessen: Technische Universität Darmstadt, 2022.

Scheinwerfer und Kamera als Sichtweitensensor basierend auf der spektralen Analyse der Rückstreuung

Florian Krieff¹, Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann², Dr. Mathias Niedling¹

¹Forschungsinstitut für automobiler Lichttechnik und Mechatronik (L-LAB)

²Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)

Abstract

Bei der Realisierung von automatisierten Fahrsystemen setzen die Automobil- und Sensorhersteller auf unterschiedliche Sensorkonzepte hinsichtlich Typen und Anzahl der eingesetzten Technologien [1] [3] [4] [2]. Wodrin sich jedoch in aller Regel alle Systeme gleichen ist der Einsatz von Kamerasensoren als Kernbestandteil der Umgebungswahrnehmung [5] [1] [2].

Bei möglichen Störgrößen der Wahrnehmungssysteme ist Nebel eine relevante Komponente. Um die Sicherheit der Fahrfunktionen auch bei Nebel zu gewährleisten, muss deren Vorhandensein zuverlässig erfasst und klassifiziert werden.

Nebel wird als Wasserpartikel mit einer Größe von 1 bis 70 μm klassifiziert. In diesem Bereich lässt sich die Mie-Theorie anwenden [6] [7]. Aus diesem Grund wird im Folgenden die durch eine Kamera aufgezeichnete Streuung des Scheinwerferlichtes unter Berücksichtigung der Mie-Theorie bezüglich der spektralen Bestandteile analysiert und als Informationsquelle für die Umsetzung als Sichtweitensensor untersucht. Daher wird zu Beginn eine theoretische Betrachtung des erwartbaren Verhaltens mit anschließender experimenteller Untersuchung zur Validierung des Systems in einer Nebelkammer vorgenommen.

Die aufgenommenen Bilddaten der Streuung zeigen, dass das spektrale Auflösungsvermögen der Kamerasensoren ausreicht, um Veränderungen im Lichtspektrum zu erfassen. Die Unterschiede zwischen den Farbkanälen betragen jedoch nur wenige Prozent, was eine robuste Sichtweitenbestimmung erschwert. Die Intensitätsverläufe der Streuung vom Scheinwerferlicht eignen sich hingegen, um Sichtweiten zu erfassen. Die Implementierung der Nebeldetektion durch die Streulichtmessung kann durch eine Anpassung der Bildverarbeitungsalgorithmik in bereits im Fahrzeug vorhandenen Kamerasystemen umgesetzt werden.

Index Terms: automatisiertes Fahren, Nebelerkennung, hochauflösende Scheinwerfer



1 Einleitung

Im Rahmen der Entwicklung des automatisierten Fahrens wird diskutiert, wie ein Fahrzeug die Umgebung wahrnehmen kann und welche Informationen dafür relevant sind. Schaut man sich die verschiedenen Automobil- und Sensorhersteller an, so stellt man schnell fest, dass es nicht die eine Formel zu geben scheint, nach der entschieden wird, welche Sensortechnologie ausschlaggebend für die Realisierung des automatisierten Fahrens ist. Vielmehr scheint es zum aktuellen Zeitpunkt unterschiedliche Herangehensweisen an das Thema zu geben [1] [3] [4] [2]. In aller Regel kommt in den Systemen ein Kamerasensor als Kernbestandteil der Umgebungswahrnehmung zum Einsatz [5] [1] [2].

Was ebenso ersichtlich wird, ist der Bedarf an Informationen über die vorherrschenden Umweltbedingungen. Diese werden für die Anpassung der Fahraufgabe oder einer Änderung der Datenverarbeitung im Sensorverbund benötigt. Auch die automatisierten Fahrsysteme benötigen Umweltinformationen, um auch bei Störbedingungen wie Regen, Nebel oder Schnee die Fahraufgabe zu übernehmen und die Sensorverarbeitung gezielter anzupassen. Das generelle Auftreten von Nebel wird aktuell teilweise über Kamerasensoren ohne die Kopplung mit einer Strahlungsquelle realisiert. Eine feine Unterteilung in unterschiedliche Sichtweitenwerte findet dabei nicht statt. Ebenso wenig werden bestimmten Bereichen vor dem Fahrzeug unterschiedliche Sichtweitenwerte zugeordnet.

Scheinwerfersysteme werden hingegen für menschliche Fahrer entwickelt, damit diese ihre Sehaufgabe beim Führen eines Fahrzeuges bestmöglich erfüllen können. [8] [9]. Eine Koppelung mit einer Kamera, die für die automatisierten Fahrfunktionen zuständig ist, indem das Scheinwerferlicht nach bestimmten Merkmalen untersucht wird, findet nicht statt.

Das Thema dieser Arbeit ist es, eine Verbindung zwischen den in den Fahrzeugen verbauten Kameras und Scheinwerfersystemen herzustellen. Mit Hilfe der Kamera wird bei Nebel die Intensität der Streuung wie auch die spektralen Bestandteile untersucht. Es wird die in aller Regel als störend empfundene Streuung im Nebel analysiert, um darüber Informationen in Form eines Sichtweitenwertes generieren zu können. Die Scheinwerferbeleuchtung wird hierbei als Unterstützung für die Kamera und nicht den menschlichen Fahrer genutzt. Beide Systeme, Kamera und Scheinwerfer, sind bereits ohnehin in den Fahrzeugen verbaut. Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz ergeben sich für das Scheinwerfersystem keine besonderen Anforderungen, wie eine hohe Winkelauflösung.

Nebel wird in der Literatur als Wasserpartikel mit einer Größe von 1 bis 70 μm klassifiziert, was dem Bereich entspricht, in dem sich die Mie-Theorie anwenden lässt [6] [7]. Die Auswertung der Sichtweite erfolgt daher unter Berücksichtigung der Mie-Theorie und der Definition der meteorologischen Sichtweite nach der MOR (engl.

meteorological optical range), die der in Messgeräten genutzten Sichtweitendefinition der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) entspricht [10].

Aus diesem Grund wird im Folgenden die durch eine Kamera aufgezeichnete Streuung des Scheinwerferlichtes unter Berücksichtigung der Mie-Theorie bezüglich der spektralen Bestandteile analysiert und als Informationsquelle für die Umsetzung als Sichtweitensensor untersucht. Daher wird zu Beginn eine theoretische Betrachtung des erwartbaren Verhaltens mit anschließender experimenteller Untersuchung zur Validierung des Systems in einer Nebelkammer vorgenommen.

Drei Themenfelder werden in dieser Arbeit untersucht:

1. Lassen sich die spektralen Unterschiede aus der Mie-Theorie durch Messungen nachweisen?
2. Findet man den Intensitätsverlauf, den das Bouguer-Lambert-Gesetz beschreibt?
3. Lassen sich die Hardwarekomponenten nutzen, die aktuell in den Fahrzeugen verbaut werden beziehungsweise es bereits sind?

Für die Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext ist beispielhaft die Arbeit von Gallen et al. [29] zu nennen, die sich ebenfalls mit der Kombination einer Kamera mit dem Scheinwerfersystem bei Nebel beschäftigt. Dabei liegt der Fokus der Arbeit allerdings auf der Analyse von Halos um Beleuchtungsquellen und den Abgleich von vorgerenderten Bildern einer gestreuten Scheinwerferbeleuchtung mit den von einer Kamera aufgezeichneten realen Bildern. Desto größer die Korrelation der vorgerenderten Bilder mit den real aufgezeichneten, umso höher die Wahrscheinlichkeit, dass die Sichtweite aus der Computersimulation vorherrscht.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wird abweichend davon das Streuverhalten des Scheinwerferlichtes auf die Intensität der Streuung sowie des spektralen Einflusses des Nebels untersucht.

2 Theorien zum Streuverhalten und der messtechnischen Bestimmung

Nach der Motivation und der Einordnung der Thematik dieser Arbeit, werden die Theorien erläutert, die für die Bearbeitung von Bedeutung sind. Es existieren dabei mehrere Gesetzmäßigkeiten die einen Zusammenhang zwischen der Wellenlänge der gestreuten Strahlung und der Partikeldurchmesser abbilden. Daher werden im Folgenden die beiden Gesetzmäßigkeiten der Mie- und Rayleigh-Streuung, die bei Nebel zum Tragen kommen, sowie die Gesetzmäßigkeit des Bouguer-Lambert-Gesetzes, das sich generell mit der Intensität der Streuung bei unterschiedlichen Sichtweiten beschäftigt, vorgestellt.

Mit dem Begriff Streuung ist in der Physik im Allgemeinen die Ablenkung eines Teiles der in einem Medium eingebrachten Strahlung beim Durchgang durch selbiges

gemeint [12] [13]. Die Strahlung wie zum Beispiel Licht kann sowohl an freien Atomen oder Molekülen als auch an festen Körpern wie kleinen Mikropartikeln (Rauch, Staub) oder Flüssigkeitströpfchen (Nebel, Regen) gestreut werden [14]. Die elektromagnetische Strahlung unterliegt bei der Durchdringung von Aerosolen der Absorption und Streuung, die in ihrer Gesamtheit als Extinktion bezeichnet werden [15]. Die Absorption ist im Vergleich zur Streuung bei Nebel jedoch vernachlässigbar klein, weshalb hier die Streuung mit der Extinktion als Annäherung gleichgesetzt werden kann [15] [10].

2.1 Rayleigh-Streuung

Als Rayleigh-Streuung wird die Streuung bezeichnet, die auftritt, wenn der Teilchendurchmesser, an dem Licht gestreut wird, sehr klein gegenüber der Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung ist, also die Bedingung $d \ll \lambda$ erfüllt ist. Sie setzt den Fall der Einfachstreuung voraus, bei dem ein Strahlenbündel an einem einzelnen Teilchen gestreut wird [40]. Sie wird in den meisten Fällen nicht mit Nebel in Verbindung gebracht, gilt jedoch bei Partikeldurchmessern wie $0,1 \mu\text{m}$, die ebenso bei Nebel vorherrschen [16]. Für die Wellenlänge von Licht werden in der Literatur leicht unterschiedliche Wellenlängenbereiche genannt, die sich zwischen 380 und 780 nm bewegen [17] [18] [19] [20]. Bei den Teilchen im Nebel handelt es sich vor allem um Moleküle der Luft, wie kleine Aerosolteilchen mit Lineardimensionen unter $0,1 \mu\text{m}$ [15]. Aufgrund der Größe der Teilchen sind die gestreuten Lichtstrahlen zueinander kohärent [13].

Allgemein wird kurzwelliges Licht stärker gestreut als langwelliges. Die Intensität I des gestreuten Lichtes unterliegt dabei der Abhängigkeit zur Wellenlänge λ [15] [21] [6] [22]:

$$I \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Insbesondere sichtbar wird die Wellenlängenabhängigkeit des Effekts an der blauen Erscheinung des Himmels. Die stärkere Streuung des kurzwelligen blauen Anteils führt zu einer stärkeren Extinktion dieses Wellenlängenbereichs und somit zum blauen Erscheinungsbild des Himmels [15]. Je nach Partikelkonzentration in der Atmosphäre kann dieser Effekt verstärkt oder abgeschwächt werden [15]. Größere Partikel wiederum können mit der Theorie der Mie-Streuung beschrieben werden.

2.2 Mie-Streuung

Die Theorie der Mie-Streuung befasst sich mit dem speziellen Fall, dass die Durchmesser der Teilchen, an denen die Strahlung streut, in der Größenordnung der Wellenlänge liegen [6] [7]. Auch sie setzt den Fall der Einfachstreuung voraus [41] [7] [40]. Als Partikel, an denen im Falle von Licht die Mie-Streuung auftritt, sind beispielhaft kleine Aerosolpartikel, Dunstteilchen sowie Wolken- und Nebeltröpfchen zu nennen [15]. Die Durchmesser der Wasserpartikel im Nebel variieren sehr stark.

Laut Literatur betragen die Durchmesser zwischen 1 und 70 μm , wobei die größte Anzahl der Partikel einen Durchmesser zwischen 1 und 10 μm besitzt [23] [15] [24] [25]. Die Werte können jedoch je nach Region und sogar je nach Tageszeit stark voneinander abweichen [24] [25].

Aufgrund des größeren Teilchendurchmessers bei der Mie-Streuung nimmt die Wellenlängenabhängigkeit im Vergleich zur Rayleigh-Streuung ab [15] [26]. In der Literatur lässt sich folgender Zusammenhang bezogen auf den Extinktionskoeffizienten σ_e zur Wellenlänge λ finden [15] [22]:

$$\sigma_e \sim \frac{1}{\lambda^{1,0}} \text{ bis } \frac{1}{\lambda^{1,5}}$$

Der Extinktionskoeffizient ist dabei ein Maß, um die Extinktion zu beschreiben. Die Proportionalität des Extinktionskoeffizienten kann mit der zuvor genannten Intensität der Rayleigh-Streuung verglichen werden, weil er, wie zuvor erwähnt, zum großen Teil den Streuanteil enthält und somit nahezu der Proportionalität der Intensität der Streuung entspricht. Der große Bereich der Proportionalität macht deutlich, dass es sich dabei um eine starke Vereinfachung eines komplexen Zusammenhangs handelt.

2.3 Gesetzmäßigkeit messtechnische Sichtweitenbestimmung

Die messtechnische Bestimmung der Sichtweite basiert, wie von der WMO im *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* beschrieben, auf dem Bouguer-Lambert-Gesetz [10]. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen dem ausgesandten Lichtstrom F_0 , der bei Durchgang durch ein Aerosol über die Entfernung x durch den Extinktionskoeffizienten des Mediums σ_e (in der Literatur teilweise mit σ abgekürzt) abgeschwächt wird [10]. Der Lichtstrom, der nach der Entfernung x den Betrachter beziehungsweise ein Messgerät erreicht, ist F . Das Bouguer-Lambert-Gesetz [10] lautet wie folgt:

$$F = F_0 \cdot e^{-\sigma_e \cdot x}$$

Es wird nachfolgend für die Erläuterung der Intensitätsveränderung über die Sichtweite genutzt.

3 Experimentelle Untersuchung

Die zuvor erläuterten Theorien und Gesetzmäßigkeiten zeigen auf, dass die Intensität der Streuung nach dem Bouguer-Lambert-Gesetz einem festen Verlauf folgen. Ebenso unterliegen sie einem spektralen Einfluss, den die Theorien der Mie- und Rayleigh-Streuung zeigen. Kurzwellige Strahlung wird hiernach stärker gestreut als langwellige. Umso kleiner die Partikel, desto größer ist demzufolge der spektrale Unterschied in der Streuung. Zwar wird die Mie-Streuung als die bei Nebel dominierende Streuung genannte, jedoch befinden sich in der Realität im Nebel ebenso kleine Wasserpartikel, die dem entsprechen, was durch die Rayleigh-Streuung beschrieben wird.

Daher werden im Rahmen der Untersuchungen die bereits in der Einleitung genannten drei Punkte bearbeitet:

1. Lassen sich die spektralen Unterschiede aus der Mie-Theorie durch Messungen nachweisen?
2. Findet man den Intensitätsverlauf, den das Bouguer-Lambert-Gesetz beschreibt?
3. Lassen sich die Hardwarekomponenten nutzen, die aktuell in den Fahrzeugen verbaut werden beziehungsweise es bereits sind?

Im Folgenden werden daher im ersten Teil der genutzte Sensorprototyp, seine Eigenschaften, der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung erläutert. Basierend darauf werden die Gesetzmäßigkeiten aus der Theorie angewendet und vor der Untersuchung betrachtet, wie das Verhalten demnach aussehen müsste. Im Anschluss findet die Untersuchung in der Nebelkammer statt, um die Theorie in der Praxis zu überprüfen.

3.1 Sensorprototyp

Das Scheinwerfersystem basiert auf einem DLP-Developer Kit von Texas Instruments (DLP 9000) das mit einem Array aus sechs LEDs der Firma Osram kombiniert ist. Die hochauflösenden Pixelierung ist für diese Arbeit nicht von Bedeutung. Da das System in seinen Eigenschaften bereits im Rahmen andere Untersuchungen aufgebaut wurde und bekannt ist, bot es sich für eben diese Untersuchungen ebenfalls an. Solange das Spektrum der Strahlungsquelle bekannt ist, ist in der Theorie ebenso wenig zwingend ein LED-Leuchtmittel notwendig. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich damit auf handelsüblichen Scheinwerfer übertragen.

Für die Bildaufnahmen wird eine 7 Megapixel RGB-Kamera (Baumer VLXT 71C.I [27]) genutzt, die ebenfalls im Rahmen andere Untersuchungen mit dem Scheinwerfer synchronisiert wurde und sich daher für die Untersuchung eignet. Die Auflösung ist für die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit nicht entscheidend. Es würde ebenso ein Kameramodul mit einer Auflösung von 2 Megapixel ausreichen. Abbildung 1 zeigt den skizzierten Aufbau des Systems.

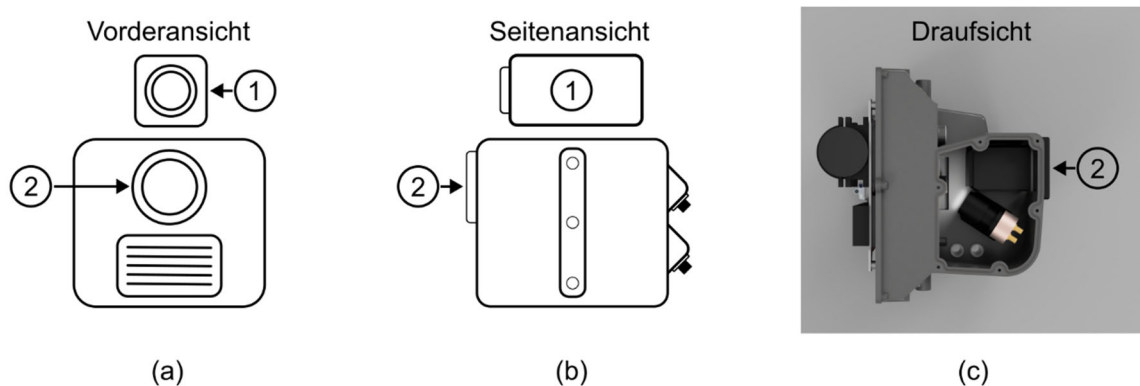


Abbildung 1 Der für die Untersuchung eingesetzte Kamera-Scheinwerfer-Sensor.

Die Kombination wird im Folgenden als Kamera-Scheinwerfer-Sensor bezeichnet. Die für die Untersuchung entscheidenden Elemente sind die Kamera auf der Oberseite (1)

und der Lichtaustritt des Scheinwerfermoduls (2). In der Draufsicht (c) ist der geöffnete Scheinwerferprototyp zu sehen.

Da spektrale Einflüsse untersucht werden, wurde das in der Abbildung 2 dargestellte LED-Spektrum des Scheinwerfermoduls vermessen.

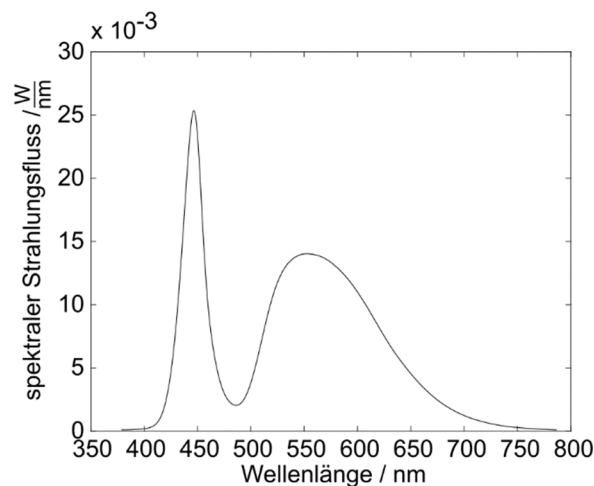


Abbildung 2 Spektrale Verteilung des in der Arbeit genutzten Scheinwerfersystems

Ebenso wurden die Farbkanäle des Kameramoduls in den Objektivkonfigurationen, wie es für die Untersuchungen genutzt wurde, vermessen (vgl. Abbildung 3).

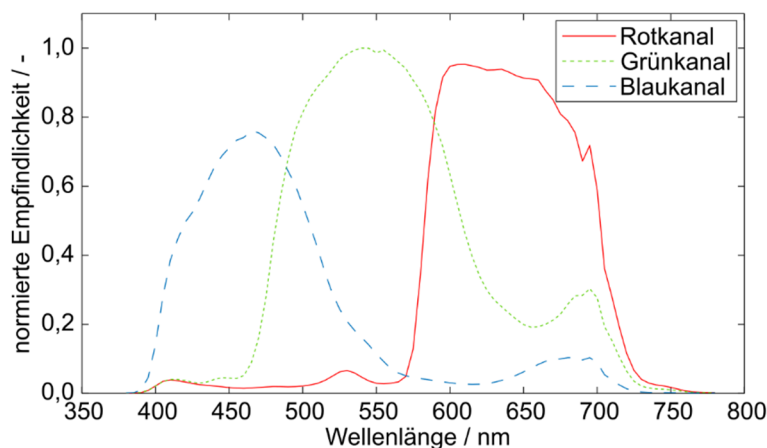


Abbildung 3 Spektrale Empfindlichkeit des hier genutzten Kameramoduls

Damit die Empfindlichkeiten der Farbkanäle der Kamera auf die Intensitäten des Scheinwerfermoduls eingestellt werden können, um direkt spektrale Veränderungen des gestreuten Lichtes nachzuvollziehen, wurde ein Weißabgleich der Kamera auf das Spektrum der LED-Strahlung durchgeführt. Die aus dem Weißabgleich errechneten Verstärkungsfaktoren zeigt Tabelle 1, mit denen jeder Farbkanal multipliziert wird, sodass die Pixelwerte jedes Kanals nahezu identisch sind.

Tabelle 1 Die über den Weißabgleich ermittelt Verstärkungsfaktoren der Farbkanäle der Kamera.

Farbkanal	Weißabgleich Kamera
Rotkanal	1,8591
Grünkanal	1,0000
Blaukanal	2,0392

3.2 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in der Nebelkammer in Abbildung 4 durchgeführt, in der die Position des Prototypens während der Messungen eingezeichnet ist. Durch die technischen Gegebenheiten der Kammer und die Möglichkeit, Messungen mit einer hohen Wiederholgenauigkeit durchführen zu können, wurde diese als Ort der Untersuchungen ausgewählt. Die Qualität der Nachbildung des dort erzeugten Nebels [28] sorgt für eine Vielzahl an wissenschaftlichen Untersuchungen, die in eben dieser Kammer durchgeführt wurden [29] [30] [31] [32] [33] [34].

Die Nebelkammer ist in eine Hauptmesskammer und einen Tag/Nacht - Bereich unterteilt. Für die Messung wurde die 15,0 m lange und 3,1 m Breite Hauptmesskammer genutzt. Die Länge des Messbereichs ist ausreichend, da die Phänomene in Bereichen der Beleuchtung mit dem Scheinwerfer untersucht werden, die sich unterhalb von 15 m Entfernung zum Scheinwerfer befinden. Der Untergrund besitzt eine leichte Wellenlängenabhängigkeit, die sich im Bereich des sichtbaren Spektrums im unteren einstelligen Prozentbereich bewegt [16]. Die Partikelgröße der Nebelpartikel beträgt im Mittel zwischen 1 und 10 μm , liegt auch teilweise darunter [28] [16], was den Partikeldurchmessern von realen Wasserpartikeln im Nebel entspricht [15] [23] [24] [25]. Die Tropfenverteilung mit 100 bis 1000 Tropfen pro cm^3 [28] [35] entspricht ebenso der von realem Nebel [35] [15] [23] [25] [24].

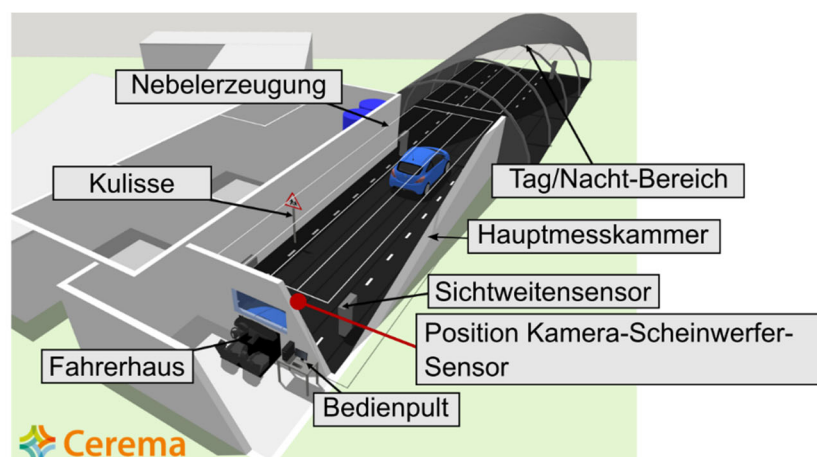


Abbildung 4 Die Nebelkammer der CEREMA in Clermont-Ferrand in Frankreich. Die Begriffe aus der Quelle wurden ins Deutsche übersetzt [35]

3.3 Versuchsdurchführung

Abbildung 5 stellt den Sichtweitenverlauf der Messung über die Zeit dar. Zu Beginn der Messung wurde die Nebelkammer auf 5 m Sichtweite eingeregelt und der Nebel über die Dauer von ungefähr 25 Minuten bis auf 2000 m aufgelöst. Dadurch wurden Schwankungen der Sichtweite über die Messung auf ein Minimum reduziert. Durch den Versatz zwischen dem Messbereich des Kamera-Scheinwerfer-Sensors und dem Sichtweitenmessgerät ist zusätzlich nur ein minimaler Unterschied in der Sichtweite zwischen den beiden Bereichen zu erwarten. Der Fokus bei den Untersuchungen liegt auf den Bereichen von 0 bis 1000 m Sichtweite, welcher der Definition der MOR entspricht [10].

Als Projektion wird im Falle des Scheinwerfers eine vollflächige Projektion mit Ausleucht winkeln von 15° horizontal und 10° vertikal verwendet. Es wäre aber auch ebenso eine klassische Abblendlichtverteilung möglich. Der Aufsetzpunkt der Projektion am Untergrund zum Lichtaustritt des Scheinwerfermoduls, also die Entfernung ab die selbige auf dem Boden leuchtet, beträgt knapp 5 m. Die Kamera wurde auf eine Belichtungszeit von 4 ms und einer Verstärkung von 9,5 dB bei 12 Bit Farbtiefe eingestellt. Bei Kameramodulen mit einer geringeren Empfindlichkeit sind ebenso höhere Belichtungszeiten möglich. Der Abstand zwischen jeder Messung beträgt 43 Sekunden.

Das Scheinwerfermodul wurde zur thermischen Stabilisierung zu Beginn der Messung für 10 Minuten auf volle Ausgangsleistung eingestellt. Die Temperatur der Kamera bewegte sich während der Messungen zwischen 49 und 50 °C, die Temperatur in der Nebelkammer stieg während der Messung in Abbildung 5 stetig von 16,1 auf 16,4 °C an.

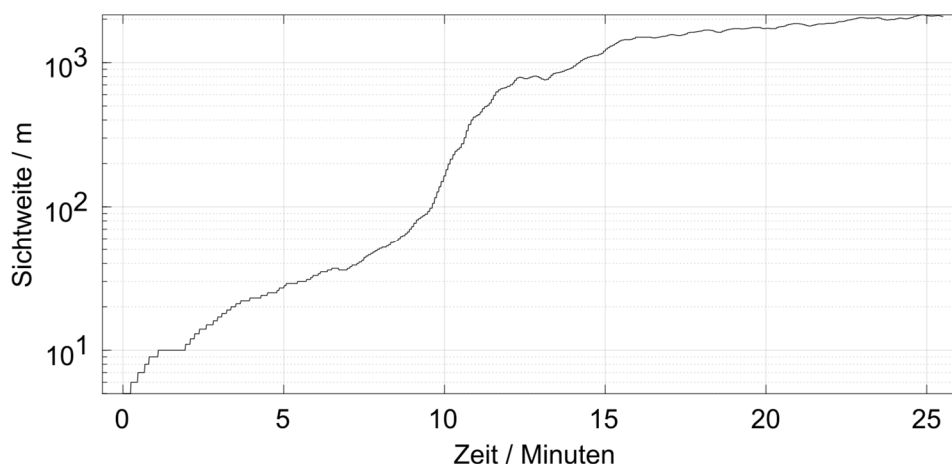


Abbildung 5 Der Verlauf der Sichtweite während der Messung in der Nebelkammer.

3.4 Segmentierung der Messbereiche

Da sich die Bereiche, welche die Kamera erfasst, voneinander unterscheiden, findet im Folgenden eine Segmentierung der Kameraaufnahmen statt. Abbildung 6 deutet

den Sichtbereich der Kamera an. Zu erkennen ist ein Bereich, in dem die Projektion des Scheinwerfers auf den Untergrund auftritt. Der Aufsetzpunkt befindet sich rund 5 m vom Lichtaustritt des Scheinwerfers entfernt, damit selbiger bereits bei minimaler Sichtweite in den Daten sichtbar ist. Der Bereich darüber wird als Luft-Boden-Bereich, der Bereich darunter als Luft-Bereich definiert. In dem Luft-Bereich erfasst die Kamera die Streuung in der Luft, in dem Luft-Boden-Bereich sowohl die Streuung in der Luft als auch die Reflexion am Untergrund, die für eine zusätzliche Streuung in der Luft sorgt.

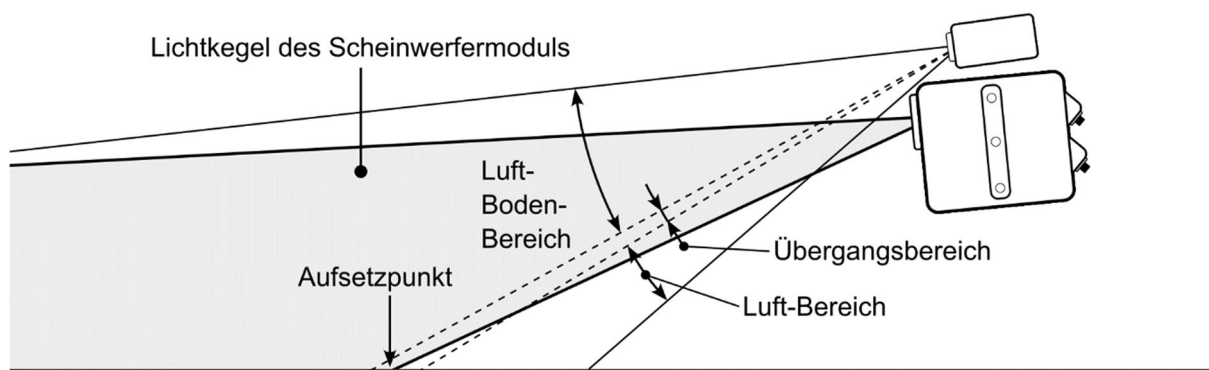


Abbildung 6 Unterteilung der Untersuchungsbereiche in den Luft-, Luft-Boden- und Übergangsbereich.

Abbildung 7 zeigt auf der rechten Seite die Auswertebereiche, die aus den Kameradaten extrahiert werden, neben den Intensitätswerten der Streuung des angeschalteten Scheinwerfermoduls. Hier ist zusätzlich ein Übergangsbereich angegeben, in dem die zuvor erwähnte Scheinwerferprojektion am Aufsetzpunkt auf dem Boden auftritt. Um den Effekt der Reflexion am Untergrund im Luft-Bereich weiter zu minimieren, wurde der Luft-Bereich daher verkleinert. Der Bereich wurde zudem so gewählt, dass die die Streuung im Zentrum der Projektion ausgewertet wird, um Effekte der Randbereiche zu ignorieren.

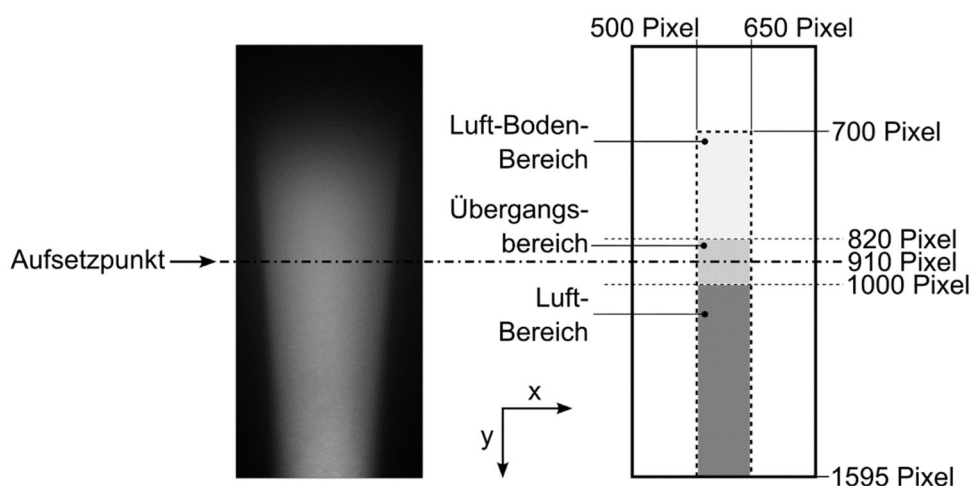


Abbildung 7 Segmentierung der durch die Kamera erfassten Bilddaten.

3.5 Theoretische Betrachtung

Für die theoretische Betrachtung wird nachfolgend die Veränderung über den in den Grundlagen zur Streuung eingeführten Extinktionskoeffizienten σ_e auf das eingemessene LED-Spektrum betrachtet.

Dazu wird das Spektrum des LED-Scheinwerfer mit dem Minimum ($\lambda^{-1,0}$) und dem Maximum ($\lambda^{-1,5}$) der Proportionalität gewichtet. Die Verläufe werden im Anschluss jeweils auf den maximalen Wert einer jeden Verteilung nahe der Wellenlänge von 400 nm normiert. Die Abbildung 8 zeigt diese Verläufe. Zu erkennen ist, dass die langwellige Strahlung im Vergleich zur kurzwelligen weniger stark gestreut wird, deren Intensität hier entsprechend abfällt. Das hat zur Folge, dass demnach der langwellige rote Wellenlängenbereich, bei der Kamera, also der Rotkanal, höhere Intensitäten erfahren würde.

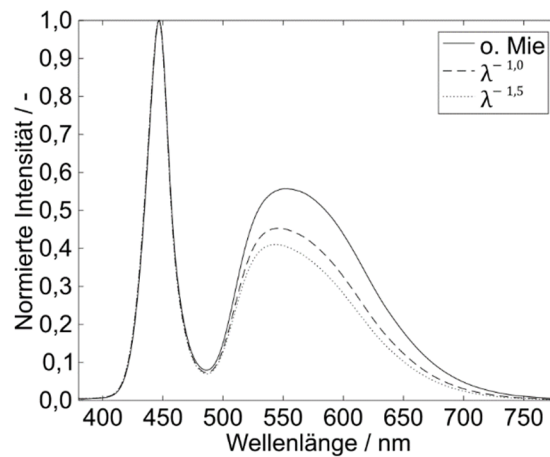


Abbildung 8 Der spektrale Verlauf des LED-Spektrums ohne der Proportionalität nach der Mie-Theorie (o. Mie) das zusätzlich mit der Proportionalität $\lambda^{-1,0}$ und $\lambda^{-1,5}$ gewichtet wird.

Um das zu überprüfen, findet ein Vergleich der jeweiligen Spektren in Abbildung 8 mit den Farbkanälen der Kamera statt. Dazu werden die Farbkanäle der Kamera, inklusive dem zuvor durchgeführten Weißabgleich, jeweils mit den drei unterschiedlichen LED-Spektren gewichtet. Darüber sollen die Unterschiede der Intensitäten berechnet werden, die durch die Veränderungen basierend auf der Streutheorie je Farbkanal der Kamera zu erwarten sind. Es wird also überprüft, ob die spektralen Veränderungen entsprechend der Theorie, von der Kamera erfasst werden können.

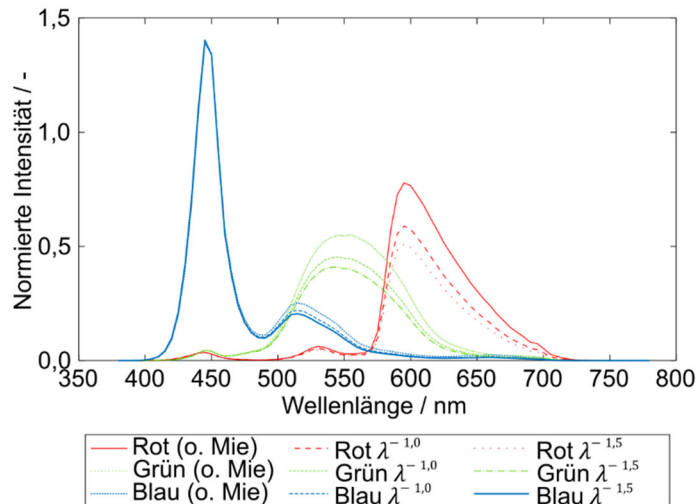


Abbildung 9 Die mit den LED-Spektren gewichteten Farbkanäle der Kamera.

Damit die grafische Darstellung in vergleichbare Zahlenwerte überführt wird, sind die Integrale der jeweiligen Kurvenverläufe je Farbkanal in der Tabelle 1 dargestellt. Die Integrale werden nach der Berechnung jeweils mit dem Blaukanal normiert, um die prozentuale Abweichung zwischen den Farbkanälen bei jeder Proportionalität zu erhalten. Bei den Werten ohne Berücksichtigung der Mie-Theorie sind bereits Abweichungen zu erkennen, was mit Ungenauigkeiten bei der spektralen Vermessung der Kamera, der spektralen Vermessung des Scheinwerfermoduls oder der Ermittlung des Weißabgleichs zusammenhängen kann. Die Korrektur der Integralwerte des Einflusses durch eine einfache Multiplikation der ist ohne weiteres nicht möglich, weil dabei die spektrale Verteilung nicht berücksichtigt werden kann. Durch die Integration ist die spektrale Verteilung in den Daten bereits nicht mehr vorhanden. Eine Korrektur der Spektren in Abbildung 2 oder Abbildung 3 wäre zudem beliebig, da der Fehler je Wellenlängenbereich unterschiedlich stark ausfallen kann. Generell lassen sich nach der Theorie jedoch große spektrale Einflüsse des gestreuten Lichtes auf die Farbkanäle der Kamera erkennen. Selbst wenn der Fehler beispielsweise mit 5 bis 6 % über den kompletten Wellenlängenbereich angenommen werden würde, so wäre der Einfluss nach wie vor vorhanden. Um die am weitesten voneinander entfernten Wellenlängenbereiche miteinander zu vergleichen, werden die Intensitäten der Blaukanals von denen des Rotkanals subtrahiert. Selbst bei der geringsten Proportionalität von $\lambda^{-1,0}$ wäre demnach eine Abweichung von rund 20 % (100 % - (74 % + 6 %)) zwischen der Intensität der beiden Farbkanäle zu erwarten. Bei $\lambda^{-1,5}$ würde der Unterschied bereits bei bis zu 29 % (100 % - (65 % + 6 %)) liegen.

Tabelle 2 Integrale der Kurvenverläufe der mit den LED-Spektren gewichteten und dem Weißabgleich korrigierten Farbkanälen der Kamera.

Farbkanal	Kamera (o. Korrektur)
Rotkanal (o. Mie)	95 %
Grünkanal (o. Mie)	94 %

Blaukanal (o. Mie)	100 %
Rotkanal $\lambda^{-1,0}$	74 %
Grünkanal $\lambda^{-1,0}$	80 %
Blaukanal $\lambda^{-1,0}$	100 %
Rotkanal $\lambda^{-1,5}$	65 %
Grünkanal $\lambda^{-1,5}$	74 %
Blaukanal $\lambda^{-1,5}$	100 %

Es gibt jedoch Effekte, die den durch die Kamera erfassbaren spektralen Einfluss der Streuung in den Daten dämpfen können. Davon werden im Folgenden basierend auf der Literatur einige Vermutungen aufgestellt:

1. Winkelabhängigkeit der Streuung
2. Durchdringung der gestreuten Strahlung bis zur Kamera
3. Zu starke Vereinfachung des Streuprozesses

Winkelabhängigkeit – Die gestreute Strahlung besitzt je Raumrichtung unterschiedlich hohe Intensitäten. Im Falle der Mie-Streuung ist die Streuung in Vorwärtsrichtung, also in Richtung, in welche der Scheinwerfer strahlt, besonders stark. Das hat zur Folge, dass die Streuung, welche die Kamera erfasst, deutlich geringere Intensitäten besitzt. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass sich der spektrale Effekt in Richtung der Kamera aufgrund der generell geringeren Intensitäten weniger stark ausprägen kann.

Durchdringung – Die gestreute Strahlung erfährt bei der Durchdringung in Richtung der Kamera eine Mehrfachstreuung an den Aerosolpartikeln in der Luft, wie die Abbildung 10 anhand der beiden eingezeichneten Strecken zeigt. Demzufolge wird die gestreute Scheinwerferstrahlung in Richtung der Kamera mehrfach gestreut. Das hat zur Folge, dass der kurzwellige blaue Wellenlängenbereich zwar stärker gestreut wird, die stärkere Durchdringung der langwelligen Anteile wiederum dafür sorgen kann, dass der rote spektrale Anteil von der Kamera als stärker aufgenommen wird.

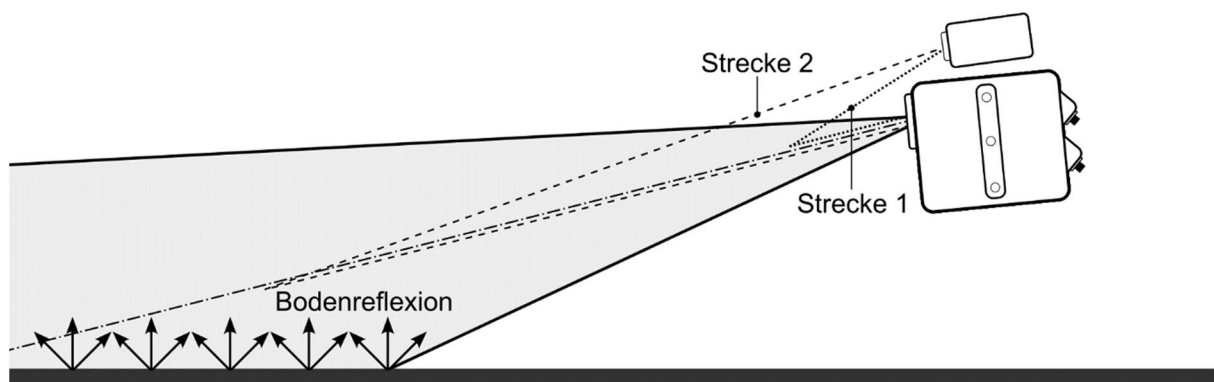


Abbildung 10 Zwei Beispiele für Strecken welche die vom Scheinwerfermodul ausgesandte Strahlung sowie die Streuung am Aerosol in Richtung der Kamera zurücklegen muss, bis sie auf den Sensor der Kamera trifft.

Vereinfachung – Die starke Vereinfachung der Proportionalität kann ebenso einen Einfluss auf den Effekt haben. Wie bereits zuvor bei der Erläuterung der Nebelkammer erwähnt, gibt es in der Realität je nach Tageszeit und Ort unterschiedliche Partikeldurchmesserverteilungen. Das hat zur Folge, dass die Partikeldurchmesser, zu denen in der Mie-Theorie beschriebenen stark abweichen können. Ebenso setzt sowohl die Mie- als auch die Rayleigh-Theorie die Einfachstreuung voraus, wohingegen bei Nebel eine Mehrfachstreuung zu erwarten ist. All das kann zu einer Dämpfung des Effektes führen.

3.6 Messung

Die theoretische Betrachtung lässt erwarten, dass die Unterschiede bezüglich der spektralen Intensitäten der Streuung zwischen dem Rot- und Blaukanal der Kamera im Minimum bei ungefähr 20 % liegen. Dementsprechend wäre zu erwarten, dass die spektrale Abweichung über die Kamera messtechnisch erfassbar und für die Sichtweitenbestimmung nutzbar sein sollte.

Im Folgenden wird daher die theoretische Betrachtung über die experimentelle Untersuchung in der Nebelkammer überprüft. Um die Streuung in der Luft zu untersuchen, werden dazu die Mittelwerte der Pixelwerte des Luft-Bereichs entsprechend der Abbildung 6 gebildet.

Abbildung 11 zeigt die Bildverarbeitungsschritte, die für den spektralen Vergleich des Kamera-Scheinwerfer-Sensors angewendet werden. Die Pixelwerte erfahren eine zusätzliche Verstärkung, sodass sie den Wertebereich bis 16 Bit möglichst vollständig abdecken. Auch wenn dadurch das Rauschen des Sensors mit verstärkt wird, welches durch die Gauß-Filterung ausgeglichen wird, werden so Artefakte durch die in der Arbeit genutzten Filterungen und Bildverarbeitungsverfahren bei zu geringen Pixelwerten minimiert.

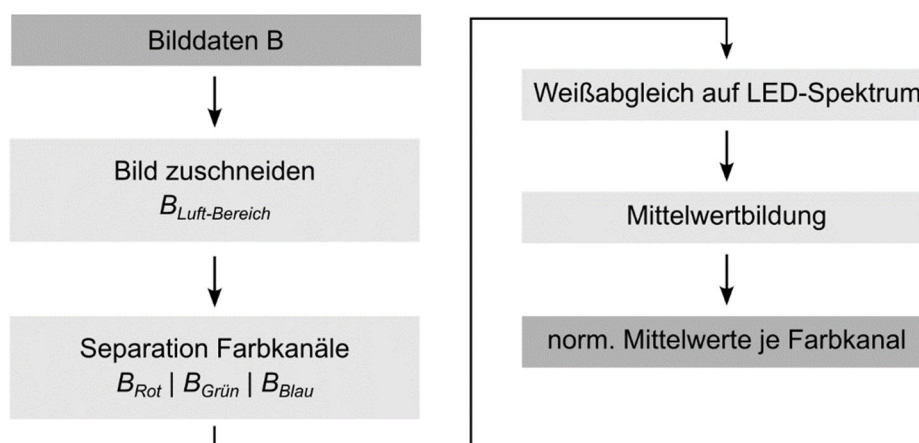


Abbildung 11 Berechnungsschritte für die Auswertung der Intensitäten innerhalb der experimentellen Untersuchung.

Die Mittelwerte der Luft-Bereiche der jeweiligen Farbkanäle sind in Abbildung 12 (a) über eine Sichtweite von 0 bis 1000 m dargestellt, was der Definition der maximalen

Sichtweite für Nebel nach der MOR entspricht. Der Luft-Bereich wird aufgrund seines vermeintlich geringen Bodeneinflusses gewählt. Die kurzen Antworten auf die zuvor gestellten Fragen lauten wie folgt:

1. Nein, die spektralen Unterschiede aus der Theorie lassen sich in der Praxis nicht in einem zur Sichtweitenbestimmung nutzbaren Umfang erkennen.
2. Ja, den Intensitätsverlauf der Streuung nach dem Bouguer-Lambert-Gesetz kann man in den Daten nachvollziehen.
3. Ja und nein, für die spektrale Analyse lassen sich die Hardwarekomponenten scheinbar nicht nutzen, für die Messung der Intensität der Streuung sehr wohl.

Die detaillierte Erläuterung folgt über die nun folgende Analyse der Messergebnisse.

Den Daten lässt sich entnehmen, dass die Intensitätsverläufe aus beiden Kameraperspektiven dem entsprechen, was über das Bouguer-Lambert-Gesetz, bezogen auf die Streuung im Nebel beschrieben wird. Markant ist hier der Verlauf der Intensität der Streuung, ähnlich einer Eulerschen Zahl mit negativen Exponenten, entsprechend der Gesetzmäßigkeit. Der Verlauf wird über die gestrichelte Linie in den Diagrammen angedeutet. Da dieser der Gesetzmäßigkeit nahe ist, deutet sich an, dass der Einfluss durch den Untergrund gering zu sein scheint.

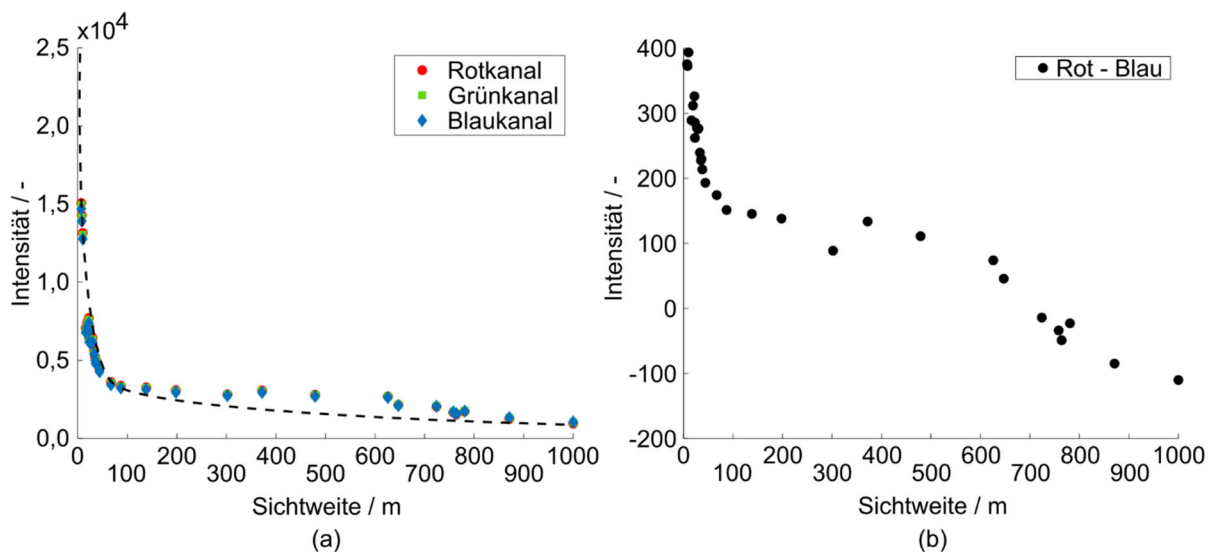


Abbildung 12 Mittelwerte der Luft-Bereiche (a) der Farbkanäle der Kamera mit dem angedeuteten Intensitätsverlauf nach dem Bouguer-Lambert-Gesetz und (b) die Differenzen des Rot- und Blaukanals.

Es lassen sich zusätzlich spektrale Unterschiede der Intensitäten der Streuung erkennen. Die Unterschiede bewegen sich im einstelligen Prozentbereich und sind über die Differenzen der Intensitäten der Farbkanäle in den Diagrammen in der Abbildung 12 (b) dargestellt. Für den spektralen Vergleich werden die Mittelwerte der Pixelwerte des Blaukanals von denen des Rotkanals subtrahiert. Den Diagrammen lässt sich entnehmen, dass der langwellige rote Anteil höhere Intensitäten aufweist, die Differenz daher positiv ist. Grund dafür könnte die stärkere Durchdringung der

langwelligen Strahlung sein. Zwar werden die kurzwelligen Bestandteile der Strahlung entsprechend der Theorie stärker gestreut, jedoch kommt hier die zuvor beschriebene Dämpfung in Richtung der Kameras zum Tragen. Steigen die Sichtweiten weiter an, drehen sich die Verhältnisse, sodass der Blaukanal höhere Intensitäten besitzt als der Rotkanal. Das könnte damit begründet werden, dass die Mehrfachstreuung der bereits aus dem Scheinwerferlichtkegel gestreuten Strahlung in Richtung der Kamera geringer ausfällt, die Wellenlängenselektivität in der Streuung also erhalten bleibt.

Ein weiterer Grund könnte die Veränderung der Partikeldurchmesserverteilung sein. Bei zunehmender Sichtweite könnten die Wasserpartikel mit großem Durchmesser bereits vermehrt zu Boden gesunken sein. Das kann zu im Mittel Partikeln mit geringerem Durchmesser führen, wodurch die Wellenlängenselektivität der Rayleigh-Theorie stärker zum Tragen kommt. Die Unterschiede zwischen den Wellenlängen wären demnach erheblich größer, wodurch der Blaukanal stärker verstärkt wird. Die Verhältnisse zwischen den beiden Farbkanälen schwanken zudem nicht, sondern verändern sich kontinuierlich. Danach würde sich der Intensitätsverlauf zur Sichtweitenbestimmung eignen, die spektralen Unterschiede aufgrund des geringen Unterschiedes wiederum weniger. Die theoretisch starken spektralen Effekte können in den Messdaten also nicht nachgewiesen werden.

Neben den zuvor beschriebenen Betrachtungen beschäftigen sich die folgenden Abschnitte mit ortsdiskreten Änderungen der Intensitäten und jeweiligen Spektren. Wurden bei den zuvor durchgeführten Betrachtungen noch alle räumlichen Informationen durch die Mittelwertbildung der gesamten Betrachtungsbereiche eliminiert, bleibt im Folgenden eine zusätzliche Dimension erhalten. Es werden im Kamerabild die Pixelwerte entlang der x-Achse gemittelt (vgl. Abbildung 7). Dadurch erhält man einen Intensitätsverlauf entlang der Tiefe beziehungsweise y-Achse des Bildes je Farbkanal. So können räumliche Unterschiede der Streuung untersucht werden.

Die Bildverarbeitung entspricht der aus der Abbildung 11, wobei hier die zuvor erwähnte andere Mittelwertbildung entlang der x-Achse durchgeführt wird. Zudem wird auf die Bilddaten ein Gauß-Tiefpassfilter mit einer Standardabweichung von $\sigma = 10$ angewendet, um mögliches Rauschen herauszufiltern.

Abbildung 13 skizziert mögliche Phänomene der Streuung in der Luft und der Reflexion am Untergrund. Der Nebel sorgt dafür, dass der Lichtkegel des Scheinwerfermoduls in die Breite gestreut wird. Gleichzeitig kommt es zur Reflexion der Strahlung am Untergrund. Der größere Lichtkegel sollte für eine Verschiebung des Aufsetzpunktes auf dem Untergrund sorgen. Die in der Literatur beschriebenen asymmetrische Rückreflexion am Untergrund ist hier ebenfalls angedeutet [11] [36] [37] [38] [39].

Während der Messung sollte die asymmetrische Verteilung bis auf die Veränderung der Intensität gleichbleiben, da sich der Untergrund nicht verändert. Das alles lässt erwarten, dass es zu einer Verschiebung des Intensitätsmaximums aus Sicht der Kameras kommt. Zusätzlich könnten die Wellenlängenabhängigkeit und die spektralen

Unterschiede in der Projektion eine Verschiebung der Maxima der Intensitäten in der Streuung hervorrufen. In der Abbildung ist zusätzlich eine Bildebene der Kamera angedeutet.

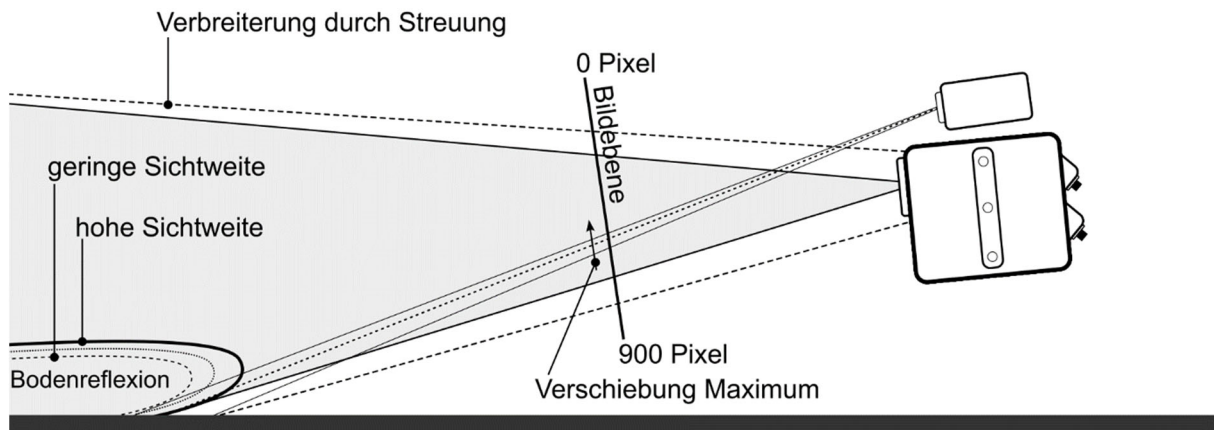


Abbildung 13 Mögliche Effekte die bei der Streuung in der Luft und der Reflexion am Untergrund auftreten können.

Hier dargestellt ist die erwähnte Mittelwertbildung der Intensitäten im Kamerabild entlang der x-Achse. Es sind Intensitätsverteilungen für Sichtweiten zwischen 7 und 87 m dargestellt, da die Unterschiede hier vermeintlich am höchsten sind (vgl. Abbildung 12 (b)). Bei jeder Sichtweite sind die aus den zuvor beschriebenen Gründen höheren Pixelwerte des Rotkanals zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich hier mit abnehmender Sichtweite der Aufsetzpunkt der Projektion auf dem Boden ausbildet, da die Intensitätsmaxima der Reflexion näher in Richtung Aufsetzpunkt wandern. Deutete sich das Maximum bei 10 m noch bei Pixelreihe 1100 an, so wandert es mit Zunahme der Sichtweite in Richtung des Ursprungs der y-Achse. Zudem liegen die Maxima der jeweiligen Farbkanäle nicht übereinander.

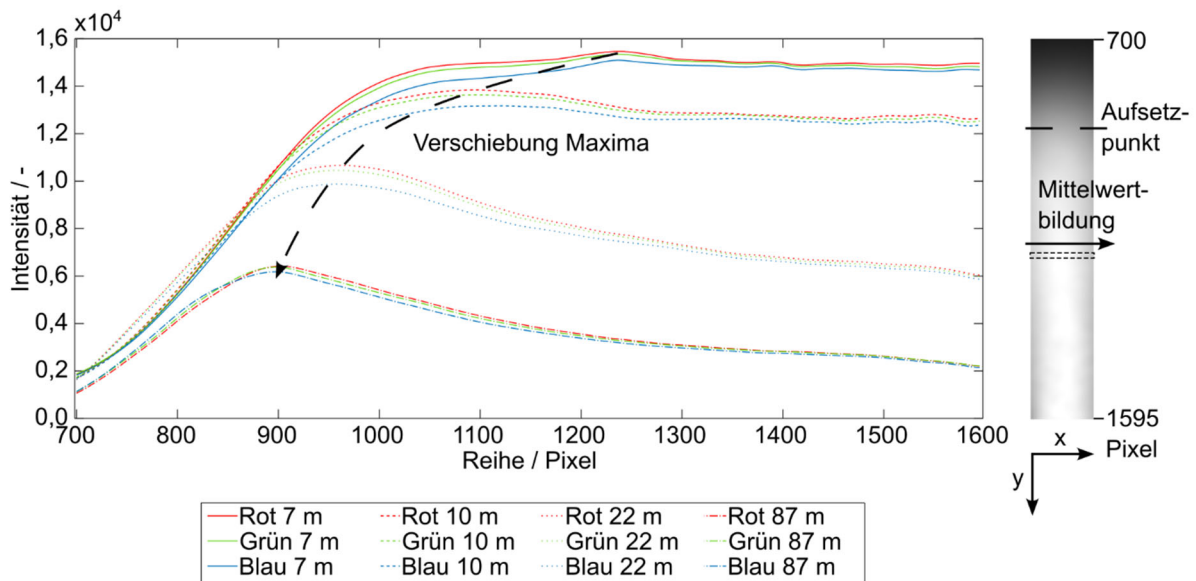


Abbildung 14 Spektrale Intensitätsverläufe inklusive der Verschiebung der Maxima bei unterschiedlichen Sichtweiten. Auf der rechten Seite ist eine Intensitätsverteilung des Grünkanals bei der Sichtweite 6 m dargestellt. Der Aufsetzpunkt liegt bei 910 Pixel.

Schaut man sich den räumlichen Verlauf, wie in Abbildung 14 dargestellt, an, ist eine Verschiebung der Intensitätsmaxima in Richtung Diagrammursprung, also entgegen der Position des Kamera-Scheinwerfer-Sensors zu erkennen. Der Wert 700 Pixel steht auf der y-Achse für den oberen (hinteren) und 1600 Pixel für den unteren (vorderen) Bildbereich.

Die unterschiedlichen Positionen der Maxima der drei Farbkanäle kann folgende Gründe haben:

1. Farbunterschiede/Farbsäume durch die verbauten Scheinwerferoptiken und das Spektrum der Lichtquelle
2. Farbsäume zwischen den einzelnen LEDs des Leuchtmittel
3. Einflüsse durch die Kameraoptik
4. Wellenlängenselektivität des Untergrundes
5. Wellenlängenselektivität der Streuung im Nebel

Die Farbunterschiede beziehungsweise Farbsäume durch die verbauten Scheinwerferoptiken und das Spektrum der Lichtquelle sind im Folgenden am wahrscheinlichsten einzustufen. Schaut man sich die spektrale Verteilung des LED-Spektrums in Abbildung 2 an, sieht man die Intensitätsunterschiede je Wellenlänge. Diese Farbunterschiede sorgen vermutlich zusammen mit den Farbsäumen für die Unterschiede in der Höhe der Maxima also der lokal unterschiedlichen Pixelwerte je Farbkanal.

Die Farbsäume zwischen den LEDs des LED-Arrays müssten sich über den kompletten Ausleuchtbereich zeigen, was hier in keinem ersichtlich hohen Anteil der Fall ist. Da es sich bei dem Kameraobjektiv um ein sehr hochwertiges handelt, ist auch

hier kein großer Effekt zu erwarten. Die Wellenlängenselektivität des Untergrundes bewegt sich im zuvor erwähnten Bereich von 1 – 2 % (langwellige Strahlung wird stärker reflektiert), was ebenfalls keinen ausschlaggebenden Einfluss hat. Die Wellenlängenselektivität der Streuung ist ebenfalls ein möglicher Grund.

Entgegen der Theorie scheinen die spektralen Unterschiede jedoch auch hier sichtbar geringer auszufallen. Interessanterweise gibt es die genannten räumlichen Veränderungen, die aufgrund der geringen Ausprägung jedoch nicht weiter im Detail betrachtet werden, da sie sich für die Bestimmung der Sichtweite durch die geringe Ausprägung nur schwierig zu eignen scheinen. Hier wäre eine generelle Bestimmung des Auftretens von Nebel denkbar.

4 Diskussion der Ergebnisse und Zusammenfassung

Die spektralen Unterschiede in den Messdaten lassen sich nur bedingt nachvollziehen. Die Frage, ob sich die spektralen Unterschiede aus der Theorie in den Messdaten finden, lässt sich also mit einem Ja und Nein beantwortet werden. Die hohen Unterschiede aus der Theorie lassen sich in der Praxis von der Kamera nicht erfassen. Kleine Unterschiede sind zu erkennen, bewegen sich jedoch im einstelligen Prozentbereich und eignen sich daher in der Realität vermutlich weniger für die Sichtweitenerfassung. Die spektralen Unterschiede in der Abbildung 14 sind in der 2D-Darstellung etwas größer, zeigen jedoch keinen offensichtlichen großen Unterschied zwischen den verschiedenen Sichtweiten. Es wäre jedoch ein Ausgangspunkt, um weitere Analysen bezüglich des Untergrundeinflusses durchzuführen.

Die Frage, ob man den Intensitätsverlauf, den das Bouguer-Lambert-Gesetz beschreibt, finden lässt kann bejaht werden. Das Diagramm in Abbildung 12 zeigt, dass sich die Formel der Gesetzmäßigkeit in den Daten nachvollziehen lässt. Sie entsprechen also dem, was über die MOR von der WMO für Sichtweitemessgeräte definiert wurde [10]. So kann die Streuung im Nebel durch den Scheinwerfer als Informationsquelle hier auch über eine monochrome Kamera nutzen. Ebenso lassen sich weitere Merkmale in den Intensitäten wie die Position des Intensitätsmaximums (vgl. Abbildung 14) nutzen, um darüber Sichtweiten im Bereich von 0 bis 100 m voneinander unterscheiden zu können.

Die Antwort darauf, ob sich Hardwarekomponenten nutzen lassen, die aktuell in den Fahrzeugen verbaut werden beziehungsweise es bereits sind, lässt sich ebenfalls nur mit einem Ja und einem Nein beantworten. Die spektralen Einflüsse sind geringer als aus der Theorie zu erwarten, lassen sich also nur bedingt nutzen. Da sich jedoch der Intensitätsverlauf unabhängig der spektralen Zusammensetzung als charakteristisches Merkmal herausgestellt hat, ließe sich jede im Fahrzeug verbaute Kamera, ebenso eine monochrome, nutzen, um diese Intensitäten zu detektieren. Dabei ist jedes Scheinwerfersystem geeignet, dessen spektrale Verteilung bekannt ist. Es wird ebenso kein Scheinwerfer mit einer besonders hohen Performance benötigt.

5 Ausblick

Für weitere Arbeiten an dem Thema wäre eine Durchführung von Messungen im realen Straßeneinsatz von Interesse. Es wäre zu überprüfen, wie sich andere Beleuchtungen auf die Messgröße auswirken. Insbesondere bei geringen Sichtweiten können diese anderen Strahlungsquellen eine hohe Streuung erfahren und dementsprechend das Scheinwerferlicht wenig beeinflussen. Das wäre ein Punkt dessen Untersuchung für die Systemumsetzung von großem Interesse ist.

Ebenso wäre die Untersuchung von unterschiedlichen Untergründen für die Überführung der Messung in der Nebelkammer und der theoretischen Betrachtung in die Realität sinnvoll. Insbesondere wenn sich der Boden durch die Benetzung durch Feuchtigkeit verändert und Spiegelungen zunehmen.

Der Effekt durch den dynamischen Fahrbetrieb wäre als gering einzustufen, da Kamera und Scheinwerfer in einem starren Abstand zueinander ausgerichtet sind. Es wäre der Effekt einer stärkeren Glättung zu erwarten. Ebenso bei einer erhöhten Belichtungszeit, wie es bei in aktuellen Fahrzeugen verbauten Kameras der Fall ist. Es müsste dabei der Effekt auf die Genauigkeit der Sichtweitenerfassung geprüft werden.

Für die weitere Nutzung des Scheinwerfers zur Sichtweitenerfassung im Bereich des automatisierten Fahrens wäre ebenso die Projektion von Mustern von Interesse und die Untersuchung von anderen Merkmalen des Nebels.

6 References

[1] T. W. Team, Next Stop for Waymo One: Los Angeles, WAYMO, 2022, URL: <https://blog.waymo.com/2022/10/nextstop-for-waymo-one-los-angeles.html> (besucht am 01.01.2023)

[2] V. Finkler, Autonomes Fahren für jeden: Tesla macht Beta-Software für alle Kunden verfügbar, EFAHRER, 2022, URL: https://efahrer.chip.de/news/autonomes-fahren-fuer-jeden-teslamacht-beta-software-fuer-alle-kunden-verfuegbar_1010407 (besucht am 15.12.2022)

[3] Drive Pilot kostet wenigstens 5.950 Euro, auto motor sport, 2022, URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/techzukunft/mercedes-autonom-level-3-drive-pilot-haftungunfall/> (besucht am 13.12.2022)

[4] Mercedes-Benz DRIVE PILOT, Mercedes-Benz, URL: <https://www.mercedesbenz.de/passengercars/technology/drive-pilot.html> (besucht am 23. 03. 2023)

[5] S. Bäumer. Lidar und Radar – künftig versteckt im Scheinwerfer, 2022, URL: <https://www.amz.de/lidar-und-radarkuenftig-versteckt-im-scheinwerfer> (besucht am 20.12.2022)

[6] P. Harry und W. Fellner, Lexikon der Optik: M bis Z, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2003

- [7] H. C. van de Hulst, Light Scattering by Small Particles, Dover Publications, Inc., New York, 1957
- [8] Unser "Digital Light SSL | HDLichtsystem: ein neuer Meilenstein der automobilen Lichttechnik, HELLA, 2019. URL: <https://www.hella.com/techworld/de/Lounge/Unser-Digital-Light-SSL-HD-Lichtsystem-ein-neuer-Meilenstein-derautomobilen-Lichttechnik-55548/> (besucht am 15.12.2022)
- [9] Digital Light: Millions of Pixels on the Road, AL, 2018. URL: <https://www.al.world/news/article/digitales-licht-millionenpixel-auf-der-strasse/?L=1&cHash=7a> (besucht am 01.01.2023)
- [10] World Meteorological Organization, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, World Meteorological Organization, Geneva, 2008
- [11] R. Gibbons und W. Adrian, "Influence of Observation Angle on Road Surface Reflection Characteristics", Journal of the Illuminating Engineering Society, Taylor and Francis, London, S. 139–149 ,1997
- [12] J. P. Gehrke und P. Köberle, Moderne Physik: Von Kosmologie über Quantenmechanik zur Festkörperphysik, De Gruyter, Berlin, 2017.
- [13] W. Demtröder, Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2009
- [14] W. H. Greulich und U. R. Kilian, Lexikon der Physik: in sechs Bänden, Spektrum, Heidelberg, 2003
- [15] W. Roedel und T. Wagner, Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2011
- [16] P. Duthon, M. Colomb und F. Bernardin, "Fog Classification by Their Droplet Size Distributions: Application to the Characterization of Cerema's Platform", Atmosphere, Basel, S. 596, 2020
- [17] U. Slabke, LED-Beleuchtungstechnik: Grundwissen für Planung, Auswahl und Installation, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2018
- [18] World Meteorological Organization, International Meteorological Vocabulary, second edition, World Meteorological Organization, Geneva, 1992
- [19] H. R. Ris, Beleuchtungstechnik für Praktiker: Grundlagen, Lampen, Leuchten, Planung, Messung, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2019
- [20] G. A. Reider, Photonik: Eine Einführung in die Grundlagen, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2022
- [21] G. Kortüm und D. Oelkrug, "Über den Streukoeffizienten der Kubelka-Munk-Theorie", Zeitschrift für Naturforschung A, De Gruyter, Berlin, S.28–37, 1964
- [22] H. Hinzpeter und M. Schlegel, Strahlungstransporte in der Atmosphäre, promet, Deutscher Wetterdienst, 1985

- [23] E. J. McCartney, *Optics of the Atmosphere: scattering by molecules and particles*, John Wiley & Sons, New York, 1976
- [24] H. G. Houghton, “The Size and Size Distribution of Fog Particles”, *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing, Melville, S.467-475, 1932
- [25] S. S. Muhammad, “Characterization of Fog Attenuation in Terrestrial Free Space Optical Links”, *Optical Engineering*, SPIE, Bellingham, S.066001, 2007
- [26] J. E. McCartney und F. Freeman, “Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles”, *Physics Today*, AIP Publishing, Melville, S.74-76, 1977
- [27] Datenblatt: Industriekameras / LX-Serie VLXT-71C.I – Baumer, Baumer, URL: https://www.baumer.com/medias/__secure__/Baumer_VLXT-71C.I_DE_20221110_DS.pdf?mediaPK=9056664289310 (Besucht am 17. 03. 2023)
- [28] S. Liandrat, P. Duthon, F. Bernardin, A. B. Daoued und J.-L. Bicard, “A Review of Cerema PAVIN Fog & Rain Platform: From Past and Back to the Future”, *TRANSFORMATION BY TRANSPORTATION, ITS WORLD CONGRESS*, Los Angeles, 2022
- [29] R. Gallen, A. Cord, N. Hautiere und D. Aubert, “Towards Night Fog Detection through Use of In-Vehicle Multipurpose Cameras”, *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Baden-Baden, S. 399–404, 2011
- [30] J. Dubbert, B. Müller und G. Meyer, *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2018: Smart Systems for Clean, Safe and Shared Road Vehicles. Lecture Notes in Mobility*, Springer International Publishing, Cham, 2019
- [31] T. Yang, Y. Li, Y. Ruichek und Z. Yan, “LaNoising: A Data-driven Approach for 903nm ToF LiDAR Performance Modeling under Fog”, *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, S.10084–10091, 2020
- [32] M. Jokela, M. Kutila und P. Pyykönen, “Testing and Validation of Automotive Point-Cloud Sensors in Adverse Weather Conditions”, *Applied Sciences*, S. 2341, 2019
- [33] R. Gourova, O. Krasnov und A. Yarovoy, “Analysis of Rain Clutter Detections in Commercial 77 GHz Automotive Radar”, *2017 European Radar Conference (EURAD)*, 2017 European Radar Conference (EURAD), S. 25–28, 2017
- [34] Y. Li, P. Duthon, M. Colomb und J. Ibanez-Guzman, “What Happens for a ToF LiDAR in Fog?”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, S. 6670–6681, 2021
- [35] F. Bernardin, P. Duthon und J.-L. Bicard, *Fog & Rain Facility (Whitepaper)*, CEREMA, Clermont-Ferrand, 2020

- [36] I. Petrinska, D. Ivanov, D. Pavlov und K. Nikolova, “Road Surface Reflection Properties of Typical for Bulgaria Pavement Materials”, Lux Junior 2015, Ilmenau, 2015
- [37] B. Kleinert, C. Schierz, S. Völker und M. Marutzky, Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen, Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik in Ilmenau Nummer 19, ilmedia, Ilmenau, 2017
- [38] C. Schulze, In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen, Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG, Bremen, 2023
- [39] Technical Report Road Lighting Calculations (CIE 140-2000), CIE, 2006
- [40] G. Kortüm, “Einfach- Und Mehrfachstreuung”, Reflexionsspektroskopie, Springer Berlin Heidelberg, S. 74–105, 1969
- [41] M. A. Maikowski, “Lichtabsorption in pigmentierten Schichten”, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, S. 313–326, 1967

Effizienzsteigerungsmöglichkeiten für Kfz- Beleuchtungssysteme durch Analyse der Verkehrssituation

Korbinian Kunst¹, Anil Erkan¹, Lily Antoinette Engelbrecht-Schnür¹, David Hoffmann¹,
Markus Peier¹, Timo Singer¹, Tran Quoc Khanh¹

1: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle
Verarbeitung, Hochschulstr. 4a, 64289 Darmstadt, Germany

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, durch die Analyse von Verkehrsstatistiken nächtliche Verkehrssituationen zu identifizieren, die das Potenzial zur Effizienzsteigerung haben. Dazu können Staus, der Berufsverkehr oder der nächtliche Verkehr in beleuchteten Gebieten gehören. Eine solche Anpassung könnte zum Beispiel das Umschalten von Abblendlicht auf Tagfahrlicht im Stau sein. Die Analyse zeigt, dass vor allem der Berufsverkehr in der Dämmerung und der städtische Nachtverkehr für weitere Untersuchungen in Betracht gezogen werden sollten, da diese das meiste Einsparpotential darbieten.

Index Terms: Nachhaltigkeit, Kfz-Lichttechnik, Energieeffizienz, Verkehrsstatistik

1 Einleitung

Um solche relevanten Anwendungsfälle im Straßenverkehr zu identifizieren, werden verschiedene Verkehrssituationen betrachtet und analysiert. Aus dieser Betrachtung wird dann eine Relevanzanalyse für das höchste Effizienzsteigerungspotential ohne Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit durchgeführt.

2 Verkehrssituationen

In diesem Abschnitt erfolgt die Analyse der Verkehrssituation auf der Grundlage von Verkehrsstatistiken. Die Grundlagen für die Analyse werden im Wesentlichen aus der Verkehrsstatistik für Deutschland abgeleitet.

Ausgangspunkt aller nachfolgenden Betrachtungen ist die jährliche Gesamtfahrleistung der Pkw in Deutschland, die im Jahr 2019 bei 644,8 Mrd. km lag [1]. Weiterhin wird ein Nachfahranteil von 20 % angenommen [2-4].

2.1 Stau

Der Stau (siehe Abbildung 1) ist für die meisten Verkehrsteilnehmer die wohl ärgerlichste Verkehrssituation.



Dennoch gehört er zu den Verkehrssituationen, die aufgrund der Anzahl der beteiligten Fahrzeuge ein hohes Potenzial für Effizienzsteigerungen aufweisen können.

So gab es im Jahr 2019 in Deutschland insgesamt 708.500 Staus mit einer Gesamtlänge von ca. 1,4 Mio. km und ca. 521.000 Stautunden [5].



Abbildung 1: Staus bieten hohes Potential für Energieeffizienzsteigerungen [6,7]

Zur Klärung der Frage, welche Lichtfunktionen zur Effizienzsteigerung im Stau zu berücksichtigen sind, werden die Stausituationen bei Tag und bei Nacht getrennt betrachtet.

Während der Fahrt bei Tageslicht wird nur das Tagfahrlicht in den Scheinwerfern aktiviert, um die Sichtbarkeit des Fahrzeugs zu verbessern. In einer Stausituation ist diese Information nicht zwingend erforderlich, da sich die relevanten Verkehrsteilnehmer auch im Stillstand in unmittelbarer Nähe befinden. Es wäre daher denkbar, die Tagfahrlichtfunktion hier abzuschalten oder zumindest zu dimmen. Im Heckbereich ist bei Stausituationen das Bremslicht aktiv, das bei Tag nicht verändert werden sollte, da die Bremslichtfunktion zusätzlich zu den blinkenden Warnblinkleuchten dem nachfolgenden Verkehr das Stauende signalisiert.

Wird die Stausituation bei Nacht betrachtet, werden sowohl das Abblendlicht, das für die Sicht des Fahrers verantwortlich ist, als auch das Positionslicht des Scheinwerfers eingeschaltet. Gleichzeitig kann das Abblendlicht in einer Stausituation seine eigentliche Funktion nicht mehr erfüllen, da es nur das Heck des vorausfahrenden Fahrzeugs ausleuchtet. Die Funktion des Abblendlichts ist daher in nächtlichen Stausituationen obsolet und könnte durch das Tagfahrlicht oder das Positionslicht ersetzt werden.

Im Gegensatz zu Stausituationen am Tag könnte die Bremslichtfunktion bei nächtlichen Stausituationen abgeblendet werden, da bereits geringere Kontraste

ausreichen, um die Signalfunktion zu erfüllen. Ein weiterer positiver Effekt des Abblendens der Bremslichtfunktion wäre die Reduzierung des Blendpotenzials für den nachfolgenden Verkehr.

Für die Regelung des Tagfahrlichts am Tag und des Abblendlichts bei nächtlichen Staus könnten vorhandene Sensoren wie Geschwindigkeits- und GPS-Sensoren verwendet werden. Für die Regelung des Bremslichts könnten Parksensoren zur Erkennung des nachfolgenden Verkehrs eingesetzt werden.

2.2 Hauptverkehrszeiten in der Abenddämmerung

Eine weitere Verkehrssituation, die ein hohes Potenzial für Effizienzsteigerungen haben könnte, ist der Pendlerverkehr in der Dämmerung (siehe Abbildung 2). In Deutschland fahren 68 % der Erwerbstätigen mit dem Auto zur Arbeit, und die meisten Pendler benötigen zwischen 10 und 60 Minuten (72,1 % der Erwerbstätigen) für den Weg zur Arbeit [8]. Folglich liegen die Hauptverkehrszeiten in Deutschland ungefähr zwischen 06:30 und 08:30 Uhr am Morgen und zwischen 15:30 und 17:30 Uhr am Nachmittag [9].



Abbildung 2: Hauptverkehrszeit in der Abenddämmerung [10,11]

Bei 45,4 Millionen Erwerbstätigen [12] gibt es somit etwa 30,9 Millionen Pendler. Um die Pendlerzeit in der Dämmerung abzuschätzen, werden der Sonnenaufgang und der Sonnenuntergang in Darmstadt als Beispiel genommen (siehe Abbildung 3) [13].

Bei der Betrachtung von Sonnenaufgang und Sonnenuntergang wird deutlich, dass der Berufsverkehr vor allem in den Wintermonaten von November bis Februar in der Dämmerung stattfindet, also etwa ein Drittel des Jahres.

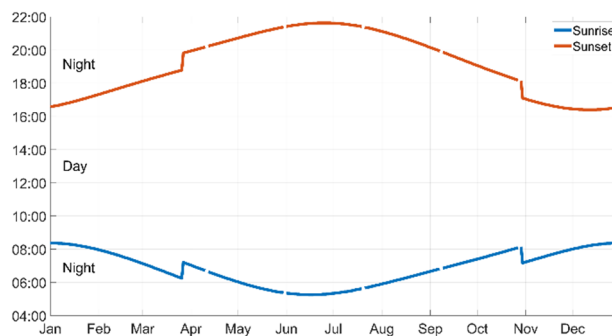


Abbildung 3: Verlauf von Sonnenaufgang (blau) und Sonnenuntergang (rot) über das Jahr in Darmstadt, Deutschland [13]

Für die Betrachtung der Gesamtdauer des Berufsverkehrs in der Abenddämmerung werden auf der Grundlage der gezeigten Daten folgende Annahmen getroffen. Es wird von einer Pendeldauer von einer Stunde am Morgen und einer Stunde am Nachmittag ausgegangen, wovon ein Drittel in der Dämmerung stattfindet. Daraus ergibt sich eine Pendeldauer von 0,67 Stunden in der Abenddämmerung pro Tag. Bei etwa 250 Arbeitstagen pro Jahr summiert sich die Pendelzeit in der Dämmerung auf etwa 166,67 Stunden pro Pendler. Für alle 30,9 Millionen Pendler beträgt die Pendelzeit in der Dämmerung also 5,15 Milliarden Stunden, wenn jeder Arbeitnehmer allein mit seinem Fahrzeug pendelt.

Eine mögliche Änderung in der Dämmerung kann durch die Anpassung der in der UNECE-Regelung Nr. 48 festgelegten Schwellenwerte für das Umschalten zwischen Abblendlicht und Tagfahrlicht erfolgen. Derzeit muss das Abblendlicht bei Beleuchtungsstärken unter 1000 lx eingeschaltet und über 7000 lx ausgeschaltet werden. [14]

Durch die Ermittlung neuer geeigneter Schwellenwerte könnte das Tagfahrlicht länger genutzt und der Energieverbrauch durch Abschalten des Abblendlichts gesenkt werden. Die eigentliche Einstellung der Lichtfunktionen kann direkt über den bereits vorhandenen Lichtsensor hinter der Windschutzscheibe erfolgen.

2.3 Städtischer Nachtverkehr

Wie zu Beginn dieses Abschnitts erwähnt, beträgt die Gesamtfahrleistung der Pkw in Deutschland etwa 644,8 Mrd. km, wovon etwa 20% in den Nachtstunden erbracht werden. Berücksichtigt man zusätzlich, dass etwa 26% der Pkw-Fahrleistung in städtischen Gebieten erbracht werden [15], so ergibt sich eine Gesamtfahrleistung für den Stadtverkehr in der Nacht von etwa 33,53 Mrd. km. Bei einer durchschnittlichen

Höchstgeschwindigkeit von $27,6 \text{ km h}^{-1}$ für deutsche Großstädte (ermittelt in Leipzig) [16] ergibt sich daraus eine Gesamtfahrzeit von 1,2 Mrd. Stunden im nächtlichen Stadtverkehr. Dies zeigt unmittelbar das enorme Potenzial zur Effizienzsteigerung in dieser Verkehrssituation.

Mögliche Anpassungen würden wiederum das Abblendlicht betreffen. So könnte beispielsweise die Intensität des Abblendlichts aufgrund der in städtischen Gebieten bereits vorhandenen Straßenbeleuchtung deutlich verringert werden (siehe Abbildung 4). Gleichzeitig darf die Sicherheit beim Führen eines Fahrzeugs nicht beeinträchtigt werden. So könnte das Abblendlicht auf eine Vorfeldbeleuchtung reduziert werden, um die Sichtbarkeit des Fahrzeugs und das subjektive Sicherheitsgefühl der Fahrzeuginsassen zu bewahren.



Abbildung 4: Der städtische Verkehrsraum bietet aufgrund der vorhandenen Straßenbeleuchtung ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung

Die Anpassung des Abblendlichts könnte über verschiedene bereits vorhandene Sensoren, wie GPS, den Lichtsensor oder auch Kameras, die zur Steuerung von ADB-Systemen verwendet werden, realisiert werden.

2.4 Ampelanlagen

Auch die Standzeiten während der Rotphasen an Ampelanlagen bieten Potenziale zur Effizienzsteigerung. Ausgehend von einer täglichen Pkw-Betriebszeit in Deutschland von ca. 0,75 Stunden [17] und einem Zeitverlust an Kreuzungen von 10 % [18] ergibt sich für die 48,5 Mio. Pkw [19] in Deutschland eine Gesamtstandzeit von ca. 1,3 Mrd. Stunden, davon 1,1 Mrd. Stunden (80 %) tagsüber und 265,5 Mio. Stunden (20 %) nachts.

Hier, wie auch bei nächtlichen Staus, könnte das Bremslicht gedimmt werden, da zum einen die Ampel selbst bereits das Anhalten signalisiert und zum anderen das Blendpotential für den nachfolgenden Verkehr reduziert werden könnte. Tagsüber sollte die Bremslichtfunktion nicht verändert werden, da hier die Signalfunktion deutlich sichtbar bleiben muss.

3 References

- [1] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): “Verkehrs- und Unfalldaten - Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland”, 2021
- [2] Wördenweber, B., Lachmayer, R., Witt, U.: “Intelligente Frontbeleuchtung”, ATZ, 98, 10, 1996
- [3] Kosmas, K.: “Optimierung von adaptiven Kfz-Scheinwerfertechnologien zur Blendungsbegrenzung unter dynamischen Bedingungen”, Ph.D. Thesis, Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2019
- [4] Stamatiadis, N.; Psarianos, B.; Apostoleris, K.; Taliouras, P.: “Nighttime versus daytime horizontal curve design consistency: Issues and concerns”, J. Transp. Eng. Part A Syst., 146, 3, 2020
- [5] ADAC Staubilanz 2019, <https://presse.adac.de/regionalclubs/suedbaden/adac-staubilanz-2019---191000-kilometer-stillstand.html>, zugegriffen am: 21.09.2022
- [6] NDR: “A1 zwischen Holdorf und Neuenkirchen-Vörden gesperrt”, https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/osnabrueck_emsland/A1-zwischen-Holdorf-und-Neuenkirchen-Voerden-gesperrt,aktuellosnabrueck6616.html, zugegriffen am: 21.09.2022
- [7] Image source: Deutsche Presse-Agentur dpa/Bernd Von Jutrczenka,
- [8] Redaktionsnetzwerk Deutschland: “Datenanalyse: Autos werden nicht erst seit dem SUV-Boom größer”, <https://www.rnd.de/wirtschaft/datenanalyse-autos-werden-nicht-erst-seit-dem-suv-boom-grosser-6GTM66RRNJEC7EYHR3FQS7Y24Y.html#:~:text=Die%20Auswertung%20von%20Daten%20des,sie%20auf%204%2C60%20Meter>, zugegriffen am: 21.09.2022

- [9] Statistisches Bundesamt (destatis): “Berufspendler”, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/Tabellen/pendler1.html>, zugegriffen am: 21.09.2022
- [10] Tagesspiegel: “Berufsverkehr: Pendlern fehlen Parkplätze am Berliner Stadtrand”, <https://www.tagesspiegel.de/berlin/pendlern-fehlen-parkplatze-am-berliner-stadtrand-6116299.html>, zugegriffen am: 21.09.2022
- [11] Image source: Deutsche Presse-Agentur dpa, https://www.tagesspiegel.de/berlin/images/heprodimagesfotos83120161128pendlerneu335120161127154847277jpg/alternates/BASE_21_9_W1000/heprodimagesfotos83120161128pendlerneu335120161127154847277jpg.jpeg, zugegriffen am: 21.09.2022
- [12] Statistisches Bundesamt (destatis): “Erwerbstätigkeit”, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/inhalt.html>, zugegriffen am: 21.09.2022
- [13] Deep Sky: “Mond- und Dämmerungskalender für Deep Sky 2017–2030 Deutschland [PDF]”, <http://deepsky.square7.ch/>, zugegriffen am: 21.09.2022
- [14] Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE): “Regulation No. 48 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices”, 2019
- [15] Statista: “Verteilung der Fahrleistung von Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr in Deutschland nach Ortslage”, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/965022/umfrage/verteilung-der-fahrleistung-von-kraftfahrzeugen-nach-ortslage-in-deutschland/>, zugegriffen am: 21.09.2022
- [16] Statista: “Durchschnittliche Geschwindigkeit auf Hauptverkehrsstraßen deutscher Großstädte zur Hauptverkehrszeit im Jahr 2018”, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1079302/umfrage/durchschnittliche-fahrgeschwindigkeit-zur-hauptverkehrszeit-in-deutschen-grossstaedten/>, zugegriffen am: 21.09.2022
- [17] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): “Ergebnisbericht: Mobilität in Deutschland – MiD”, 2019
- [18] Schuman, R.: “Traffic Signals Meet Big Data”, <https://inrix.com/blog/suprising-findings-from-the-inrix-signals-scorecard/>, zugegriffen am: 21.09.2022

- [19] Umweltbundesamt: “Verkehrsinfrastruktur und Fahrzeugbestand”,
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeugbestand#lange-der-verkehrswege>,
zugegriffen am: 21.09.2022

Vereinfachte lichttechnische Vermessung der ortsfesten Straßenbeleuchtung bei Dunkelheitsunfällen

Lukas Liegener, Prof. Dr. Stephan Völker

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, Fakultät IV, Elektrotechnik und Informatik, Einsteinufer 19, 10587 Berlin

Zusammenfassung

Bereits 1992 stellte die Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Straßenbeleuchtung und Unfallhäufigkeit fest [1]. Auch Untersuchungen des Fachgebietes Lichttechnik an der TU Berlin weisen auf einen Zusammenhang zwischen Unfallzahlen und Straßenbeleuchtung hin [2] [3]. Zur Senkung jener Verkehrsunfälle, welche vermutlich aus einer unzureichenden Beleuchtung resultieren, müssen diese Verkehrsorte zuerst durch photometrische Messungen identifiziert werden. Daher sollte zukünftig an Unfallorten eine routinemäßige Überprüfung der Einhaltung der normativen Vorgaben zur Straßenbeleuchtung (DIN EN 13201) erfolgen.

Gängige Messgeräte/verfahren, die dies ermöglichen, sind teuer und/oder brauchen viel Zeit in der Anwendung. In dem von der Bundesanstalt für Straßenwesen finanzierten Projekt wurden deshalb folgende drei, vereinfachte Messverfahren entwickelt:

1. Ein elektrisches Fahrzeug zur Messung der Beleuchtungsstärkeverteilung, welches über eine Webapplikation gesteuert wird.
2. Ein Leuchtdichtenormal, mit dessen Hilfe eine Abschätzung der Fahrbahnleuchtdichte ermöglicht wird.
3. Die Kalibrierung einer Digitalkamera zur Messung von Leuchtdichten.

Schlagwörter: Straßenbeleuchtung, Messtechnik, Dunkelheitsunfälle, Verfahrensentwicklung

1 Einleitung

In Bezug auf eine normgerechte Straßenbeleuchtung wird in den meisten Fällen die DIN 13201 [4], [5], [6] zu Rate gezogen. Unter anderem teilt sie die Verkehrszonen nach Parametern wie der Art der Verkehrsteilnehmenden und deren Geschwindigkeit, Anzahl der Fahrbahnstreifen und weiteren Einflussfaktoren in Kategorien (M, P, C) ein.



Diese werden weiter unterteilt und mit photometrischen Mindestanforderungen versehen. Eine Auswahl der einzuhaltenden Parameter ist in den dargestellten Tabellen (1-3) zu sehen.

M-Klasse	Fahrbahnleuchtdichte (trockener Zustand)		P-Klasse	Horizontale Beleuchtungsstärke		C-Klasse	Horizontale Beleuchtungsstärke	
	\bar{L} [Min. Wartungswert] cd/m^2	U_o [Mindestwert]		\bar{E} [Min. Wartungswert] lx	E_{min} [Wartungswert] lx		\bar{E} [Min. Wartungswert] lx	U_o [Mindestwert]
M1	2,00	0,40	P1	15,0	3,00	C0	50	0,40
M2	1,50	0,40	P2	10,0	2,00	C1	30	0,40
M3	1,00	0,40	P3	7,50	1,50	C2	20,0	0,40
M4	0,75	0,40	P4	5,00	1,00	C3	15,0	0,40
M5	0,50	0,35	P5	3,00	0,60	C4	10,0	0,40
M6	0,30	0,35	P6	2,00	0,40	C5	7,50	0,40

Tabelle 1: Ausschnitt der M-Beleuchtungsklassen [5]

Tabelle 2: Ausschnitt der P-Beleuchtungsklassen [5]

Tabelle 3: Ausschnitt der C-Beleuchtungsklassen [5]

Ziel des von der Bundesanstalt für Straßenwesen finanzierten Projektes (FE 82.0791) war es, eine direkte, routinemäßige Überprüfung der Beleuchtungssituation an nächtlichen Unfallstellen zu ermöglichen. Hierfür wurden Verfahren entwickelt, mit denen die photometrischen Daten an Unfallstellen bei Dunkelheitsunfällen praktikabel und zuverlässig erhoben werden können. Im Rahmen der Unfallrekonstruktion kann so eine erste Einschätzung erfolgen, ob die normativen Vorgaben an die Beleuchtung eingehalten wurden.

2 Methodik für die Entwicklung der Messverfahren

Zu Beginn des Projektes wurde eine Anforderungsliste erstellt. Zu ihnen gehörte ein möglichst niedriger Zeitaufwand bei der Durchführung der Messung, ein Budget der jeweiligen Messverfahren von etwa 1000 €, möglichste niedrige Messunsicherheiten und eine einfache Anwendbarkeit. Die Vor- und Nachteile möglicher Verfahren wurden mit Hilfe eines morphologischen Kastens einander gegenübergestellt. Im Resultat wurden die drei, im Folgendem genauer beschriebenen, Messverfahren umgesetzt.

3 Beleuchtungsstärkemessung mittels elektrischem Mini-Fahrzeug

Für die Beleuchtungsstärkemessung mit Hilfe eines elektrischen Messfahrzeugs (Abbildung 1) spielen verschiedene Komponenten zusammen (Abbildung 2). Herzstück des Messfahrzeugs ist ein in Python programmierter Webserver auf einem leistungsfähigen Microcontroller (Raspberry pi 4B), welcher mit Hilfe eines Hotspots über ein Smartphone oder Laptop erreicht werden kann, sobald das Fahrzeug gestartet wird. Neben der Kommunikation zum Nutzer hat der Webserver zwei

Aufgaben. Zum einen kommuniziert er mit einem weiteren Microcontroller (Thunderborg), welcher für die Ansteuerung der Motoren verantwortlich ist. Über die GUI des Webservers ist es so möglich, komplexe Bewegungen, wie Vorwärts-/Rückwärts-/Kurvenfahren und Drehungen durchzuführen. Zum anderen kümmert sich der Webserver um die Kommunikation mit dem Datenerfassungssystem. Dieses ist in der Lage, Spannungen des angeschlossenen Beleuchtungsstärkemesskopfes mit einer sehr hohen Datenrate (100kS/s) auszulesen.

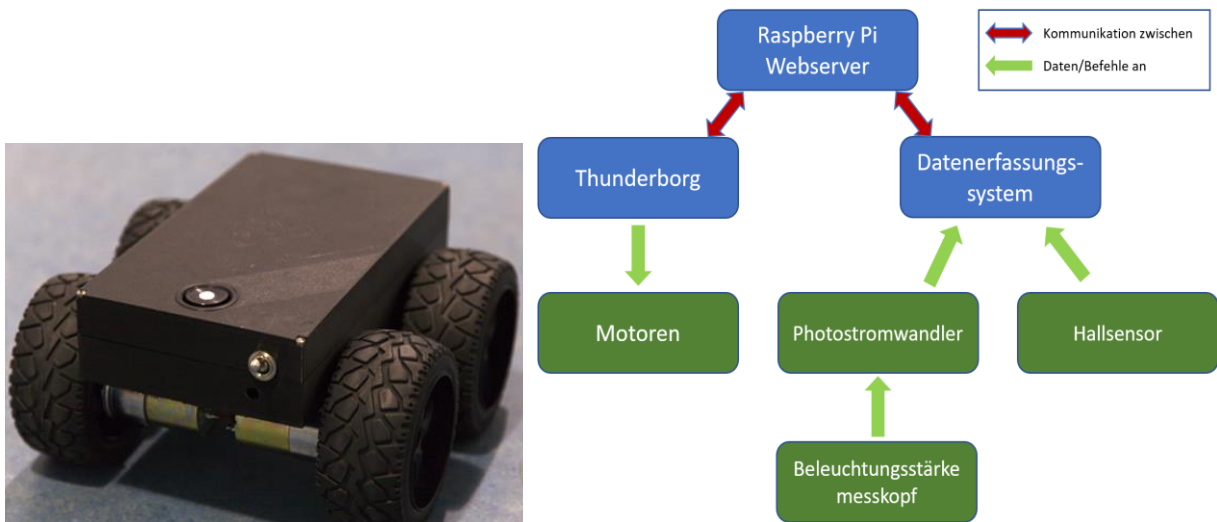


Abbildung 1: Elektrisches Beleuchtungsstärkemessfahrzeug

Abbildung 2: Zusammenspiel der Komponenten im Messfahrzeug

Auf den Sensor des Beleuchtungsstärkemesskopfes auftreffendes Licht resultiert in einem dazu proportionalem Photostrom. Dieser wird mit Hilfe des Photostromwandlers in eine Spannung umgewandelt, anschließend vom Datenerfassungssystem aufgenommen und in eine Beleuchtungsstärke umgerechnet. Zur Bestimmung der Beleuchtungsstärke werden über 40 ms mit der oben genannten Datenrate Beleuchtungsstärken ermittelt und der Durchschnitt berechnet. Die 40 ms entsprechen dabei der doppelten Periodendauer der Netzfrequenz (50 Hz). Der Messzeitpunkt wird durch einen Hallsensor am Gehäuse und einen Magneten am Rad ermittelt. In Abhängigkeit des Radumfang resultiert daraus ein Abstand zwischen den Messpunkten von ca. 33 cm. Die Messung hängt damit nicht von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs ab, und das Fahrzeug kann während der Messung gebremst und angehalten werden.

Zur Ermittlung der mittleren Beleuchtungsstärke der Fahrbahn wird das Messraster der DIN 13201-3 [6] in leicht angepasster Form verwendet. In Abbildung 3 ist ein typisches Messraster nach DIN 13201-3 (schwarze Kreuze) zu sehen. Ebenfalls abgebildet sind die Messrasterpunkte des neuen Verfahrens (kleine farbige Kreuze), welche eine deutlich höhere örtliche Auflösung liefern.

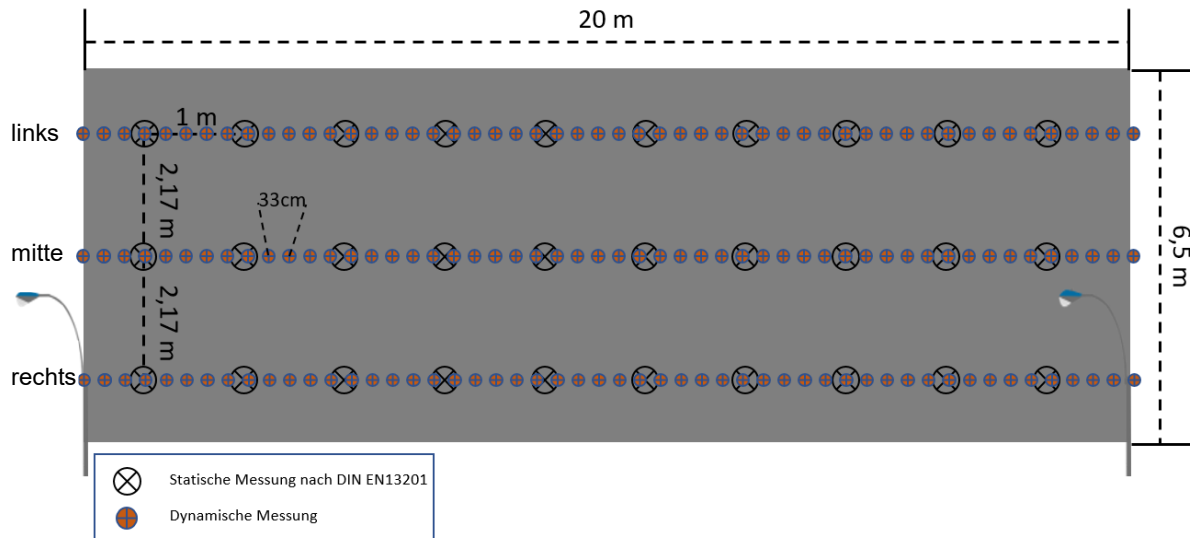


Abbildung 3: Messraster aus der DIN 13201-3 [6] und für dynamische Messung

Abbildung 4 zeigt die grafische Darstellung einer Beispielmessung am LED-Laufsteg (Berlin). Dabei werden die Beleuchtungsstärken in der mittleren Fahrbahnspur über die Entfernung zwischen zwei Masten (20 m) dargestellt. Zusammen mit den Beleuchtungsstärken der weiteren Spuren kann die mittlere sowie die minimale Beleuchtungsstärke ermittelt werden. Diese geben Aufschluss darüber, welche Mindestanforderungen der DIN 13201-2 eingehalten wurden.

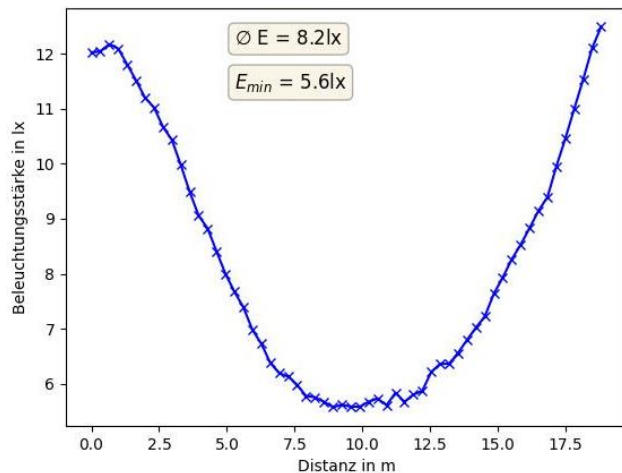


Abbildung 4: Beispielmessung am LED-Laufsteg (mittlere Fahrbahnspur)

4 Leuchtdichteabschätzung mittels Leuchtdichtenormal

Für eine näherungsweise Abschätzung der am Unfallort vorherrschenden Leuchtdichte wurde ein Leuchtdichtenormal entwickelt (Abbildung 5). Dieses zeigt an einem Diffusor eine homogene Leuchtdichte, welche mit der Leuchtdichte der umliegenden Fahrbahnoberfläche abgeglichen werden kann. Um den Einfluss fremder Lichtquellen auf die Leuchtdichte des Leuchtdichtenormal zu reduzieren, wird bei der Anwendung zusätzlich ein Trichter vor die Diffusorscheibe geschraubt.

In der oberen Abdeckung verbaut befindet sich die in Abbildung 5 (Mitte und rechts) dargestellte Platine. Diese wurde am Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin entwickelt und bestückt. Der auf der Platine installierte Microcontroller (ESP32) kann ebenfalls über den für das Messfahrzeug programmierten Webserver bedient werden, um so

die vier verbauten, weißen LEDs in sechs Stufen einzustellen. Diese Stufen wurden so gewählt und kalibriert, dass die resultierenden Leuchtdichten denen der M-Beleuchtungsklassen aus der DIN 13201-2 entsprechen.

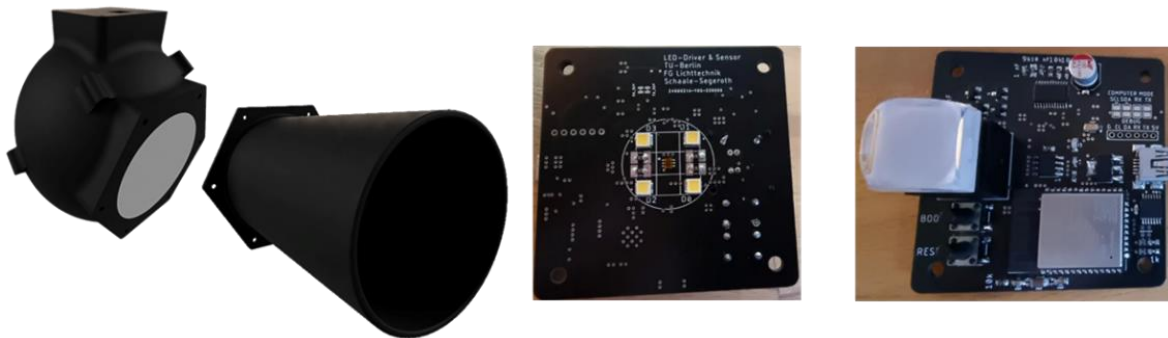


Abbildung 5: Leuchtdichtenormal mit Trichter (links), verbaute Platine (Mitte Unterseite, rechts Oberseite)

Im Anwendungsfall sollte das Leuchtdichtenormal in der Mitte der Fahrbahnspur zwischen den Masten platziert werden, sodass die Diffusorscheibe aus einer Entfernung von 40 m und einer Höhe von einem Meter gut zu erkennen ist. Zur Abschätzung der M-Beleuchtungsklasse sollten die Stufen nacheinander eingestellt werden und die Helligkeit der Diffusorscheibe jeweils mit der Helligkeit der umliegenden Fahrbahndeckschicht abgeglichen werden. Die Auswahl der Stufe mit der ähnlichsten Helligkeit kann danach auf dem Webserver gespeichert werden.

5 Messung mittels kalibrierter Digitalkamera

Um zu untersuchen, ob Leuchtdichten auch mittels einer Digitalkamera zuverlässig erhoben werden können, wurde eine Digitalkamera Canon EOS 5D Mark II (Abbildung 6) von der Firma Image Engineering kalibriert.

Teil der Kalibrierung waren die Ermittlung und der Ausgleich der Vignettierung, die Überprüfung der Linearität der RGB-Sensoren und deren spektrale Empfindlichkeit. Mit Hilfe der gemessenen spektralen Empfindlichkeiten der rot, grün und blau Sensoren wurde ermittelt, welche derer Linearkombinationen die geringste Abweichung zu der V-Lambdakurve aufweist. Dieser Zusammenhang ist in Formel 1 dargestellt.

$$L_k = x R + y G + z B$$

Formel 1 Kalibrierte Leuchtdichte



Abbildung 6: Canon EOS 5D Mark II

Für die Anwendung wird die Kamera ebenfalls in einer Entfernung von 40 m in einer Höhe von einem Meter platziert und ein Foto von der Fahrbahn geschossen. Um das Messfeld, wie in der Abbildung 7 markieren zu können, sollte dieses vorher visuell markiert werden. Die mitgelieferte Software ist in der Lage, aus dem markierten

Messfeld die minimale, maximale und mittlere Leuchtdichte zu berechnen; die für die Bestimmung der M-Beleuchtungsklassen notwendige Gesamtgleichmäßigkeit kann leider nicht durch die Software ermittelt werden.



Abbildung 7: Beispielmessung und -auswertung der Leuchtdichte mittels Digitalkamera

6 Evaluation

Die drei vorgestellten Messverfahren wurden alle unter Laborbedingungen kalibriert. Um ihre Einsetzbarkeit in der Praxis zu prüfen, wurden die Verfahren unter realen Bedingungen evaluiert. Die Ergebnisse werden im Folgendem dargelegt.

6.1 Evaluation des elektrischen Mini-Fahrzeugs

Zur Evaluation des elektrischen Mini-Fahrzeugs wurden am LED-Laufsteg drei nächtliche Beleuchtungsszenen eingestellt, welche den P-Beleuchtungsklassen P1, P3 und P6 möglichst nah kommen. Für jede der Szenen wurde die statische Messung (nach DIN 13201-3&4) und die dynamische Messung durchgeführt. Abbildung 8 zeigt den Beleuchtungsstärkeverlauf der unterschiedlichen Messspuren für die Beleuchtungsszene P1. Die höheren Beleuchtungsstärken im rechten Bereich des Messrasters weisen darauf hin, dass sich die Lichtpunkte am rechten Fahrbahnrand befinden müssen. Des Weiteren fällt auf, dass die Abweichungen zwischen dem statischen und dem dynamischen Messverfahren sehr gering sind. Tabelle 4 zeigt die Mindestanforderung nach DIN der drei P-Beleuchtungsklassen sowie die gemessenen, mittleren Beleuchtungsstärken der statischen und der dynamischen Messung. Zusätzlich wird die prozentuale Differenz zwischen den Verfahren gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Abweichung mit sinkendem Beleuchtungsniveau aufgrund der niedrigeren Werte leicht steigt. Da die Abweichung trotzdem für alle Beleuchtungsklassen unter zwei Prozent liegt, kann man von einem geeigneten vereinfachten Messverfahren sprechen.

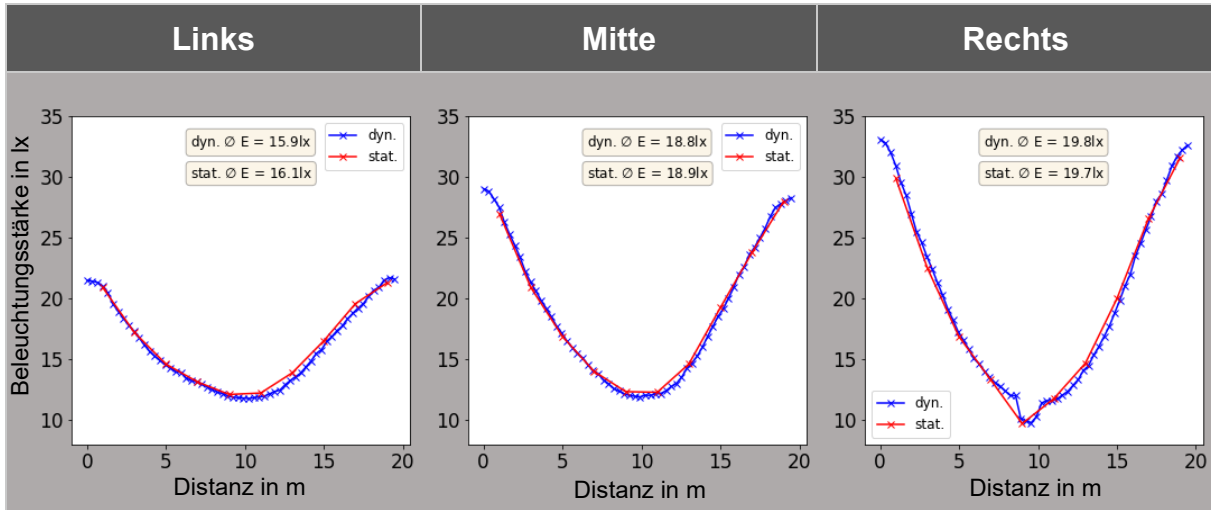


Abbildung 8: Validierung der dynamischen Beleuchtungsstärkemessung (P1-drei Spuren)

P-Klasse	Nach DIN	Statisch nach DIN	Dynamische Messung	
	\bar{E} in lx	\bar{E} in lx	\bar{E} in lx	Diff
P 1	15	18.3	18.2	-0.55%
P 3	7.5	6.77	6.65	-1.77%
P 6	2	3.21	3.15	-1.87%

Tabelle 4: Evaluationsergebnisse des Messfahrzeugs für drei Beleuchtungsklassen

6.2 Evaluation des Leuchtdichtenormals

Für das Leuchtdichtenormal wurde zunächst evaluiert, wie genau die in der Norm vorgegebenen Leuchtdichtewerte für das Normal eingestellt werden konnten. **Error! Reference source not found.** stellt die Ergebnisse der Messungen tabellarisch dar. Aus den Messwerten lässt sich eine Unsicherheit bei der Einstellung der Leuchtdichten von ca. 5-10% ablesen.

Fläche	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Messwert \bar{L} in cd/m^2	2.10	1.57	1.09	0.79	0.51	0.32
Nach DIN \bar{L} in cd/m^2	2	1.5	1	0.75	0.5	0.3

Tabelle 5: Evaluation der Einstellungen des Leuchtdichtenormals

Mittels eines Probandenversuchs wurde anschließend überprüft, wie gut eine visuelle Abschätzung der Helligkeit mit Hilfe des Leuchtdichtenormals gelingt. **Error! Reference source not found.** gibt einen Eindruck der zu erfüllenden Beurteilungsaufgabe und **Error! Reference source not found.** zeigt die Einschätzungsergebnisse für eine eingestellte Beleuchtungsklasse M6 von insgesamt 9 Probanden. Es fällt auf, dass in 6 Fällen die Leuchtdichte um eine Klasse zu hoch eingeschätzt wurde. Zwei weitere Teilnehmende schätzten die Klasse auf M4 und M3. Nur eine Person schätzte die Helligkeit richtig ein. In zwei Fällen lag die Unsicherheit

also über 100 %. Ein Grund für die hohen Unsicherheiten beim Einsatz des Leuchtdichtenormals könnte sein, dass der Farbtort der zu beurteilenden Fläche zu sehr von dem des Normals abwich. Weiterhin könnten zu große Ungleichmäßigkeiten, die unterschiedliche Größe der zu vergleichenden Flächen oder der schwarze Rahmen um das Normal eine Beurteilung erschweren.

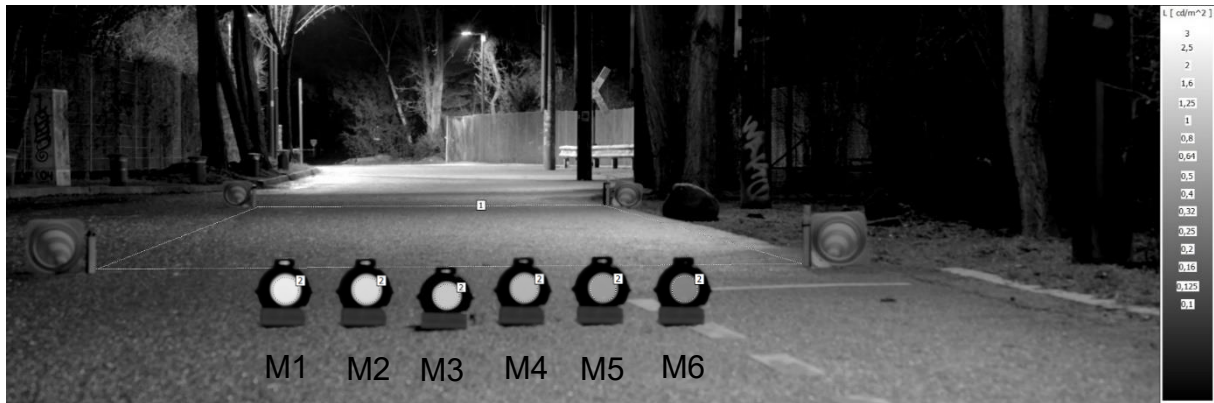


Abbildung 10: Beurteilungsaufgabe mit Hilfe des Leuchtdichtenormals

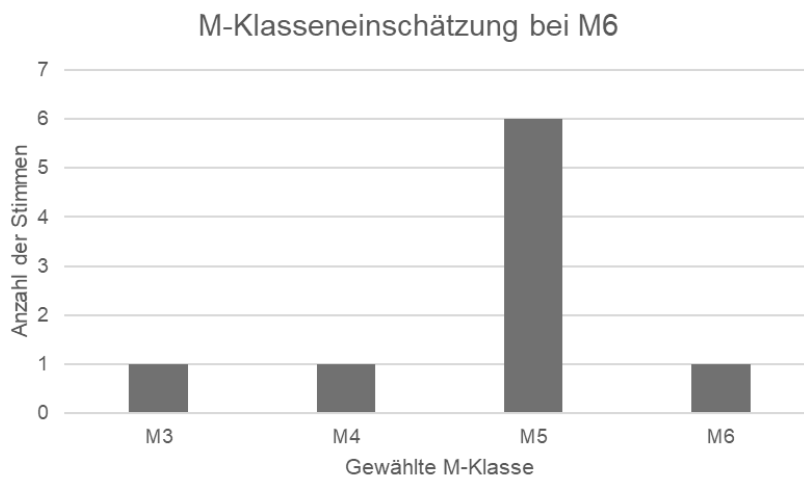


Abbildung 9: Ergebnisse der visuellen Helligkeitsbeurteilung mittels Leuchtdichtenormal

6.3 Evaluation der kalibrierten Digitalkamera

Wie bei der Evaluation des Mini-Fahrzeugs wurden am LED-Laufsteg (Berlin) drei unterschiedliche Beleuchtungsklassen eingestellt, und zwar die für Leuchtdichte ausgelegten Klassen M1, M3 und M6. Als Referenzmessgeräte wurde die LMK6 der Firma TechnoTeam verwendet. Verglichen wurden die mittlere Leuchtdichte des Messfeldes sowie die Gesamtgleichmäßigkeit. Zu beachten ist hierbei, dass die Vergleichsmessungen bei feuchter Fahrbahn durchgeführt wurden. Es ist zu erkennen, dass die Messunsicherheiten bei diesem Verfahren höher als bei dem vorherigen Verfahren sind.

Mit Messunsicherheiten von ca. 10-15% bei den Leuchtdichtewerten ist dieses Verfahren dennoch für eine erste Einschätzung der Beleuchtungsklasse geeignet. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist die hohe Unsicherheit bei der Messung der Gesamtgleichmäßigkeit. Diese resultiert aus der Berechnungsart, da das Messfeld hier nicht in Messrasterpunkte, bestehend aus mehreren Pixeln, unterteilt wird, sondern für die Berechnung der Wert jedes Pixels einzeln betrachtet wird. Da für die Gesamtgleichmäßigkeit der Quotient aus minimaler und mittlerer Leuchtdichte berechnet wird, kann es auf Grund der schlechten Aussteuerung einiger weniger Pixel zu großen Abweichungen kommen.

M-Klasse	Nach DIN		LMK6		Kalibrierte Canon			
	\bar{L} in cd/m^2	U_{ow}	\bar{L} in cd/m^2	U_{ow}	\bar{L} in cd/m^2	\bar{L} Diff	U_{ow}	U_{ow} Diff
M 1	2	0.15	2.02	0.29	1.79	-11.4%	0.17	-58.6%
M 3	1	0.15	0.97	0.31	0.82	-15.5%	0.18	-58.1%
M 6	0.3	0.15	0.32	0.36	0.27	-15.6%	0.15	-58.3%

Tabelle 6: Evaluationsergebnisse der Digitalkamera für drei Beleuchtungsklassen

7 Fazit

Ziel des Projektes war es, eine direkte, routinemäßige Überprüfung der Beleuchtungssituation an nächtlichen Unfallorten zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden drei vereinfachte Messverfahren entwickelt. Die verwendeten Messgeräte wurden kalibriert und eine Evaluation der Verfahren durchgeführt.

Dabei erzielte das elektrische Mini-Fahrzeug zur Beleuchtungsstärkemessung die besten Ergebnisse und kann daher als Ersatz für herkömmliche Messverfahren empfohlen werden. Die kalibrierte Digitalkamera erreichte akzeptable Unsicherheiten und kann für eine erste Einschätzung zur Einhaltung der Beleuchtungsklasse verwendet werden. Das entwickelte Leuchtdichtenormal schnitt in Bezug auf die Messunsicherheiten am schlechtesten ab. Weitere Verbesserungen wie das dynamische Anpassen des Farbortes des Leuchtdichtenormals an den Fahrbahnfarbort, könnten hier in einer erheblichen Verbesserung resultieren.

Für die Beantwortung der Frage, ob die normativen Anforderungen bei Dunkelheitsunfällen an den Unfallorten eingehalten werden, ist es zum einen entscheidend, wie die Zuordnung der mit den Verfahren erhobenen Werte zu den Beleuchtungsklassen erfolgt. Erfolgt eine direkte Zuordnung ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten, würde beispielsweise eine gemessene mittlere Beleuchtungsstärke von 9,5 lx einer Klasse P3 entsprechen, obwohl der Wert wesentlich näher an den Anforderungen einer P2-Klasse liegt. Zum anderen muss bekannt sein, welche Beleuchtungsklasse am jeweiligen Unfallort eigentlich gefordert ist.

Anpassungen zur Zuordnung der Beleuchtungsklassen sowie ergänzende Abfragen zur eigenen Ermittlung der Beleuchtungsklasse könnten in einem nächsten Schritt in der Webapplikation vorgenommen werden.

Zusammengefasst bietet die vereinfachte Messung mittels Mini-Fahrzeug und kalibrierter Digitalkamera Vorteile für folgende mögliche Anwendungsfälle und Nutzer:

→ **Unfallanalyse und -forschung**

- GIDAS (German In-Depth Accident Study)
- Verkehrsermittlungsdienste der Polizei
- Unfallkommissionen der Kommunen
- Unfallforscher der Versicherer
- Kriminaltechnik
- Dekra

→ **Beleuchtungsplanung und -überprüfung**

- Kommunen
- Leuchtenhersteller

8 References

[1] „Road Lighting as an Accident Countermeasure,“ CIE, Publication no. 93, ISBN: 978-3-900734-30-5, 1992.

[2] S. Maus, „Ganzheitliche Bewertung öffentlicher Straßenbeleuchtungen mittels lichttechnischer Messungen und Kosten-Nutzen-Analysen,“ TU Berlin, Masterarbeit, 2015.

[3] H. Kopp, „Fotometrische Analyse von Radfahr- und Fußgängerunfallschwerpunkten,“ TU Berlin, Bachelorarbeit, 2020.

[4] „Straßenbeleuchtung - Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen,“ DIN 13201-1, Berlin, 2021.

[5] „Straßenbeleuchtung - Teil 2: Gütemerkmale,“ DIN 13201-2, Berlin, 2016.

[6] „Straßenbeleuchtung - Teil 3: Berechnung der Gütemerkmale,“ DIN EN 13201-3, Berlin, 2016.

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter 82.0791/2021 durchgeführten Forschungsarbeit im Rahmen des Forschungsprogramms Straßenverkehrssicherheit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

Intelligent Lighting System with the Ability to Control the Color Temperature and Light Flow of the Illuminators

Mag. Eng. Cvetomir Lukanov;

Assoc. Prof. Orlin Lyubomirov Petrov, PhD

University of Ruse; Ruse; BULGARIA

E-mail: opetrov@uni-ruse.bg

Abstract

Modern lighting products allow the creation of intelligent control systems with the ability to adjust many parameters of lighting devices (for example, luminous flux, color temperature, light color, etc.). The presence on the market of relatively cheap lighting sensors (for illuminance, for color temperature, for light color, for movement, etc.) allows the monitoring of many parameters of the environment and, accordingly, more precise regulation of various parameters.

The report presents a concept for the realization of an intelligent lighting system, which, depending on the external conditions of the environment, can regulate the parameters of an internal lighting system. Regulation is carried out according to external illumination, external color temperature, presence in the room, set algorithm of work, etc. Modern LED light sources with a variable color temperature and the possibility of dimming are planned to be used in the implementation of the system.

A structural diagram of such a system, the element base and the control algorithm is presented.

Index Terms: Intelligent lighting system, LED color temperature

1 Introduction

The modern level of technology makes it possible to create lighting systems with the most diverse functions and capabilities. Systems are available on the market with the ability to adjust the light flow, the color of the emitted light, etc.). A rich element base is also available: various types of lighting fixtures and light modules; sensors for various lighting parameters (illuminance, brightness, color temperature); sensors for various other parameters related to lighting control (presence of movement, presence, etc.); control controllers; different management interfaces and many more.



All this helps in the construction of intelligent lighting systems, allowing lighting control to be used both to reduce the consumption of electrical energy and to provide a more comfortable lighting environment.

The purpose of the report is to present a concept for the creation of an intelligent lighting system with the ability to adjust the light flow and the color temperature of the illuminators.

2 Concept

The main idea of the proposed system consists of the following:

- ✓ Capabilities to be provided by the system:
 - adjustment of the light flow, depending on the external natural lighting and the internal operational lighting;
 - adjustment of the color temperature of the illuminators, depending on the color temperature of the external illumination;
 - manual control if necessary;
 - operation of the lighting system only in the presence of people in the room;
 - remote control of the device;
 - complete integration with the general BMS system of the building;
- ✓ An element base that can be used to realize the concept:
 - LED illuminators or LED modules with the ability to adjust the color temperature, using suitable drivers and a DALI control system;
 - Sensors for internal illuminance measurement, working according to the DALI standard;
 - Sensors for external illuminance measurement, working according to the DALI standard;
 - Sensors for measuring color temperature, working according to the DALI standard;
 - Presence sensors working according to the DALI standard;
 - Elements for manual control - keys and buttons;
 - Suitable DALI controllers to control the system.

3 Implementation of the system

In fig. 1 are shown an exemplary implementation of an intelligent lighting system for a specific room. A specific room was chosen for the purposes of the experimental research - a classroom on the university's territory.

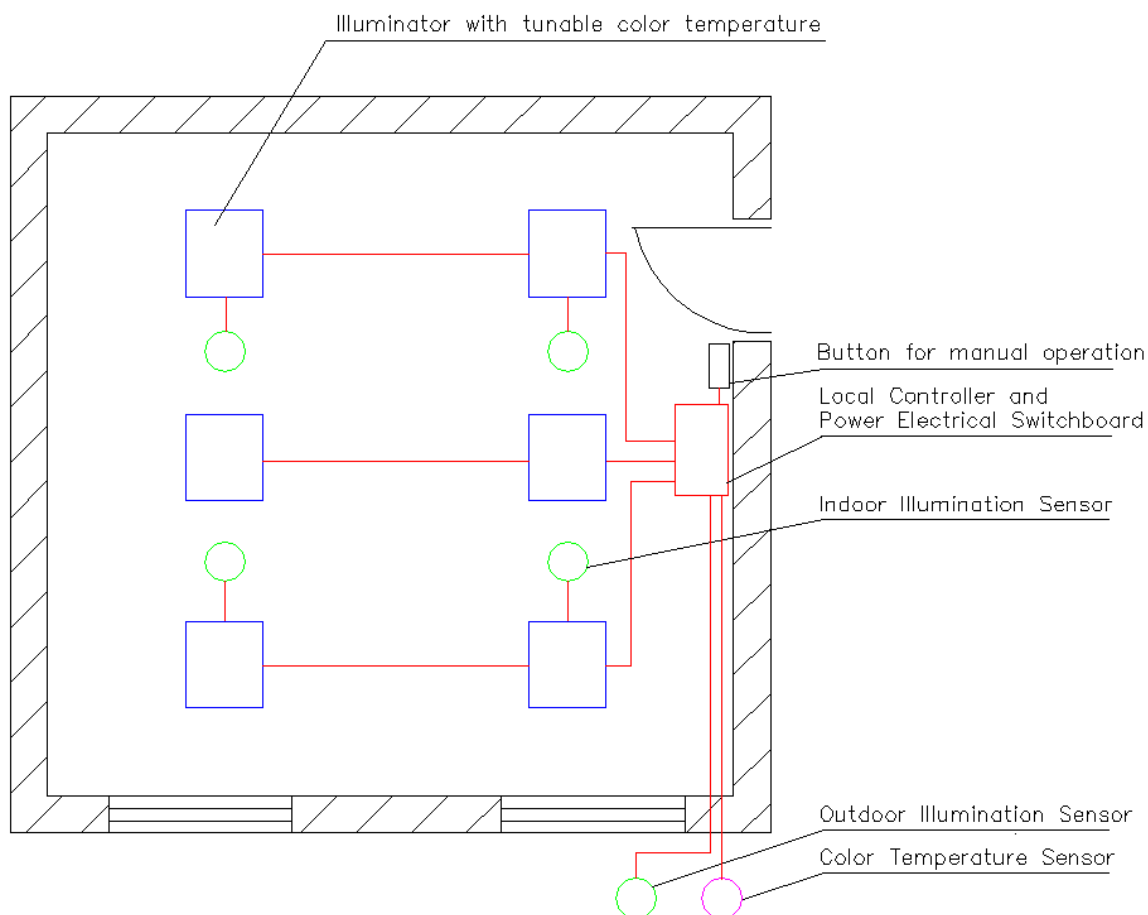


Figure 1. An exemplary implementation of an intelligent lighting system

The existing luminaires with fluorescent lamps are modified and reworked with LED modules with the ability to adjust the light flux and color temperature (Fig. 2). A driver has been added to each illuminator with the ability to adjust the light flux and color temperature of the selected modules. The driver is controlled according to the DALI standard (Fig. 3). To limit glare from the LED modules, specialized diffusers are used, suitably fixed above the LED modules. In fig. 4 are shown pictures of a reconstructed illuminator.

At the moment, the system is partially implemented. The six illuminators were modified, a communication link between the illuminators and the control panel was provided. A control module with Bluetooth communication is connected, which allows control of the lighting drivers using a smartphone or manually.

Upgrading the system with the addition of illuminance sensors and a color temperature sensor is forthcoming. The completion of the system will be the addition of a local controller that will be programmed depending on the monitored parameters (illuminance and color temperature) to manage the LED lights in an appropriate way.



Figure 2. LED module PrevaLED by Osram, with the ability to adjust the color temperature



Figure 3. LED driver Osram Optotronic Intelligent Tunable, with the ability to adjust the color temperature, via DALI interface



Figure 4. Pictures of a modified illuminator

It is also envisaged that the system can be programmed to work as a biodynamic lighting system.

Upon completion of the system, studies of the lighting environment will be conducted using visual tests and survey questionnaires.

4 Conclusion

The presented intelligent lighting system provides opportunities for great flexibility in lighting management. The idea of controlling the light flow is not new, but the addition of the regulation of the color temperature allows for a more precise dosing of the light. The implementation of such a system will lead both to an economy of electrical energy and to the achievement of the so-called circadian lighting (one that is aimed at providing visual and emotional comfort to people).

The system has been partially implemented so far, allowing remote and local control. The addition of a suitable controller to ensure automatic lighting control is pending.

5 References

- [1] G. Florian, M. Valérie, M. Gautier, V. Paul and T. Patrick, "Design of an adaptive lighting system able to consider the evolution of pavement reflection properties according to their moisture state," 2021 Joint Conference - 11th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting & 17th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (EEDAL/LS:17), Toulouse, France, 2022, pp. 1-6.
- [2] Y. Tang and X. Chen, "Research on Control Metherm of Adaptive Lighting system in Intelligent Building," 2019 IEEE 16th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), Banff, AB, Canada, 2019, pp. 415-419, doi: 10.1109/ICNSC.2019.8743279.
- [3] H. Liao, X. Sheng and D. Yang, "Design of adaptive lighting system based on fuzzy PID," 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Shenyang, China, 2018, pp. 1543-1547, doi: 10.1109/CCDC.2018.8407372.
- [4] M. Lesko, H. Wachta, K. Baran and A. Rozowicz, "A Concept of an Adaptive Luminaire with Variable Luminous Intensity Distribution," 2018 VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Trebic, Czech Republic, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/LUMENV.2018.8520989.
- [5] X. He, C. Huang, Y. Li, H. Wang, D. Lei and M. Yao, "An Adaptive Dimming System of High-Power LED Based on Fuzzy PID Control Algorithm for Machine Vision Lighting," 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chongqing, China, 2020, pp. 2198-2202, doi: 10.1109/ITNEC48623.2020.9084741.

- [6] M. Mokran and L. Lipnicky, "Photometric Parameters of LED Luminaires with Switchable Correlated Colour Temperature," 2018 VII. Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4), Trebic, Czech Republic, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/LUMENV.2018.8521078.
- [7] X. Ziren and L. Hao, "Application of color temperature tunable LEDs in smart lighting system," 2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology, Chengdu, China, 2014, pp. 1423-1426, doi: 10.1109/ICEPT.2014.6922922.
- [8] Guangxing Zhao, Guangyi Zhao and Yuan Zhao, "Design of color temperature measurement device based on TCS230," IET International Conference on Wireless Sensor Network 2010 (IET-WSN 2010), Beijing, 2010, pp. 95-97, doi: 10.1049/cp.2010.1035.
- [9] D. Pavlov, I. Petrinska, D. Ivanov and K. Nikolova, "Energy efficient lighting solutions for educational buildings and classrooms," 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BuIEF), Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/BuIEF48056.2019.9030778.
- [10] V. Georgiev, D. Ivanov and I. Petrinska, "Automated system for measurement of natural lighting and utilization of the results for lighting control," 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/SIELA.2018.8447106.

Capacitive silicon MEMS based combined accelerometer and gyroscope sensors in headlight levelling systems

Niilo Malinen, Tommi Vilenius, Jussi Collin, Jari Nieminen

Murata Electronics Oy, Finland

Nordic Inertial Oy, Finland

niilo.malinen@murata.com

Abstract

When driving in conditions with suboptimal lighting, the use of headlights is essential for safe travel. However, headlights pose a fundamental safety conflict as with increasing headlight intensity, visibility is improved, but this simultaneously increases the glaring effect on pedestrians and oncoming traffic, reducing overall safety. To address this issue, the UN has launched a regulation binding all original equipment manufacturers, or OEMs, of the concurring regions to implement automatic head light levelling systems that aim to keep the headlight alignment optimal. The regulation will apply to all new type approvals starting from September 2026 and all vehicles starting from September 2029. Since in most cases OEMs are offering a great variety of different automobiles, this regulation is putting high pressure to find a general cost-effective solution that works for every model and configuration.

When switching from manual headlight alignment to automatic, the system needs to consider how load from passengers and luggage is tilting the vehicle and what is the vehicle pose in respect to the road angle. In static situations, this can be handled with a 3-axis accelerometer sensor in combination with an extended Kalman filter. When adjustment in dynamic situations is required, the complexity of algorithms between sensor data and actuators controlling the headlight alignment becomes significantly higher. The system needs to now take into account accelerations, braking, driving in bends and vibration effects. To improve interpretation of these dynamic situations, a 3-axis gyroscope must be implemented to the system as well. Additionally, in dynamic situations, a fast response time is crucial and when considering the relatively small angles of adjustments needed, effects of lifetime degradation start to play a role in accuracy. This means that high reliability and performance of the measurement capability is needed for the whole system to retain its accuracy.

Development in the MEMS field has enabled manufacturing of low cost, but extremely accurate, stable and reliable accelerometers and gyroscopes,



which makes them a good candidate to address the aforementioned problems. This paper is reviewing an automatic headlight levelling solution utilizing a combined accelerometer and gyroscope sensor, which is based on capacitive silicon MEMS technology.

Index Terms: Headlight levelling, MEMS Sensor

Abbreviations

MEMS	Micro-Electro Mechanical System
OEM	Original Equipment Manufacturer
UN	United Nations

1 Introduction

Higher intensity lightning provides better visibility, but when it comes to automotive headlights, this creates a safety conflict, as pedestrians and on-coming traffic are easily blinded by the headlight beams, which in turn poses a safety hazard. This has been the key problem the development in this field has revolved around in recent history and has also led to the launch of a UN induced headlight levelling regulation change. This article provides an overview of said regulation change, basic problems related to headlight levelling and a cost-effective MEMS sensor-based solution.

2 Effect of headlight levelling regulation change

The fundamental safety conflict has also been recognized by the United Nations UN Regulation No. 48 (Installation of Lighting and Light-Signaling Devices). New regulation is being prepared towards safer automotive lighting. The regulation will bind OEMs of the concurring regions to implement automatic head light levelling systems to all new vehicles. The requirement will be enforced in most of the major countries and will apply to all ordinary vehicles and light commercial vehicles. Current latest schedule applies for new type approvals starting from September 2026 and all vehicles from September 2029. [1]. In Europe alone close to 18 million new cars are expected to be produced in the year 2026 [2], divided to a vast variety of different models and since the regulation applies to them all, there is risk that development and implementation costs will become significant. To tackle this, OEMs need to find a general approach covering different models and their different configurations, like wheel sizes and headlight types.

3 MEMS based sensors

Microelectromechanical System, or MEMS based sensors are common in automotive use. Pressure sensors, microphones and airbag crash sensors are all manufactured with processes similar to semiconductor manufacturing. This article is focusing on inertial sensors, and specifically acceleration sensors, or accelerometers and angular velocity sensors, commonly known as gyroscopes. MEMS sensors are widely used in consumer electronics like smart phones due to their small size, low power consumption and high accuracy. The possibility to produce in high volume allows also for low unit prices. The use in the automotive industry sets many additional requirements related to e.g. reliability and functional safety, preventing the use of consumer grade products and designs and adds cost to the sensors.

Acceleration sensors, as the name suggests, are used to measure the change of velocity or static pose. Accelerometers measuring angles in static conditions are called inclinometers. Typical structures used in automotive are based on capacitive sensing principle, effectively measuring the distance of two conductive structures. The benefit of this measurement principle is that it can be used to measure true static acceleration, earth gravity. Figure 1 represents a cross-section view of a simple single-mass 1-axis accelerometer. The mass is connected with a silicon spring structure. Acceleration induces vertical movement to the mass, which changes capacitances C_1 and C_2 . This change is differentially detected by the application specific integrated circuit and converted to a voltage, proportional to the applied acceleration.

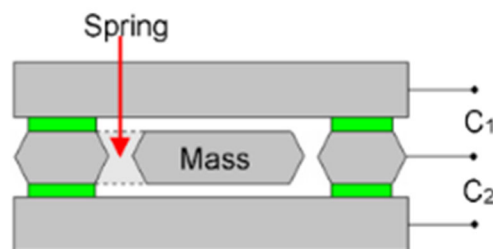


Figure 1 Example cross-section of a single mass accelerometer [3]

In the automotive field, MEMS based accelerometers, have a wide range of applications, including airbag deployment, vehicle stability control, transmission control and headlight levelling. The use as an IMU plays also a key role in autonomous driving applications. This article will focus on the headlight levelling application.

Gyroscopes are measuring rotational motion. As with the accelerometers, typically their measurement principle relies also on detecting change in capacitance. Unlike the accelerometers, in which the change in capacitance is caused by moving masses, the sensing structure of gyroscopes used in the automotive industry usually are of force feedback type. This means that they comprise of vibrating masses held in place by electrostatic forces. The angular rotation experienced by the gyroscope induces Coriolis forces on the gyroscope masses, which act to displace them from null position. Capacitive structures are used to detect this displacement and a voltage adjusted force is applied to compensate this movement and hold the gyroscope masses in place. The adjustment voltage can then be transformed into accurate angular rate information. The measurement unit is usually Degrees per Second.

The moving structure of a single axis force feedback gyroscope is presented in Figure 2. In this example structure, the angular velocity to be measured is around the Z-axis. The rotation movement around Z-axis causes change of capacitance in the detection electrode system on Y-axis. The driving electrodes on X-axis induce vibration to the proof mass by voltage applied electrostatic force. This force is then used for movement compensation.

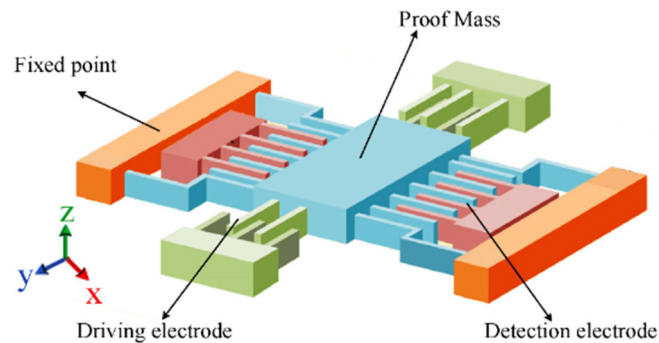


Figure 2 Moving structure of a single axis force feedback MEMS gyroscope [4]

As gyroscopes can measure yaw, pitch and roll, they are key components in any automotive application requiring dynamic sensing, especially when combined with an accelerometer. They are vital for detecting vehicle orientation, which is the prerequisite for e.g. navigation, dead reckoning, alignment of perception sensors and numerous safety applications e.g. assisting stability control by detecting skidding. They are also the enablers for dynamic headlight adjustment.

4 Overview of headlight systems

Headlight systems can be divided into three different categories. These categories are manual, static and dynamic systems. The following sections will look at these different types in respect to requirements and algorithm complexity.

4.1 Manual headlight alignment systems

In manual systems, the optical axis is adjusted by the driver through an electrical control panel, which controls the actuators in the headlight leveling system. The system does not require algorithms or input from other vehicle systems, which makes it simple and cost effective, but does not comply with the forthcoming UN safety regulations. Further review of manual alignment is out of the scope of this article as this is a yielding application and is unrelated to MEMS sensors.

4.2 Static automatic headlight alignment systems

The static alignment systems are the first step of automatic alignment. The systems can correct the optical axis of the headlights based on shifted vehicle pose from passengers and other loads affecting the vehicle, while it is stationary. Traditionally static systems are based on suspension height sensors. These consist of a reference height sensor and primary measurement sensors, which are located close to the suspension and are connected to each other by wires. An alternative way is to use 3-axis MEMS accelerometer sensors instead. The accelerometer sensor measures how gravity is distributed among the X-, Y- and Z-axis of the sensor and this data can be used to calculate the vehicle tilt.

The basic vehicle tilt calculation using accelerometers is very simple. However, accelerometers are affected identically by road angle, static load and acceleration or

deceleration of the vehicle, which means that using only accelerometers, it is extremely difficult to determine if the vehicle is on a flat section of the road or pointing up- or downhill. That is why input from other vehicle systems, like wheel speed sensors, is needed for the system to distinguish when it is allowed to adjust itself based on sensor data [5]. This also contributes significantly to the complexity of the alignment. To optimize the input from several sensor sources, usually the use of a Kalman filter algorithm is required. Kalman filtering solves complex statistical optimization problems in efficient way. F. Gustafsson provides a good general explanation for Kalman filtering [6]. The drawback of Kalman filtering is that it needs a linearization point, in other words, utilization of a very high-performance sensor.

4.3 Dynamic headlight alignment systems

The effectiveness of the static systems has its clear limits, as the road angle and vehicle speed are constantly changing while driving. Without the system's ability to adjust to e.g. bends, hills and accelerations, light beam heading will differ from optimal and reduce safety by causing glare. It must be noted, that during acceleration or deceleration, the vehicle does not only pitch, but also rotates around the center of gravity. To observe all the relevant dynamics, a six-degree-of freedom inertial unit is required; dynamic alignment systems should be equipped also with a gyroscope able to measure the change in yaw, pitch and roll.

5 MEMS Sensors in head light levelling

As mentioned previously, height sensors have been traditionally used in the static alignment systems, but they have clear disadvantages in comparison to the MEMS sensor-based solutions. MEMS accelerometers use gravity as the reference point and can measure in all three axes, which allows the sensor to be a standalone system and be placed much more freely on the vehicle. Placement can be determined for example to optimize measurement conditions, which is the opposite with height sensors, as the location is tied to be close to the suspension. Since height sensors are connected by wiring, it adds size, which poses even more restrictions for its use as a general solution to cover various vehicle models within the OEM lineup. These are factors that lead to vastly increased cost.

The accuracy requirement for headlight alignment derives from the headlight regulation. Based on what height the headlights are mounted to, the regulation defines a certain percentage-based angle limit, within the headlight alignment must stay from initial downward position under all static conditions. This is shown in Figure 3 [1]

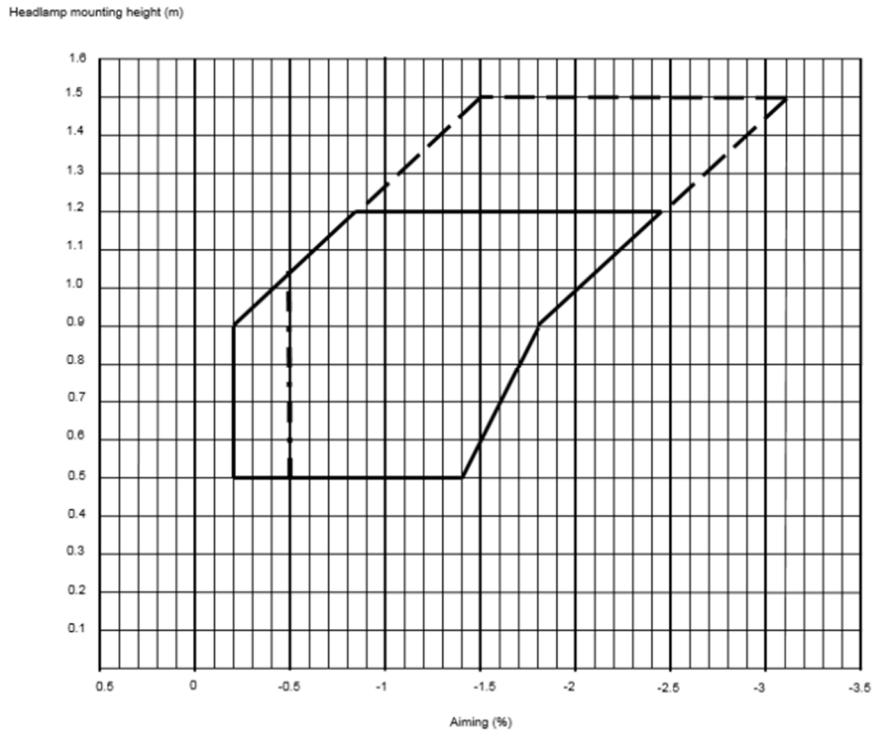


Figure 3 Headlight aiming angle range in percent in comparison to headlamp mounting height [1]

The measurement setting for the percentages is defined in law by the European commission and is derived from Figure 4 [7].

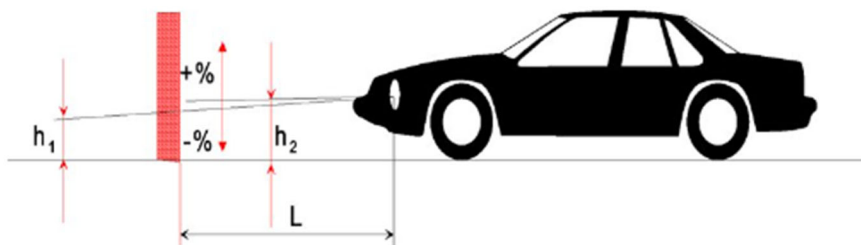


Figure 4 Dipped-beam inclination [7]

If we assume a headlamp height of 0.7m, the above graph shows that aiming angle must stay within -0.2% and -1.6%. This means that aiming accuracy must be 1.4%. In the regulation it has been defined that 1% corresponds to 10mrad. This means that the previously calculated 1.4% sets accuracy requirements of 14mrad, or around 0.8°. If we further assume the very simplified static system below in Figure 5, where the accelerometer sensing axis X is perpendicular to the gravity vector, the gravitational acceleration corresponding tilt angle is given by equation 1

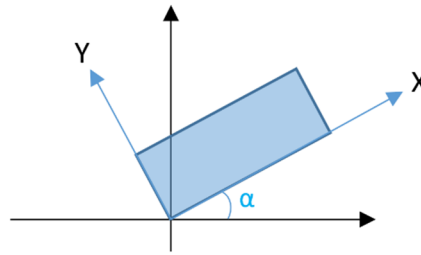


Figure 5 Simple coordinate system for MEMS accelerometer inclination

$$a = \sin \alpha \times g, \quad (1)$$

Where a , is the acceleration corresponding to measurement angle α , input in degrees, and g is the gravitational constant in g-unit.

When applying 0.8° to equation 1, we see that the accelerometer must be able to maintain a range corresponding to below $0.014g$ or 14 milli-g sensor reading. As the reading can shift to both positive and negative direction, this eventually means that the maximum tolerable error is $\pm 7mg$. In this small scale, factors like noise and sensitivity play a key role in determining alignment accuracy. These are factors that must be taken into account when using MEMS sensors and they set tight requirement for sensor performance. Further, to ensure compliance to the law, guardband against the requirement must be set and eventually, the accuracy requirements for the MEMS sensor must be defined by the OEM.

The issues mentioned above disturb the measurement already in static conditions, but become immensely more distractive in dynamic conditions. As the vehicle is now moving and the surrounding is changing in a short time scale, factors like temperature stability become important, as sensor output may be affected by ambient temperature changes caused by weather changes or for example driving into a garage. Bad road conditions or gravel chipping induce vibration, which poses a risk of signal saturation if the vibration robustness of the sensor is not on adequate level. Drift over lifetime must be considered as well for the algorithm to maintain consistent and safe headlight alignment throughout vehicle lifetime.

On top of accuracy and robustness, timing becomes very important in dynamic applications. A system that is constantly behind the real-world situation in adjustment, might even perform worse than static headlights. Since the bottleneck of the alignment is usually the mechanical actuators, the electronic control unit sending adjustment commands to them must have the information available with as low delay as possible. Kosman et al. proposes, that a near-satisfactory glare level requires a system latency time of less than $220ms$ or, $350ms$ to achieve a barely acceptable glare level [8]. Processing the sensor data through the complex alignment algorithms does require some calculation power, which must be considered in system design.

6 Algorithm

The inputs considered for headlight levelling algorithms in this context typically are inertial sensors and odometer. In addition, GPS, map-database, optical, and acoustic level sensors have been considered by Nilsson [9], who also provides the related mathematical calculations.

The task of filtering algorithm is to extract road grade from gravity and acceleration. Using six-degree-of-freedom sensor set, the equation 2 is extended to accelerometer triad measurement, providing a measurement of specific force:

$$\bar{a}_{SF}^B = \frac{d}{dt} \bar{v}^B - \bar{g}^B + \bar{\varepsilon} \quad (2)$$

The gyroscope triad measurement provides information on body-fixed frame rotation, which refers to the frame where inertial sensors are fixed to. This is done via

$$\frac{d}{dt} \mathbf{C}_B^I = \mathbf{C}_B^I \boldsymbol{\Omega}_{IB}^B \quad (3)$$

, where the actual gyro measurements are $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ in

$$\boldsymbol{\Omega}_{IB}^B = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_y + \varepsilon_y & \omega_z + \varepsilon_z \\ \omega_y + \varepsilon_y & 0 & -\omega_x + \varepsilon_x \\ -\omega_z + \varepsilon_z & \omega_x + \varepsilon_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

These fundamental equations contain only reference frames B (body-fixed frame) and I (inertial frame). The link to the present application is via \bar{g}^B term and $\frac{d}{dt} \bar{v}^B$ term: gravity has known direction in locally level frame and vehicle motion is constrained by the road, giving information on $\frac{d}{dt} \bar{v}^B$. Obviously, the noise terms ε masks the relevant signal. An efficient way to estimate such ‘inaccessible’ information buried in stochastic dynamic systems is, as mentioned before, a Kalman filter. It should be noted that inertial sensor filtering techniques are in common use in aerospace applications. New applications to these techniques emerge as MEMS technology develops at fast pace.

The common requirement for accurate estimation algorithms is that the errors in sensor signals must be stochastically predictable. Discontinuous signals may cause filtering algorithm divergence, and this is not permitted when considering the safety aspect of this application.

Accelerometers in headlight levelling systems were considered by Nilsson [8], but the conclusion was that the sensors available at the time of study do not perform on required level as the noise characteristics of the measurement prevented long term estimation of pitch angle. Essentially this means, that the signal was not continuous enough for the filtering algorithm to work as intended. Nowadays there are already MEMS sensors available, that can fulfil the tight accuracy criteria mentioned in the previous chapter and provide sufficiently low-noise and continuous signal to enable functioning filtering algorithms [10].

Commonly known integrity monitoring algorithms should be also involved – modern cars can provide redundant information for this purpose. The same sensors and algorithms can be also used for perception sensor and camera alignment. These applications are becoming critical for the advanced driver assistant systems.

7 Conclusion & Summary

The headlight levelling applications set high performance and robustness requirements for MEMS accelerometer and gyroscope sensors. The dynamic alignment application requires very low noise sensors, which are stable in changing temperature and vibrating environments and keep their capability to provide accurate measurements over the vehicle lifetime. The alignment process involves challenging estimation tasks, and efficient data processing techniques are required to obtain a low latency solution. As the performance requirements are tight from every aspect, this application is a good showcase for modern high-accuracy MEMS technologies and paves the road for also other new automotive applications within the vehicle.

8 References

- [1] Economic Commission for Europe, "Revised proposal for a new [09] series of amendments to UN," Economic and Social Council, Geneva, 2023.
- [2] I. Markit, "New Vehicle Sales Forecast," IHS Markit, 2023.
- [3] J. Y. G. X. B. W. M. Q. X. W. X. L. a. B. T. Wei Xu, "Design and Fabrication of a Slanted-Beam MEMS Accelerometer," *Micromachines*, vol. 8, no. 3, 2017.
- [4] W. C. L. Y. a. Q. F. Huan Zhang, "An Interface ASIC Design of MEMS Gyroscope with Analog Closed Loop Driving," *Sensors*, vol. 23, no. 5, 2023.
- [5] AG, Volkswagen, "automotive-lightning.html," 03 03 2023. [Online]. Available: www.volkswagen.co.uk/en/technology/comfort/automotive-lightning.html.
- [6] F. Gustafsson, *Statistical sensor fusion*, Lund, 2012.
- [7] UN/ECE, "Regulation No 48 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices [2019/57]," *Official Journal of the European Union*, vol. 48, no. 57, 2019.
- [8] K. K. M. S. D.-I. J. K. Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh, "Requirements for dynamic levelling devices to prevent headlamp glare blinding oncoming road users," GRE Chair, 2019.

- [9] P. Nilsson, Automatic headlight levelling using inertial sensors, Master of Science Thesis in Automatic Control, 2016.
- [10] Murata Electronics, "SCL3400-D01 Data Sheet," 2022. [Online]. Available: <https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/sensor/pdf/datasheet/data-sheet-murata-scl3400-d01.ashx?la=en&cvid=20221212010000000000>. [Accessed 19 6 2023].

Wavelength-converted light sources in fluorescence-based methods in medical technology

Jan Müller^{1,2}, Ingo Ramsteiner², Reinhold Fieß², Cornelius Neumann¹

¹Lichttechnisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

²Robert Bosch GmbH, Renningen

Jan.mueller9@de.bosch.com

Abstract

This contribution proposes phosphors as excitation for fluorescence analysis and evaluates their potential in this application area. Aim of this research is to provide a method which allows to quantify how well a phosphor fits as excitation in a given optical system with spectral filters for fluorescence analysis. The approach consists of a mathematical calculation of crosstalk which is first applied to abstract and subsequently defined phosphor emission spectra. The resulting crosstalk is used as measure indicating the fit of a phosphor spectrum. Result of this contribution is a detailed description of the applied method as well as an example exercise on a given optical system which gives an impression of possibilities phosphors offer in this application. The presented method is applicable to any (new) phosphor or even LED spectra. Especially evaluations on the example optical system allow conclusions which help to design future optical systems.

Index Terms: phosphor, fluorescence analysis, spectral filter, crosstalk

1 Introduction

Quantitative real-time-PCR (Polymerase Chain Reaction), which we also know as qPCR, is a well-established method in molecular diagnostics. The goal of a qPCR test is to identify one or more DNA-sequences even if they occur in only small concentrations. This high sensitivity is achieved by an amplification of DNA-sequences in several thermal cycles. In a qPCR the concentration of the investigated DNA-sequences is measured after each cycle which is most often performed in a fluorescence analysis. Diagnosing several DNA-sequences in one sample is called multiplex-qPCR and an example is the investigation of Influenza A, Influenza B, SARS-CoV2 and human DNA as reference.



Performing a qPCR analysis in the lab or on a lab-on-chip (LoC) device has many technical facets, but we focus in this contribution on the optical readout of the fluorescence signal.

Purpose of the fluorescence analysis is to determine the concentration of DNA-sequences. All DNA-sequences under investigation are labeled by a fluorescent dye, respectively. Since all dyes absorb radiance in a unique wavelength band and emit again radiance in another unique wavelength band, the concentration of DNA-sequences correlates to the fluorescence of their corresponding dye and different DNA-sequences can be distinguished by the excitation and emission wavelengths of their dyes.

To analyze the dyes, the analyzing unit must provide radiance of different wavelength intervals which fits to the excitation wavelength bands of the dyes as well as detection capabilities in the emission wavelength bands. The excitation unit in low-cost devices usually consists of one or several LED light sources which are optionally paired with spectral filters. State-of-the-art solutions show some drawbacks as high invest in spectral filtering which are discussed in more detail in the section about state-of-the-art light sources. We propose phosphors to overcome the drawbacks of common light sources using the property of a spectrally condensed and stable emission spectrum of certain phosphors which offers the opportunity to reduce filter complexity.

The presented contribution considers an excitation setup with reduced filter complexity, deduces the spectral requirements, and evaluates a large set of phosphors on these requirements. As a result, a set of phosphors is presented which fits best to the considered setup.

The following section introduces crosstalk as measure which helps to evaluate how well an excitation spectrum fits to the considered optical setup. The state-of-the-art section presents common light sources which are used for fluorescence analysis and gives an overview of phosphors. The methods section describes the considered setup in detail, explains how crosstalk is calculated and how spectral requirements as well as a set of suitable phosphors is found. Results on the spectral requirements as well as the selection of phosphors are shown and discussed in the succeeding two sections.

2 Definition of crosstalk

In a multiplex-qPCR analysis the concentration of N different DNA-sequences is investigated. Each type of DNA is labeled with a specific fluorescent dye which allows the measurement of the fluorescence activity of the dye corresponding to the DNA-sequence concentration. Further, the N dyes for N DNA-sequences differ in their absorption and emission spectra which allows to distinguish corresponding DNA-sequences. Typical absorption and emission spectra are shown in Figure 1. To identify the concentration of each DNA-sequence via the fluorescence activity a_j of the corresponding dye, N measurements must be performed. Therefore, the sample with all N dyes is excited N times with different excitation spectra $s_{e,i}$ especially adapted to

each dye, respectively. The resulting fluorescence is detected in a single detection wavelength band $s_{d,i}$ for each of the N measurements. However, the measured intensity level m_i does not correspond exclusively to the fluorescence activity a_i of the respective dye yet. As shown in Figure 1, both, absorption spectra $d_{a,j}$ and emission spectra $d_{e,j}$ of different dyes, are overlapping each other, which means that it is not possible neither to only excite a single dye nor to measure only the fluorescence of a single dye independent on the chosen excitation and detection bands. As a result, the measured intensity level m_i is composed of the fluorescence of all dyes, excited by the excitation spectrum $s_{e,i}$, in the corresponding detection interval $s_{d,i}$ multiplied with their fluorescent activity a_j . The fluorescence of dye $j = i$ in m_i is denoted as *signal* whereas all other fractions are designated as *crosstalk* from dye $j \neq i$. The described relation can be expressed as matrix-equation

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_N \end{pmatrix} = C \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix} \quad (1)$$

where C is the so-called crosstalk-matrix:

$$C = \begin{pmatrix} \int_{\lambda} (s_{e,1} \cdot d_{a,1}) d\lambda \cdot \int_{\lambda} (d_{e,1} \cdot s_{d,1}) d\lambda & \dots & \int_{\lambda} (s_{e,1} \cdot d_{a,N}) d\lambda \cdot \int_{\lambda} (d_{e,N} \cdot s_{d,1}) d\lambda \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \int_{\lambda} (s_{e,N} \cdot d_{a,1}) d\lambda \cdot \int_{\lambda} (d_{e,1} \cdot s_{d,N}) d\lambda & \dots & \int_{\lambda} (s_{e,N} \cdot d_{a,N}) d\lambda \cdot \int_{\lambda} (d_{e,N} \cdot s_{d,N}) d\lambda \end{pmatrix} \quad (2)$$

Knowing the crosstalk-matrix, the fluorescence activity of the dyes can be calculated multiplying the crosstalk-correction-matrix C^{-1} and the measured intensity values array. However, due to manufacturing tolerances and degradation of chemicals and hardware, the correction with a crosstalk-matrix is never perfect. Hence, it is preferable to keep the crosstalk as small as possible, meaning that C must approach a diagonal matrix.

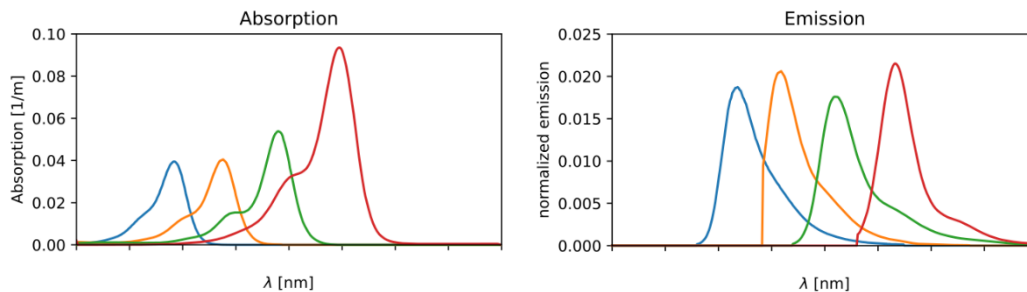


Figure 1: Absorption and emission spectra of four different dyes used for fluorescence labeling. The absorption as well as the emission spectra of the dyes are overlapping each other making it impossible neither to excite nor to measure the fluorescence of only a single dye independent on the chosen excitation and detection wavelength bands.

3 State-of-the-art

This section gives an overview on light sources which are used for fluorescence analyses, with special focus on LoC. The second subsection gives an overview on available phosphors which might be used in the application.

3.1 Light sources for fluorescence-based analyses

In the context of LoC-devices light emitting diodes (LEDs) are used as excitation source. Two different approaches exist. One solution is a combination of a phosphor-converted LED with broadband emission spectrum as known from general lighting or from automotive headlight context combined with interference filters to extract a defined excitation band. These filters are exchangeable to switch between different excitation bands. This solution provides stable radiance but goes along with comparable high invest in expensive interference filters and a mechanical filter changer. Another method is the usage of direct LEDs which are not using a phosphor. They have narrower emission bands than the broadband phosphor-converted LED. Filters are usually required but can be cheaper and be mounted in a fixed setup without moving parts. However, direct LED spectra suffer from manufacturing tolerances as well as temperature drift during operation which induces uncertainties to the measurement if not compensated otherwise. In comparison to the light sources used in lab segment, LEDs provide a low radiance level. For lab-devices higher costs are tolerated which allows to use gas discharge lamps and Lasers [1].

3.2 Overview of phosphors

Phosphors which are considered in this contribution are materials that absorb radiation at a wavelength and emit radiation at another wavelength in non-thermal equilibrium [2]. This effect is known as fluorescence and occurs in the dyes used to mark DNA-sequences in the sample as well. To avoid misinterpretations between dye and phosphor, this contribution does not consider phosphor excitation and only focuses on the phosphor emission which is used to excite dyes in the sample. The dyes themselves emit radiance at a third wavelength in a second fluorescence process.

Since there are many different dyes in fluorescence analysis, it is important that the phosphor material systems used to excite them are not only supporting the example optical setup, which is considered in section 4.1, but are also suitable to excite other commonly used dyes. Therefore, one or several phosphor material systems must be found, whose emission spectrum peak wavelengths are adjustable in the visual range of the electromagnetic spectrum, which is the relevant spectral range for excitation of fluorescent dyes. Further, a confined emission spectrum is preferred. More precise requirements are evaluated the following sections.

Interesting material systems are Quantum Dots (QDs) and inorganic LED phosphors. QDs are nanoscale semiconductor particles. QD properties differ from that of bulk materials and are strongly dependent on the size of the dots. Using that parameter,

the emission color can be adjusted. Another advantage of QDs is their small emission width as 15 – 40 nm full width at half maximum (FWHM) for CdSe QDs. [3, 4] However, QDs are not considered in subsection 4.4 due to toxicity of the best candidates [4] and nonradiative decay processes limiting their achievable radiance [5].

YAG:Ce³⁺ is one of the most used phosphors for LED and Laser white light generation. It is of type garnet, has a broad emission spectrum and allows for high power densities. [6, 7] Beside garnet type phosphors another relevant material system is given by silicates. Silicates emit a more condensed spectrum than garnets but are not able to withstand power densities as high as garnet-type phosphors [3, 8]. The emission spectrum of silicates ranges from blue over green and yellow (Orthosilicates) to red (Nitridosilicates).

To optimize the achievable power density of a phosphor, the application of the phosphor is relevant. While most vendors sell phosphor as raw powder, a suitable application in a product is the dispersion of that powder in organic or inorganic silicon [9]. A thermally more stable variant is to embed the phosphor into a glass matrix. For laser lighting, phosphor sintered as ceramic [10] or grown as single crystal is preferred. [7, 11]

4 Methods

This section starts with an introduction of the considered optical system and explains details of the applied crosstalk calculation. Further, the procedure to determine spectral requirements for phosphors is explained and the applied method of selecting the best phosphors for the considered optical system is introduced.

4.1 Considered optical system with multi bandpass filter

The considered optical system reduces filter complexity in comparison to N filters. Instead of using one filter for each dye, a single multi bandpass excitation filter is used for all dyes. Therefore, the selection of excitation spectrum is done by changing phosphors instead of changing filters. The number of investigated dyes N equals to four which leads also to four different phosphors as excitation light sources as well as four different excitation and detection wavelength bands. Figure 2 shows a schematic diagram with all components. Independent of the phosphor selection (A) the phosphor emission is filtered by the same multi bandpass excitation filter (B) before the dyes are excited according to their absorptions spectrum (C). The dyes' emission (D) passes one of the four detection filters (E) before it is measured by a spectrally broadband detector (F). For each dye, a certain phosphor and detection filter are provided which results in a coupling of phosphor and detection filter selection.

Used filter characteristics as well as the dyes' properties are chosen according to an existing and therefore already optimized analyzer system.

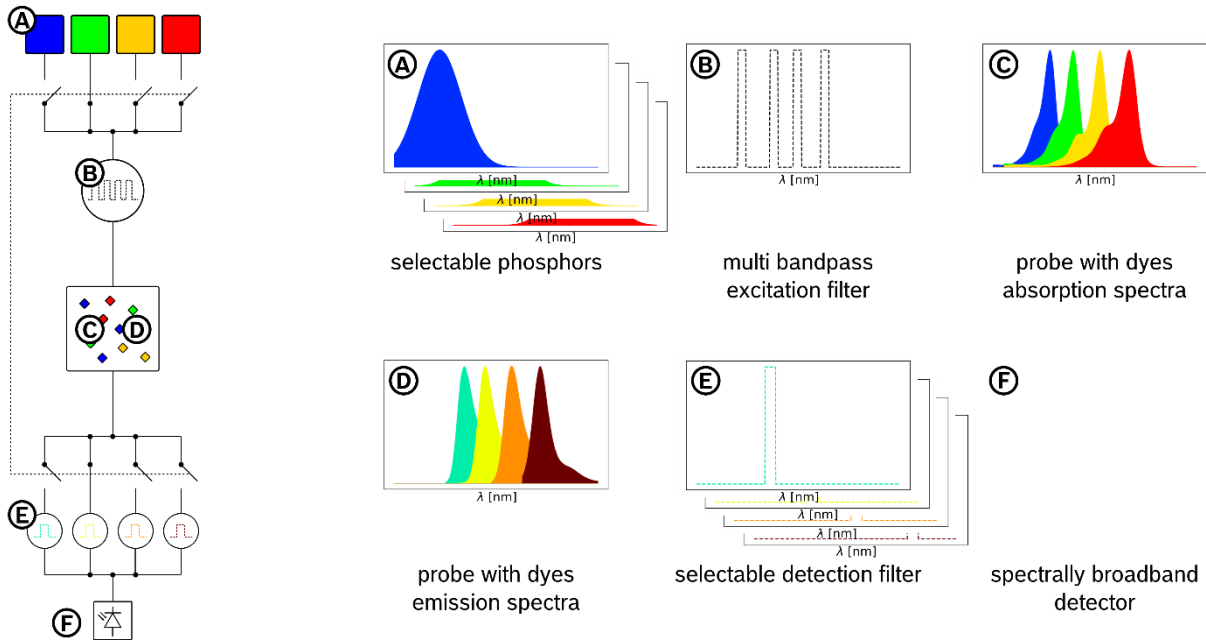


Figure 2: Schematic diagram of the considered optical setup. One of four phosphors is selected (A) whose emission is filtered by a multi bandpass excitation filter (B). Dyes in the sample absorb the excitation light (C) and emit fluorescence (D). One of four detection filters corresponding to the phosphor selection is used (E) before the signal is detected by a spectrally broadband detector (F).

4.2 Crosstalk calculation

The basics of the crosstalk-calculation are given in section 2. The present subsection goes into more detail about the crosstalk-calculation for the given optical setup from subsection 4.1 with four dyes. According to equations (1) and (2) a single measurement value is the sum of the fluorescence of all dyes in the detection wavelength band which is dependent on how well the excitation spectrum fits to the corresponding absorption spectrum of the dye:

$$m_i = \sum_j \left(\int_{\lambda} (s_{e,i} \cdot d_{a,j}) d\lambda \cdot a_j \cdot \int_{\lambda} (d_{e,j} \cdot s_{d,i}) d\lambda \right) \quad (3)$$

m_i is the measurement value of channel i . j is the index of the dye. Both, i and j , are in the range of one to four. The first integral in equation (3) represents how well excitation spectrum $s_{e,i}$ fits to the absorption spectrum of dye $d_{a,j}$. The excitation spectrum $s_{e,i}$ is, in case of the considered optical system, given by the selected phosphor emission $p_{e,i}$ filtered by the multi bandpass excitation filter $T_{e,mbf}$. Besides the match of excitation spectrum and absorption spectrum, the actual fluorescence a dye emits depends on the fluorescence activity a_j of that dye as well. The fluorescence activity is key parameter to identify in a fluorescence analysis since it correlates with the concentration of the corresponding DNA-sequence. In the crosstalk-calculation the fluorescence activity for all dyes is assumed to be the same and since only relative values are compared in the end, the fluorescence activity can be set to one which allows to omit this variable in further equations. The right integral in equation (3) shows

the emission spectrum of dye j $d_{e,j}$ in the detection wavelength band $s_{d,i}$. The detection wavelength band equals to the selected detection filter $\tau_{d,i}$ in the considered optical system. The spectral sensitivity of the broadband detector is assumed to be constant over the relevant wavelength range. Considering the optical system described in subsection 4.1, equation (3) can hence be re-written as

$$m_i = \sum_j \left(\int_{\lambda} (p_{e,i} \cdot \tau_{e,mbf} \cdot d_{a,j}) d\lambda \cdot \int_{\lambda} (d_{e,j} \cdot \tau_{d,i}) d\lambda \right) \quad (4)$$

Finally, each term in the sum is a scalar, representing a relative intensity due to dye j in detection interval i excited by phosphor i . Corresponding to the nomenclature in section 2 the term $j = i$ is denoted as signal, whereas all terms $j \neq i$ are considered as crosstalk of dye j . The sum of all terms $j \neq i$ results in the overall crosstalk. The crosstalk is usually compared to the signal as quotient of crosstalk divided by signal and most often expressed in percent.

Figure 3 selects the measurement interval $i = 2$ and shows corresponding spectra in the different steps of the calculation. Underneath each spectrum illustration the part of equation (4) which is used to calculate the respective spectrum is shown. Figure 4 has a closer look onto the calculated spectrum at the broadband detector before the broadband detector integrates over all wavelength to return a single value m_i . In the example the signal is given by dye $j = i = 2$ in yellow while crosstalk portions mainly come from the dyes $j = 1$ and $j = 3$.

4.3 Spectral requirements for phosphors using Gaussian-approximated spectra

To minimize the range of possible phosphors fitting to the considered optical setup, requirements on the width of a phosphor emission spectrum are estimated based on the method described in this subsection. All phosphors are modelled as Gaussian-approximated spectra which are defined by a peak-wavelength and an FWHM. The peak wavelengths of the four phosphors are chosen to exactly match the central intervals of the multi bandpass excitation filter. An adjustable FWHM in the range of 5 nm to 215 nm in 5 nm steps allows to estimate the crosstalk for different spectral widths. Section 5.1 shows four different graphs showing the crosstalk normed to the signal as result of this calculation.

4.4 Phosphor-screening

To represent real phosphors, their emission spectrum must be modelled in more detail. Since not all phosphors have only one peak in their emission spectrum a more general approach models the spectrum as a sum of Gaussian-approximated spectra at different peak-wavelengths and with different FWHMs as well as different intensities. Phosphors are not available for all peak-wavelengths. This unavoidably requires collecting concrete phosphor emission spectra in a database. Selected phosphors from

[12, 13, 14, 15] are included. For each entry in the database, it is possible to calculate the crosstalk as described in subsection 4.2. Having the crosstalk of each database entry the spectrally, best fitting phosphor for a specific dye equals to the database entry with the lowest overall crosstalk for the respective channel. This leads to four spectrally best fitting phosphors for the considered optical system.

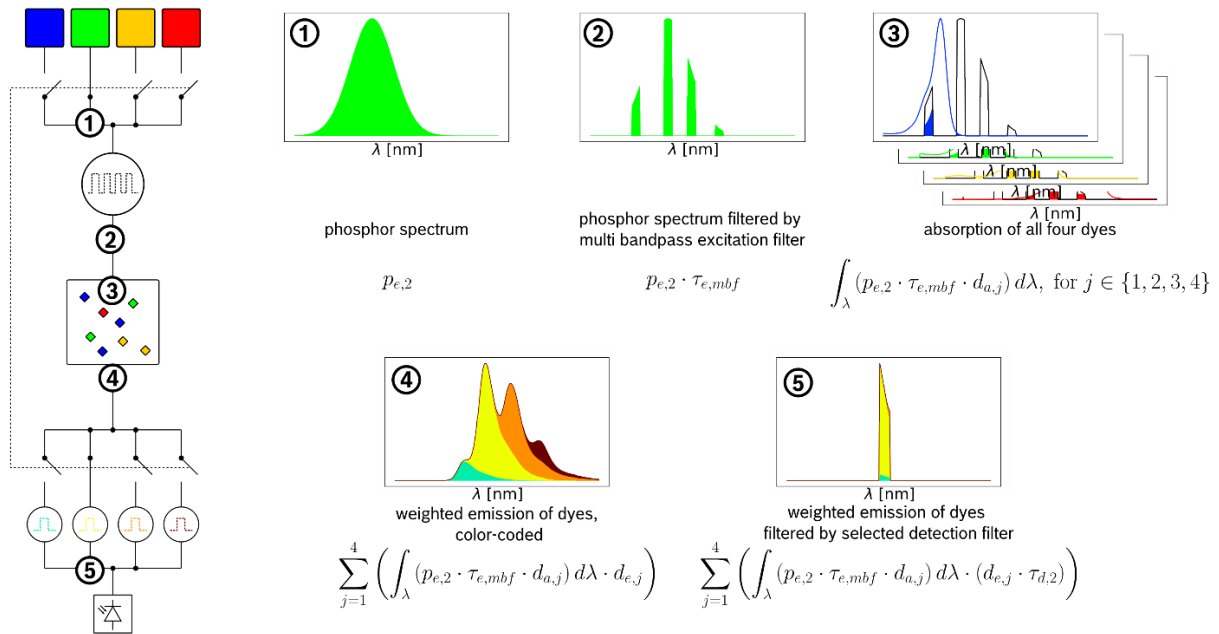


Figure 3: Different spectra which are calculated in the system and the corresponding formula for an example phosphor spectrum in interval $i = 2$. (1) Shows the phosphor spectrum which is filtered by a multi bandpass filter (2). In (3) the integral of the excitation spectrum from (2) with the absorption of the dye in the sample is calculated, respectively. (4) shows the combined color-coded ($j = 1$: green, $j = 2$: yellow, $j = 3$: orange, $j = 4$: brown) fluorescence of the dyes according to the chosen excitation. The result of (4) is filtered by the selected detection filter leading to the spectrum at the broadband detector (5).

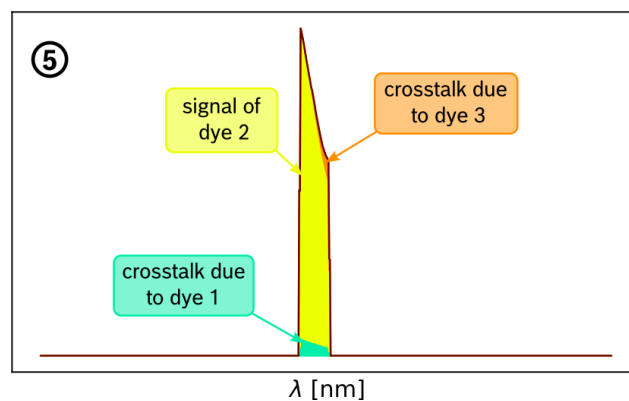


Figure 4: Detailed look on spectrum (5) from figure 3. The yellow part shows the signal from dye $j = i = 2$ whereas the green and orange part is crosstalk from dye $j = 1$ and $j = 3$.

5 Results

The result section first shows results of the requirement analysis which is described in subsection 4.3 and presents the selection of four spectrally best fitting phosphors determined according to subsection 4.4.

5.1 Spectral requirements for phosphors using Gaussian-approximated spectra

Evaluating Gaussian-approximated phosphor spectra leads four graphs from figure 5. Each of the graphs represents a single measurement channel i and plots the crosstalk over different spectral widths of phosphor emission spectrum i . The overall crosstalk is separated into segments whose color represents the origin of the crosstalk: A green color corresponds to dye 1, yellow to dye 2, orange to dye 3 and brown to dye 4. To compare the crosstalk between all channels, the y-axis scale is chosen to be same for all graphs.

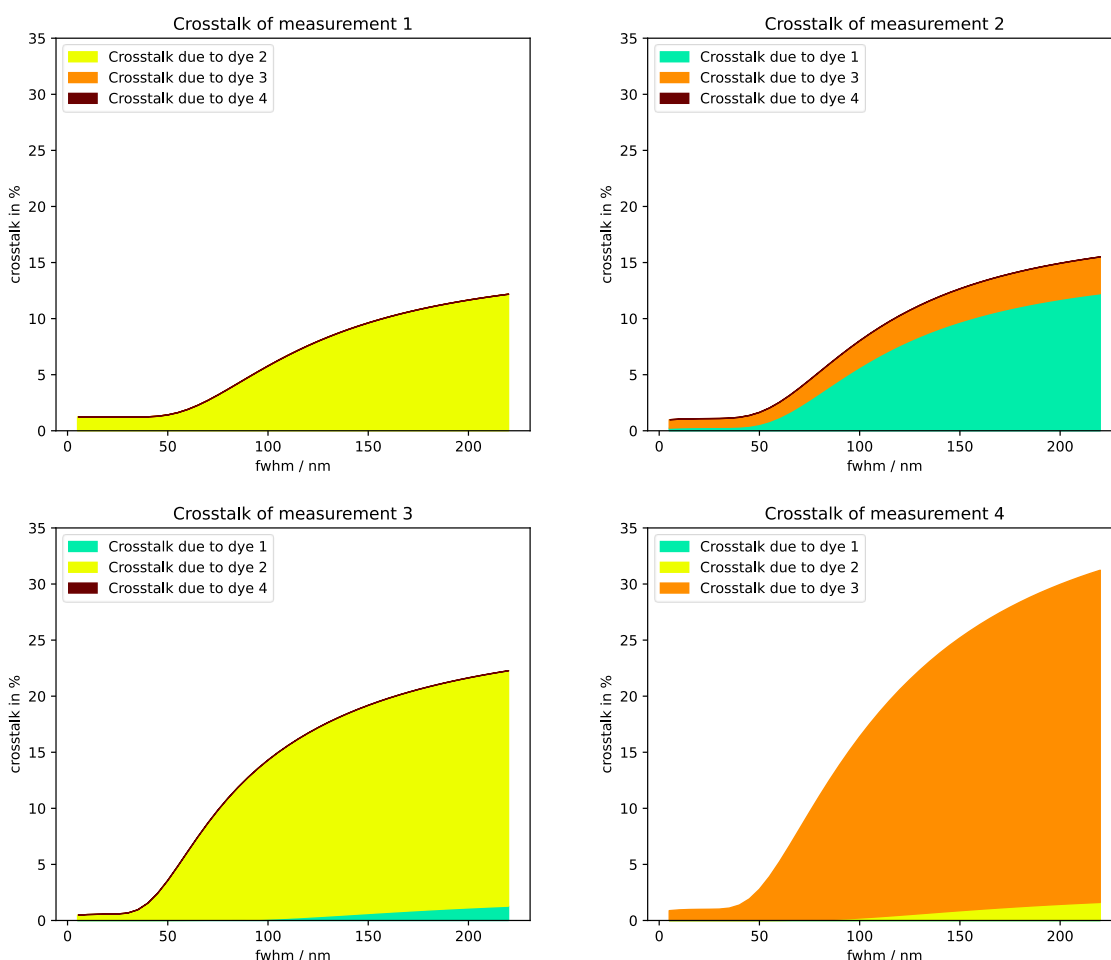
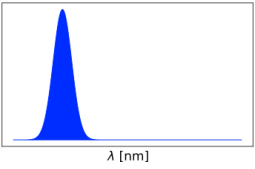
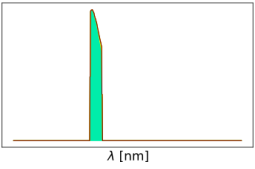
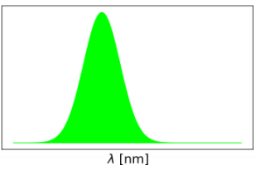
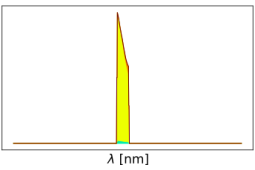
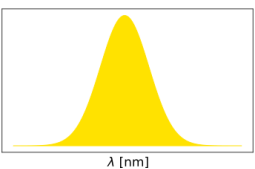
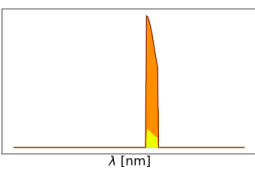
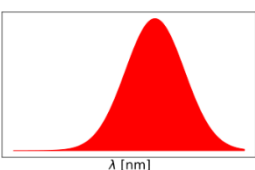
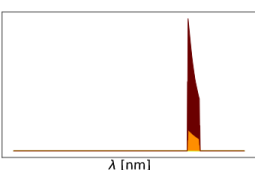


Figure 5: Results of the crosstalk calculation with Gaussian-approximated phosphor spectra. Four graphs are given, one for each measurement channel. In each graph the summed crosstalk, normed to the signal level, is displayed. The overall crosstalk is separated into distinct parts which are color-coded to visualize the dye which is the reason for a certain fraction of the overall crosstalk ($j = 1$: green, $j = 2$: yellow, $j = 3$: orange, $j = 4$: brown). All graphs have the same x- and y-scale to allow for comparability.

5.2 Phosphor-screening

Table 1 shows the spectrally best fitting phosphor to excite each dye, the corresponding emission spectrum, the spectrum at the detector and the resulting overall crosstalk, respectively.

Table 1: Results of the phosphor screening. The table shows the spectrally best fitting phosphor, corresponding emission spectrum, resulting spectrum at the detector as well as the resulting crosstalk for all dyes, respectively.

Dye	Phosphor	Phosphor emission spectrum	Spectrum at the detector	crosstalk
1	Orthosilicate A			1.23 %
2	Orthosilicate B			4.27 %
3	Orthosilicate C			15.3 %
4	Nitridosilicate			23.4 %

6 Discussion

As the result section, the discussion section is separated into a subsection discussing spectral requirements for phosphor emission spectra and a subsection focusing on best fitting phosphors for the considered optical system.

6.1 Spectral requirements for phosphors using Gaussian-approximated spectra

With the plots in figure 5 it is possible to estimate the requirements on spectral confinement of a phosphor emission spectrum in the proposed application. Usually, a device allows a certain crosstalk level, which is used to determine the maximum allowed FWHM of the phosphor emission spectrum. For an example overall crosstalk

threshold of 5 %, the maximum allowed FWHM of the phosphor spectra for all measurement channels i is given in figure 5 by 90 nm, 75 nm, 60 nm, and 60 nm for the measurement channels in ascending order.

The presented analysis with Gaussian-approximated spectra delivers the spectral requirements a phosphor emission spectrum must provide to be under a certain threshold value. However, it is important to be aware of the limitations this evaluation entails. Real phosphor emission spectra differ from simple Gaussian-approximated spectra. Further, it is assumed that the peak wavelength of the phosphor emission spectrum is perfectly matching the peak wavelength of the band in the excitation spectrum. To assess real phosphors, the evaluation in subsection 4.4 models phosphor emission spectra in more detail.

6.2 Phosphor-screening and outlook

For measurements in band $i = 3$ and $i = 4$, the crosstalk is above the example crosstalk-threshold of 5 %. Hence, phosphors in the current database cannot be used in the considered optical system if the crosstalk should be below the example crosstalk level.

So far, we have not identified a phosphor combination suitable for a four-channel setup with one multi bandpass excitation filter yet. In the following, some examples are presented, which adapt the optical system or parameters of the analysis to allow the use of phosphors. One possibility to decrease crosstalk is to reduce the number of channels to three or two. Comparing the plots for measurement channels 1 and 3 in figure 5, both, dye 3 and 1, are not resulting in much crosstalk for the mentioned measurement channels, respectively. Another idea is to use dyes which are covering a broader spectral range which allows to spectrally separate the bands in the multi bandpass excitation filter from each other. Also possible is the usage of two different multi bandpass filters which are both only supporting two bands, one filter band 1 and 3, the other band 2 and 4. Finally, the acceptable crosstalk level can be increased by investing more effort in calibration which allows a more detailed crosstalk correction.

The selected phosphors are silicates which are typical LED phosphors. It is possible to adapt the central emission peak of silicates which allows to find suitable phosphors also for excitation bands at other wavelengths.

A limitation in this kind of evaluation is the quality of database entries. Since phosphor emission spectra are usually only available as plots in datasheets rather than as list of spectral values, a transformation of a plot into a computer-readable format must be applied. To fit a phosphor in the database, the spectrum is approximated as described in subsection 4.4 as a manual step which is error prone. The following evaluation itself can only be as good as the database. For control, the real spectra of the best candidates, either from the supplier or measured, should be evaluated in the optical system.

7 Conclusion

Summing up, the presented contribution describes a method to calculate crosstalk depending on a phosphor emission spectrum for a given optical setup. This method is used in combination with Gaussian-approximated spectra to estimate requirements for phosphor emission in the investigated optical system. The same method is used to find a set of spectrally best fitting phosphors in a database. For the considered optical system of four phosphors with one mutual four-bandpass filter, phosphors resulting in a crosstalk level between 23 % and 1% are found. The scope of application of the presented evaluation comprises arbitrary optical systems and is not limited to only phosphor emission spectra. Hence, future decisions may benefit from the here presented method.

8 Acknowledgement

We acknowledge helpful discussions with Prof. Jüstel (FH Münster, Faculty of Chemical Engineering).

9 References

- [1] M. Abramowitz, and M.W. Davidson, "Light Sources", Website, Olympus, <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/techniques/fluorescence/fluorosources/>, 2022, visited on 22.05.2023
- [2] T. Jüstel, and S. Schwung, „Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz“, Book, Springer Spektrum, Berlin, pp. 106, 2019
- [3] E. Virey, „Phosphors and Quantum Dots 2015: LED Downconverters for Lighting and Display Applications“, Report, Yole Développement, pp. 101, 173, 2015
- [4] R.-S. Liu, "Phosphors, Up Conversion Nano Particles, Quantum Dots and Their Applications: Volume 1", Book, Springer, Berlin, pp. 16-24, 2017
- [5] B. Guzelturk et. al., "Dynamic lattice distortions driven by surface trapping in semiconductor nanocrystals", Journal Article, Nature Communications Vol. 12, pp. 1-9, 2021
- [6] A. Berends, M.A. van de Haar, and M.R. Krames, „YAG:Ce³⁺ Phosphor: From Micron-Sized Workhorse for General Lighting to a Bright Future on the Nanoscale“, Journal Article, Chemical Reviews Vol. 120, pp. 1-19, 2020
- [7] F. Rahman, "Diode laser-excited phosphor-converted light sources: a review", Journal Article, Optical Engineering Vol. 61, pp. 4, 6-10, 2022
- [8] J. Meyer, and F. Tappe, "Photoluminescent Materials for Solid-State Lighting: State of the Art and Future Challenges", Journal, Advanced Optical Materials Vol. 3, pp. 424-425, 2015

- [9] C.-N. Liu et. al., “High reliability and luminance of the color wheel by phosphor-inorganic silicone”, Journal Article, Optical Materials Express Vol. 13, pp. 1093, 2023
- [10] V. Hagemann et. al., “Static ceramic phosphor assemblies for high power high luminance SSL-light sources for digital projection and specialty lighting”, Conference Paper, SPIE Proceedings Vol. 11302, Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XXIV, pp. 113021N-1 - 113021N-13, 2020
- [11] C. Ma, and Y. Cao, “Phosphor converters for laser driven light sources”, Journal Article, Applied Physics Letters Vol. 118, pp. 210503-1 - 210503-9, 2021
- [12] T. Jüstel, “Phosphor Information and Spectra Access (PISA)”, FH Münster, Faculty of Chemical Engineering, website, <https://en.fh-muenster.de/ciw/personal/professoren/juestel/pisa.php>, accessed on 26.05.2023
- [13] S. Tews, Litec-LLL GmbH, datasheets on request, url: <https://www.litec-lll.de/>, accessed 26.05.2023
- [14] W. Eisenberg, and D. Uhlich, Leuchtstoffwerk Breitung GmbH, datasheets on website and on request, url: <https://www.leuchtstoffwerk.com/home-en.html>, accessed 26.05.2023
- [15] F. Heinrich, Schott AG, datasheets on website and on request, url: <https://www.schott.com/de-de/products/ceramic-laser-phosphor-converter-p1000260/downloads>, accessed on 26.05.2023

Usage of Material Properties of 3D Objects for an Improved Illumination by High-Definition Matrix Headlights

Nathalie Müller¹, Mirko Waldner¹, Alisha Maroke² and Torsten Bertram¹

¹ Institute of Control Theory and Systems Engineering (RST), TU Dortmund University, Germany

nathalie2.mueller@tu-dortmund.de

² 3D Mapping Solutions GmbH, Germany

Abstract

The contribution at hand presents a novel algorithm to improve visual perception for humans and machine vision algorithms by virtually adjusting the illumination of high-definition (HD) matrix headlights as a function of different material properties in the environment, such that each material can be illuminated with a different illumination intensity. Since the material properties affect the visual perception of objects, this approach allows the attention of human drivers and other human traffic participants to be focused on selected areas or significantly increase the detection quality for machine vision algorithms in the case of automated driving, while it is possible to save energy at the same time.

Index Terms: Matrix Headlights, Simulation, Visual Perception, Object Detection

1 Introduction

The visual perception of objects is mainly influenced by their surface properties such as roughness or color, on which the reflection of light depends. If these surface properties are known, the illumination can be optimally adjusted, e. g. to save energy or to improve automated object detection by avoiding overexposed images. This is important for safety-critical applications, e. g. object detection for automated vehicles, as the occurrence of traffic accidents and near accidents can be minimized if there are no incorrectly detected or undetected objects. The same applies to human recognition in manual driving.

The contribution at hand investigates the potential of HD matrix headlights to improve the illumination of the environment with knowledge of the material properties of the illuminated objects for both humans and machine vision algorithms, e.g., YOLOv8 [1], in the case of cameras of automated vehicles. HD matrix headlights consist of a matrix of light pixels that individually illuminate segments of the environment, allowing



different materials of objects to be illuminated with different light intensities. This can be used to direct the driver's attention, improve visual perception, or achieve equally good perception while saving energy.

The examinations in this contribution are analyzed virtually in Unreal Engine (UE) 5.1 [2]. Thus, the Physically Based Rendering (PBR) [3] model is used for 3D objects for realistic visualization for evaluation. For the simulation of headlights, headlight models that use projective texture mapping [4] are considered, as this is an already established method for simulating headlights [5]. The basic idea and functionality of the algorithm are shown in Fig. 1, where based on the known materials of an example 3D house and a fence, the illumination can be adjusted individually per material, e.g. wood or glass, to account for different colors or reflectance properties of the individual material.



(a) Illumination of a 3D house in UE



(b) Pure illumination of (a) projected onto a wall

Fig. 1: Example illumination of a scene with one matrix headlight using the presented algorithm for different illumination of other materials. The different materials of the 3D house in (a) are considered by the algorithm, resulting in a texture for the headlight projected on a wall as shown in (b), with different pixel intensities for different materials. Therefore, the shape of the house is also recognizable solely by the adjusted illumination on a wall.

In the next section, the algorithm for setting different pixel intensities of the headlights for different known materials of objects existing in the environment is presented. This is followed by a section on evaluating the impact of the proposed approach on human perception and machine vision algorithms. The contribution concludes with a summary and an outlook.

2 Algorithm for Material Location Detection and Headlight Control

The algorithm to illuminate different materials with different illumination intensities is divided into six main steps, which are listed here shortly to give an overview and will be explained in more detail in the following paragraphs:

- 1) Setup Illumination Change: A color coding is set according to different known materials occurring in the scene. Depending on the material, a different normalized illumination intensity is set, ranging from 0 to 1 of its intensity maxima.
- 2) Getting Distance and Materials: A depth image and a material color-coded picture are captured from the scene.

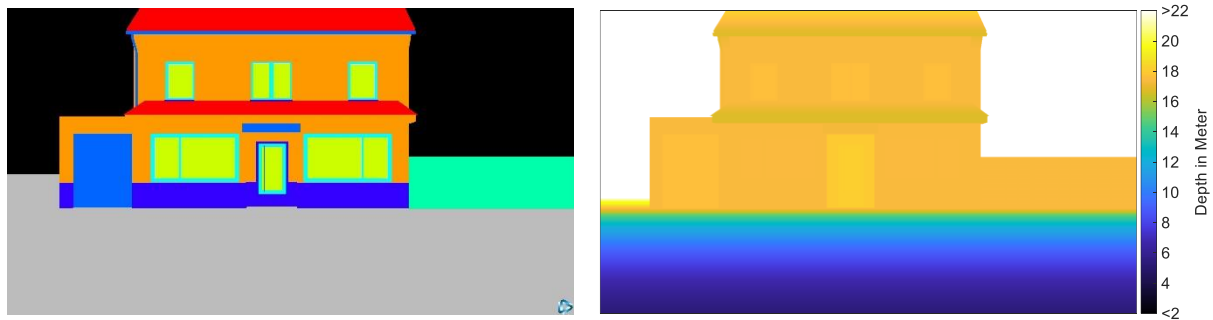
- 3) Searching for Defined Materials: The color-coded picture is searched for the known materials from step 1). If a corresponding material is detected in a pixel of the captured image, the pixel is assigned to the material, otherwise, the default or fallback setting is used. A material image is created from this.
- 4) Calculating Object Coordinates in Headlight Coordinate System: The coordinates of the surface points in world space are calculated from the depth image and the camera position. Afterward, they are transformed into the headlight coordinate system.
- 5) Calculating Pixel Control Values: The material image from 3) and the corresponding surface points in the headlight coordinate system from 4) are fused to calculate the intensity values of the individual pixels of the HD matrix headlight.
- 6) Illuminating the World: The intensity values from 5) are set by the HD matrix headlights.

For illustration purposes, the description of the algorithm is supported by an example, which is also used later in the evaluation section. The example includes a scene with a 3D house with a fence at one side, representing a real house in the German city Lippstadt that has been precisely measured and modeled by 3D Mapping Solutions. Fig. 1 shows this example. A pair of parallel HD matrix headlight modules is used for illumination.

As a prerequisite for the presented approach and step 1) of the algorithm, it is necessary to know which different materials are in the scene. It is not important to know the exact appearance, color, or reflectance of each material, but it is important to be able to distinguish the different materials on the different parts of a 3D object. The number of materials can be arbitrary, as long as there are not too many to clearly distinguish between their representation in the database. A possible database is to color-code the materials, so the limitation is the distance of the corresponding colors in the HSV color space. In addition, a tolerance above and below the hue, saturation, and brightness value specified in 1) should be considered, since the color-coded captured image in 2) is taken with a realistically modeled camera and therefore may not provide the same colors as in the scene. For each material, it is possible to set a normalized intensity value with which the different materials are illuminated by the HD matrix headlights. The possible values range from 0 to 1, which are then multiplied by the maximal illumination intensity of the headlight themselves. For example, it is possible to set the normalized illumination intensity of glass to 0.4 and that of wood to 0.6.

In the next step 2), two different virtual images of the scene are taken using a virtual camera with a resolution of $n_x \times n_y$ horizontal and vertical pixels. In one of the images, the color coding of the objects' material types in the scene is encoded, and in the other, the depth information in meters from the camera to the objects is encoded. The depth is gained from the Z-buffer of the graphics card and is therefore more precisely the

depth on the orthogonal coordinate axis of the image. The captured pictures are shown in Fig. 2a and Fig. 2b, respectively. The information in these images is required for the algorithm to later recognize and distinguish the different materials of the virtual objects and to reconstruct the 3D coordinates of the environment in the headlight system. Direct access to the depth information and the conversion of a realistic visualization of the objects to a color-coded material type library is only possible if a 3D rendering engine is available for the algorithm. If this is not usable, step 2) must be adapted.



(a) Color-coded image for the recognition of materials, each color representing a different one.

(b) Image with depth information of the camera

Fig. 2: Required images for processing material and depth information in the algorithm

In step 3), the color-coded image is searched for the colors of the known materials defined in step 1). As already indicated, the predefined colors are converted from the RGB color space to the HSV color space. In HSV color space, it is more convenient to compare the colors with a tolerance above and below the defined values from step 1) to account for inaccuracies in the image capture. For each material, the hue, saturation, and value of the corresponding color code are compared to each pixel of the captured image of the scene. If the three HSV values of the pixel are within the interval spanned by the tolerance of the material, the pixel is assigned to that material by a corresponding index.

In the end, the indices of the pixels form an overall material image. The default index of the material image is 0, which is set when a color in the image does not represent a color of a known material. An example of such a material image is illustrated in Fig. 3, where the material indices are chosen arbitrarily except for 0.



Fig. 3: Material index image. Each recognized material in the scene is assigned a material index from prior knowledge. For the rest, the unknown material index 0 is assigned.

For step 4) the depth image of step 2) as well as the camera positions c_x, c_y, c_z on the $x, y,$ and z -axis and the rotations $c_\alpha, c_\beta, c_\gamma$ around these axes with respect to the headlight coordinate system are needed. For the transformation of the surface points from the depth image of the camera to the headlight coordinate system, the theorem of intersecting lines is used. In the first step, the length of the z -axis z_{CT} in texture elements (texels) from the camera to the center of the camera texture of the recorded image is calculated, where δ is the field of view angle of the camera

$$z_{CT} = \frac{\max(n_x, n_y)}{2 \tan\left(\frac{\delta}{2}\right)}. \quad (1)$$

For each texel of the recorded image texture, the horizontal and vertical texel coordinates $p_{\text{tex},x}$ and $p_{\text{tex},y}$, are determined, with the origin at the center of the texture where the z -axis intersects. The z -coordinate of each texel is set to z_{CT} . The corresponding 3D coordinates in the camera system $\mathbf{p}_{\text{cam}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ are calculated by scaling the coordinates of each texel $\mathbf{p}_{\text{tex}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ containing the elements $p_{\text{tex},x}, p_{\text{tex},y}$ and z_{CT} as $\mathbf{p}_{\text{tex}} = (p_{\text{tex},x}, p_{\text{tex},y}, z_{CT})$ by an individual factor s in meters per texel. The scaling s is calculated with the depth image information d in each texel of the depth image

$$s = \frac{d}{z_{CT}}, \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_{\text{cam}} = s \mathbf{p}_{\text{tex}}. \quad (3)$$

The affine transformation $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ from the camera coordinate system to the headlight coordinate system

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & c_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & c_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & c_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

with

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \mathbf{R}(c_\gamma) \mathbf{R}(c_\beta) \mathbf{R}(c_\alpha) \quad (5)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(c_\gamma) & -\sin(c_\gamma) & 0 \\ \sin(c_\gamma) & \cos(c_\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(c_\beta) & 0 & \sin(c_\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(c_\beta) & 0 & \cos(c_\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(c_\alpha) & -\sin(c_\alpha) \\ 0 & \sin(c_\alpha) & \cos(c_\alpha) \end{pmatrix},$$

is used to obtain the coordinates $\mathbf{p}_{\text{HL}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ per texel of the camera texture in the headlight coordinate system by multiplication

$$\begin{pmatrix} \mathbf{p}_{\text{HL}} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} \mathbf{p}_{\text{cam}} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Fig. 4 shows the results of the transformation when a normal camera picture without special coloring, e.g. depth information, is mapped onto p_{HL} , with the origin being the middle of the headlight pair.

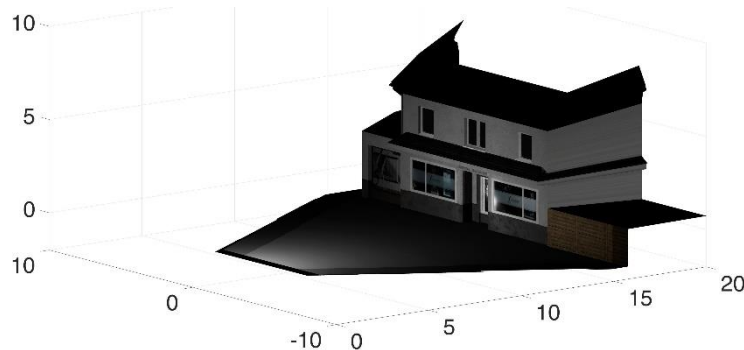


Fig. 4: Reconstructed 3D coordinates with the middle of the headlight pair as origin

In step 5) of the algorithm, the results of steps 3) and 4) are combined to determine the pixel intensity values of the HD matrix headlight. Similar to step 4), the theorem of intersecting lines and the methods of perspective transformation are used for this purpose. This time, the coordinates in the headlamp coordinate system and the texture coordinates of the headlight texture with a z_{HL} in texels in the center are used since a headlight model with projective texture mapping for light simulation is utilized in the rendering engine. Thus, the calculation of the horizontal and vertical coordinates x_{HL} and y_{HL} for the headlight texture from the corresponding world coordinates x_W, y_W, z_W with

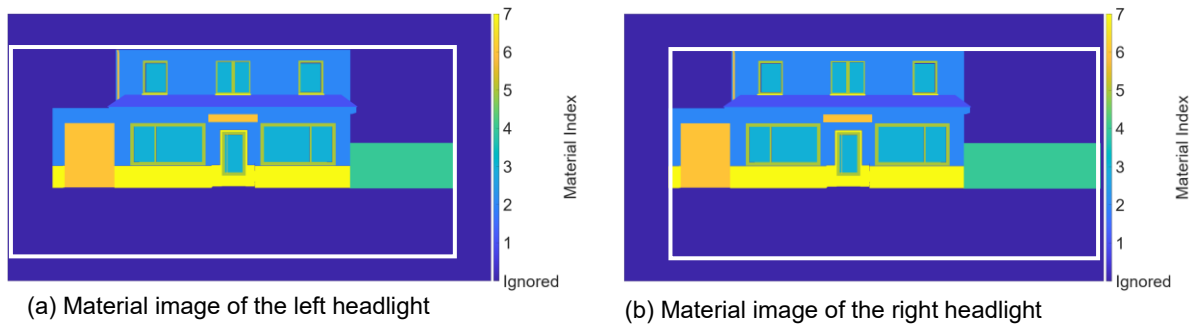
$$z_{HL} = \frac{\max(n_{HL,x}, n_{HL,y})}{2 \tan(\alpha)}, \quad (7)$$

where the headlight texture has a resolution of $n_{HL,x} \times n_{HL,y}$ horizontal and vertical texels and the point light source has an opening angle of α , is

$$x_{HL} = \frac{z_{HL}}{z_W} x_W, \quad (7)$$

$$y_{HL} = \frac{z_{HL}}{z_W} y_W. \quad (8)$$

If the x_{HL} and y_{HL} coordinates do not lie within the boundaries of the headlight texture, then the corresponding world coordinates do not fall within the illumination area of the headlight and are therefore ignored. Wherever this condition applies, the corresponding areas of the material image from step 3) are ignored. The same goes for the areas where no known material is detected, as shown in Fig. 5 for each of the two headlight modules.

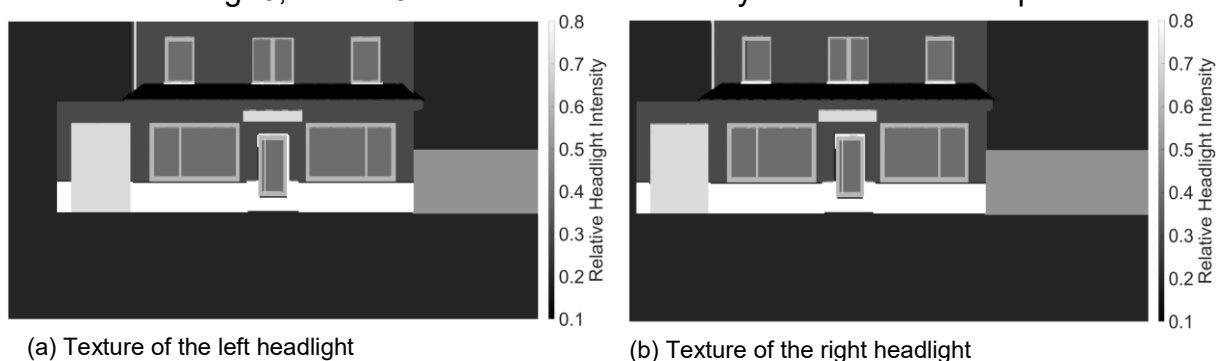


(a) Material image of the left headlight

(b) Material image of the right headlight

Fig. 5: Cropping of material images in relation to the area of possible illumination for each headlight. The areas are shown by a white box.

By comparing the material image with the corresponding x_{HL} and y_{HL} coordinates per headlight, only the x_{HL} and y_{HL} coordinates of the headlight texture that lie within the boundaries of the headlight texture and that illuminate a known material of the environment are left. This creates a list with a pair of the x_{HL} and y_{HL} coordinates of the headlight texture and the corresponding material index that this texel coordinate illuminates. The x_{HL} and y_{HL} coordinates are then transformed to values between one and the number of horizontal and vertical pixels of the matrix headlight, respectively, for indexing. Thus, each texel of the headlight texture can be set to the intensity value of the corresponding material index. If there is more than one coordinate pair belonging to the same texel, the intensity value is calculated by the arithmetic mean of all corresponding coordinate pairs. Therefore, if one pixel of the matrix headlight illuminates two different materials, for example, if a low-resolution headlight is used or it is a borderline pixel, the transition between the different materials is smoother and the materials are not illuminated with a completely different intensity than the intended one. Finally, any texels of the headlight texture that were not set using the above method are set to the default intensity value. The resulting textures for each headlight are shown in Fig. 6, where 0.2 is the default intensity value in this example.



(a) Texture of the left headlight

(b) Texture of the right headlight

Fig. 6: Headlight textures with relative pixel intensities to its maxima

As a final step, the resulting headlight texture from step 5) is used as the texture for projective texture mapping for the matrix headlight with a point light source of UE. For more than one headlight, steps 4) and 5) must be repeated with adjusted coordinates and rotations per headlight, which then results in a different headlight texture for step 6). For a pair of two parallel headlights, it is sufficient to perform step 4) once and shift

all coordinates for the other headlight according to the distance between the headlights. The previous algorithm can not only be used inside a simulation but can also in principle applied to control real headlights if the depth information and a high-precision HD map of the real environment color-coded by materials are available. Therefore, the headlight texture is an input parameter from which an algorithm must compute the pixel utilization. An optimal approach to do this in real-time is to use the super-sampling method, which we have already published in [6].

3 Evaluation

The presented approach is evaluated virtually in UE using an example scene. The basis of the scene is a multi-story 3D house with a fence at one side, which originates from a highly detailed map from 3D Mapping Solutions of the real German city of Lippstadt. Therefore, the scene represents a real environment. The house and the fence are composed of seven known materials: roof tiles for the roof, glass for the windows, wood for the fence, plastic for the windows frames, metal for signs, the garage door, gutter and door handle, stone for the foundation and plaster for the facade. Fig. 7 shows the unlit scene on the left with the PBR model used by UE for realistic visualization in the simulation, and the color-coded scene on the right. The color coding corresponds to the different materials.

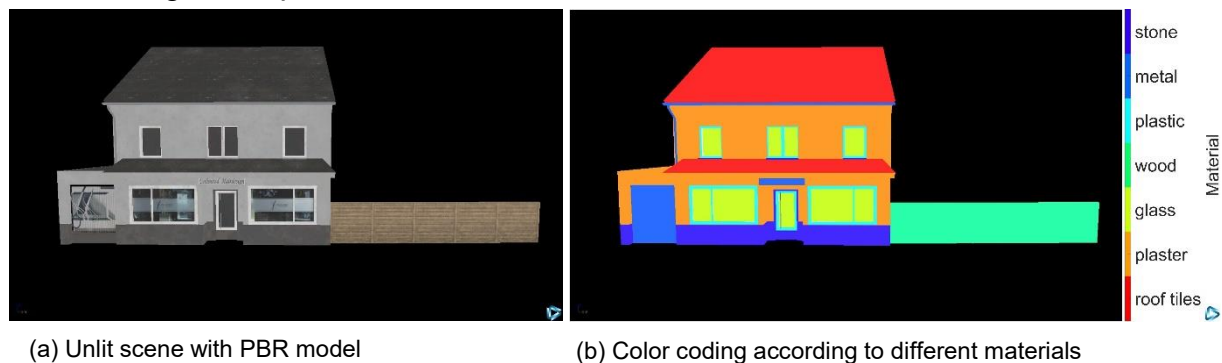


Fig. 7: Visualization of the base scene in UE

In this contribution, the headlight model with projective texture mapping presented in [7] is used with a pair of HD matrix headlamps. The pixels of each headlight are arranged in a rectangular matrix with a total number of 100,352 and an opening angle of 45° for the directional light source in UE. To analyze the effects on visual perception of automated vehicle cameras, an image is captured from a virtual camera in Unreal. This is evaluated using the latest YOLO neural network, YOLOv8 [1], as a representative of a detection algorithm for computer vision and thus a possible algorithm for the perception of automated vehicles. YOLOv8 was only trained on daytime data.

For evaluation, the relative illumination intensity of the different materials is first varied by the headlights, without objects other than the house and the fence, to observe the visual changes in human perception and the basic functionality of the algorithm. Fig. 8

shows four different illuminations of the scene. The corresponding individual relative intensities for the materials are listed in Table I. The parameters were determined empirically by successive approximation according to the authors' subjective impressions to generate the four examples in Fig. 8. A compromise between brightness and energy efficiency was aimed for. Based on the images, it is shown that depending on the different illumination the effect on the human eye and the impression varies, thus drawing attention to other elements of the scene.



Fig. 8: Camera images of the scene in UE with different illumination

TABLE I: Normalized intensity values corresponding to the images of Fig. 8

Material	Fig. 8a	Fig. 8b	Fig. 8c	Fig. 8d
Roof Tiles	0.4	0.5	0.1	0.1
Plaster	0.4	0.3	0.3	0.6
Glass	0.4	0.1	0.7	0.1
Wood	0.4	0.3	0.3	0.3
Plastic	0.4	0.1	0.2	0.6
Metal	0.4	0.2	0.2	0.2
Stone	0.4	0.5	0.2	0.2
Default	0.4	0.2	0.2	0.2

For our subjective comparison, fig. 8a displays the scene with a homogeneous light distribution with a total relative intensity of 0.4 for the matrix headlights. Due to the different materials with their different reflective properties and basic colors, some elements of the scene appear brighter and some of them darker, although everything is illuminated with the same light intensity. The attention of the human viewer is drawn to the areas where the greatest contrast is created, e.g., plastic window frames that appear bright compared to windows that appear dark. In contrast, the illumination of the scene shown in Fig. 8b has less prominent areas to the human eye, and the overall image appears more homogenous, so the attention is not drawn to specific regions. In Fig. 8c, there are more reflections on the glass windows, especially the door window, which also changes the perception compared to Fig. 8a because this highlights the glass windows and could potentially blind the human eye. The illumination of the scene in Fig. 8d emphasizes the contrast between the plastic window frames and the glass windows more than when the light intensity is homogenous, while there are fewer reflections. This creates a different perception for the human observer.

The results show that just by modifying the relative illumination intensities of the individual pixels to some extent, the perception of the scene for a human driver and other human traffic participants is different and attention can be directed to different areas. This effect could be used to target attention to safety-related objects that are already part of the scene, or to dynamic objects that are not part of the scene, such as pedestrians in front of the house. For example, a pedestrian might be more visible to human traffic participants if the background appears homogeneous or the contrast to the background is maximized. Conversely, objects irrelevant to traffic can be illuminated in such a way that they are better ignored by the human driver, but not completely out of view. In addition, glare or overexposure of the image can be prevented by selecting different intensity values for highly reflective surfaces such as glass.

To investigate how the proposed algorithm affects the visual perception of cameras of automated vehicles, a person is placed in front of the door in the scene. Then images are taken with a homogeneous intensity distribution as shown in Fig. 9a and two slightly varied illuminations as shown in Fig. 9b and Fig. 9c.

For fig. 9a, all relative intensity values are set to 0.3; for fig. 9b, all relative intensity values except for plaster are set to 0.2 and that for plaster is set to 0.4; and for fig. 9c, all relative intensity values except for plaster are set to 0.3 and that for plaster is set to 0.6. The resulting images of the scene are then analyzed using the YOLOv8 neural network. In this contribution, it is not considered that the person might be blinded by the headlights since in the authors' opinion it does not make sense to apply glare-free high beam to the person and then assess the results with a neural network that is not trained to evaluate such a situation.



(a) Homogenous pixel intensities, no detection



(b) Energy saving illumination



(c) Illumination with higher pixel intensities for plaster

Fig. 9: YOLOv8 detections at different illuminations. Confidence, bounding box and class are shown in blue if detected.

As Fig. 9a shows, the person is not detected by the daytime-trained YOLOv8 neural network with a homogenous intensity distribution. When setting the total illumination except for intensity for the plaster to 0.2 and for the plaster to 0.4, the person is detected with a matching bounding box with a confidence of 67.53%, as illustrated in Fig. 9b in blue. The confidence of Fig. 9c in blue for the detection of YOLOv8 amounts to 78.16%, also with a matching bounding box.

These results demonstrate how it is possible to significantly improve the visual perception of automated vehicles by the proposed algorithm, thus increasing safety at night. Since the number of pixels needed to illuminate the plaster amounts to less than half of all available pixels, as can be seen in Fig. 6, the second option with intensities of 0.2 and 0.4 saves energy while achieving detection with 67.53% confidence compared to no detection. By prioritizing higher confidence over energy consumption, there is also the possibility of further improving confidence, in this case to 78.16%.

The images in Fig. 9 also show that there is a need to further investigate the effects of different illuminations for machine vision algorithms, as they are different from human perception. In the authors' opinion, the detection quality for the human eye does not change as much for the slightly different illuminations as it does for YOLOv8. Since detection quality for machine vision algorithms can be quantified in numbers, such as confidence or intersection over union, rather than for humans where subject studies are required, it is possible to virtually optimize illumination for automated vehicle cameras with a cost function. In this contribution, only exemplary values for the relative

pixel intensities were chosen, so while the results are not optimized, they still achieve significant improvement. This also demonstrates the potential of optimization that could yield much better results.

4 Conclusion & Outlook

The contribution at hand proposes a novel algorithm for adjusting the illumination of the environment by HD matrix headlights to improve the detection of traffic-related objects for humans and automated vehicles. The algorithm uses known material properties of the objects in the environment so that the relative pixel intensity per material can be adjusted individually and thus, for example, the amount of reflections reflected from a material can be controlled, affecting the perception of the entire environment. This can influence the glare effect and the main area of attention of the human eye, allowing attention to be directed to traffic-relevant objects. For machine vision algorithms such as YOLOv8, the adapted illumination by the proposed algorithm can make the difference between no detection of a person and detection with a matching bounding box and 78.16% confidence. It is possible to save energy of the matrix headlight while achieving a detection with 67.53% confidence compared to no detection.

The results of manually selected, not optimized relative intensity values show the potential for optimization of illumination, especially for machine vision algorithms, since optimization could be automated without subject studies. This is also emphasized because other initial experiments show that machine vision algorithms are also affected by varying illumination of materials in areas that are not within the range of objects to be detected. Therefore, the next steps include creating a cost function to evaluate the detection quality of machine vision algorithms and building an optimization loop. Future work also includes an automated categorization of arbitrary, unknown virtual objects into materials, so that the algorithm can be used in any virtual environment without prior knowledge.

5 Acknowledgment

All 3D environment objects, e.g. trees and houses, of this contribution, were created by 3D Mappings Solutions. This work is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action as part of the AHEAD project (grant number: 19A21021C), which is a collaboration with Forvia-Hella and 3D Mappings Solutions. The responsibility for the content of this publication lies with the authors.

6 References

- [1] Ultralytics (Ed.), “YOLOv8”, available at <https://github.com/ultralytics/ultralytics>, Visited: 2023-05-08

- [2] Epic Games (Ed.), “Unreal Engine 5”, available at <https://www.unrealengine.com/en-US/unreal-engine-5>, Visited: 2023-05-08
- [3] B. Burley, “Physically Based Shading at Disney”, SIGGRAPH, 2012
- [4] M. Sega, C. Korobkin, R. van Widenfelt, J. Foran and P. Haeberli, “Fast Shadows and Lighting Effects Using Texture Mapping”, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Volume 26, pp. 249-252, 1992
- [5] P. Lecocq, J. Kelada and A. Kemeny, “Interactive Headlight Simulation”, Renault Direction de la Recherche – Research Department, 2004
- [6] M. Waldner and T. Bertram: Feedforward Control of HD-Headlights for Automated Driving, 14th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL) 2021, 04.-06.04.2022
- [7] N. Müller, M. Waldner and T. Bertram, “Virtual Development and Optimization of High-Definition Headlights”, International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), 2022

Blendungsvermeidung bei nächtlichen Fahrten durch adaptive Steuerung der Heckleuchten an Fahrzeugen

Markus Alexander Peier, M.Sc., Julian Kunkel, M.Sc., Dr.-Ing. Babak Zandi, Anil Erkan, M.Sc., David Hoffmann, M.Sc., Korbinian Kunst, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Kurzfassung

Neue technologische Möglichkeiten, die durch die Einführung von LEDs in Fahrzeugheckleuchten entstehen, haben das Design von Heckleuchten revolutioniert und ermöglichen deutlich kleinere Heckleuchten als früher. Die gesetzlichen Anforderungen berücksichtigen diese Möglichkeiten bislang nur bedingt. Insbesondere zur Einführung der LEDs beklagten viele Autofahrer¹ gegenüber dem ADAC, dass sie sich durch die Heckleuchten mit LED-Technologie des vorausfahrenden Verkehrs geblendet fühlen, obwohl diese normgerecht ausgelegt sind.

Studien mit Probanden zeigen, dass gerade im nächtlichen Straßenverkehr für das Bremslicht geringere Lichtstärken erforderlich sein können als in den ECE-Richtlinien aktuell vorgesehen ist. Dabei gibt es Unterschiede zwischen statischen und dynamischen Untersuchungen. Bei Letzteren kann sich der Schwellwert der optimal empfundenen Lichtstärke erhöhen.

In dieser Arbeit werden vier Studien zur Helligkeits- und Blendbewertung von Heckleuchten analysiert und miteinander verglichen

Index Terms: Adaptive Heckleuchten, Blendung, nächtlicher Straßenverkehr, Kfz-Lichttechnik

¹ Aus Lesbarkeitsgründen wird in dieser Arbeit das generische Maskulin verwendet. Gemeint sind jedoch Personen aller Geschlechter.



1 Motivation

Dienten Heckleuchten früher nur der Vermittlung von Informationen an den nachfolgenden Verkehr ergaben sich durch die Einführung der LED neue Gestaltungsmöglichkeiten im Design. Dadurch wurden Heckleuchten zu einem Designelement, welches die Identifikation einer Fahrzeugmarke auch in nächtlichen Situationen ermöglichen soll. Insbesondere kleinere Geometrien wurden durch die Einführung der LED möglich, was jedoch dazu führte, dass andere Verkehrsteilnehmer unter mesopischen Adaptationsbedingungen vermehrt Blendung wahrnahmen. [1]

Man unterscheidet dabei zwischen physischer und psychologischer Blendung. Physiologische Blendung beschreibt dabei eine messbare durch eine Blendquelle hervorgerufene Minderung der Sehleistung, während psychologische Blendung nur eine empfundene Störung beziehungsweise ein Unbehagen hervorruft [2]. Da bei den in dieser Studie analysierten Studien lediglich die Empfindung der Probanden ausgewertet wurde, kann von hauptsächlich psychologischer Blendung ausgegangen werden.

Bereits 2015 führte der ADAC gemeinsam mit dem LTI am KIT eine Studie durch, um zu überprüfen, ob LEDs tatsächlich zu mehr Blendung führen. Dazu wurde ein Probandentest mit 50 Personen im Alter zwischen 19 und 74 Jahren in einer nachgestellten Ampelszene durchgeführt. Die Tests konnten keinen Zusammenhang zwischen der höheren Blendung und den LEDs feststellen [1]. Es stellt sich daher die Frage, woher der erhöhte Blendeindruck für viele Autofahrer kommt und wie Blendung zukünftig vermieden werden kann.

In den gesetzlichen Richtlinien ist der Lichtstärkebereich für die einzelnen Signalfunktionen wie Bremsleuchte, Fahrtrichtungsanzeiger und Schlussleuchte geregelt. Im Geltungsbereich der ECE wird zwischen zwei Bereichen für statische und dynamische Lichtstärkeanforderungen unterschieden. Die entsprechenden Minima und Maxima sind in Tabelle 1 dargestellt. Während der Minimalwert gleich bleibt, ist der Maximalwert für statische Leuchten (S1, S3, 2a und R1) niedriger als der Maximalwert für dynamische Leuchten (S2, S4, 2b und R2). [2, 3, 4, 5]

Tabelle 1 - Vergleich der verschiedenen Lichtstärkegrenzwerte der ECE-Regelungen für die verschiedenen Rückleuchtenfunktionen. [2, 3, 4, 5]

Signalfunktion	Regelung	Minimale Lichtstärke I_{min} / cd	Maximale Lichtstärke I_{max} / cd	Lichtfarbe
Bremslicht	ECE S1	60	260	rot
	ECE S2	60	730	rot

Oberes Bremslicht	ECE S3	25	110	rot
	ECE S4	25	160	rot
Fahrtrichtungs- anzeiger	ECE 2a	50	500	gelb
	ECE 2b	50	1000	gelb
Hintere Positions-leuchte	ECE R1	4	17	rot
	ECE R2	4	42	rot

In dieser Arbeit werden vier am Fachgebiet Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung durchgeführte Studien ausgewertet und miteinander verglichen. Die Leitfrage hierbei ist, den Schwellwert der Blendung zu ermitteln und zu analysieren, ob diese durch eine dynamische Dimmung der Heckleuchten bei Nacht vermieden werden kann.

2 Bisherige Studien

Am Fachgebiet für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung wurden vier unterschiedliche Studien zur Untersuchung der optimal empfundenen Helligkeit von Heckleuchten durchgeführt. Diese können in zwei Kategorien unterteilt werden: Auf der einen Seite eine statische Studie von Schneider [6] auf der anderen Seite dynamische Studien von Ries [7, 8] und Ripperger [9] in denen die Probanden während der Studien im öffentlichen Straßenverkehr fahren.

Hinzu kommt eine statische Studie von Birkenbach [10], welche sich mit der Blendschwelle bei der Betrachtung von Heckleuchten beschäftigt. Diese werden im Nachfolgenden näher beschrieben.

2.1 Studienabläufe

2.1.1 Schneider 2014

In der durch Schneider [6] durchgeführten statischen Untersuchung wurden nach Einbruch der Dunkelheit auf einem Testgelände zwei Fahrzeuge im Abstand von 5 m, 20 m, 50 m und 100 m hintereinander platziert. Hinter dem vorderen Fahrzeug befanden sich zwei Stative auf denen Heckleuchten drei unterschiedliche Heckleuchten-Modelle² abwechselnd montiert wurden (siehe Abbildung 1). Diese wurden so modifiziert, dass sie über eine PWM-Ansteuerung in ihrer Intensität gedimmt werden konnten.

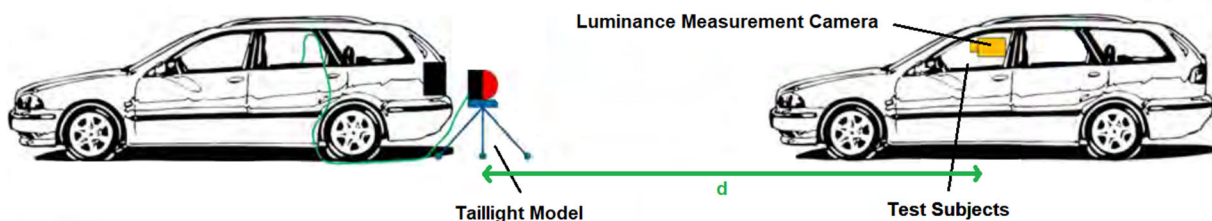


Abbildung 1 – Testaufbau der Studie von P. Schneider [6]

Die Probanden saßen im hinteren Fahrzeug und bekamen die Leuchten bei unterschiedlichen Lichtstärken präsentiert und mussten diese mittels 9-Stufiger Bewertungsskala bewerten.

An der Studie nahmen 22 Versuchspersonen im Alter von 23 bis 77 Jahren teil.

2.1.2 Birkenbach 2016

² Aufgrund der Neutralität wird auf eine Nennung der expliziten Modelle verzichtet.

Die Studie von Birkenbach [8] wurde ebenfalls unter statischen Bedingungen durchgeführt. Auch hier wurden zwei Fahrzeuge hintereinander aufgestellt und die Abstände zwischen den Fahrzeugen zwischen 3 m, 15 m, 65 m und 100 m variiert. Im Gegensatz zu der Studie von Schneider wurde in dieser Studie nicht nach der optimalen Helligkeit der Heckleuchten, sondern nach der subjektiv empfundenen psychologischen Blendung gefragt. Die Probanden bewerteten die gezeigten Lichtreize einer dimmbaren Bremsleuchte mit „blendend“ oder „nicht blendend“. Birkenbach befragte 26 Probanden im Alter zwischen 21 und 64 Jahren.

2.1.3 Ries 2016/2017

In der Studie von Ries [9, 10] wurde die optimale Helligkeit einer Bremsleuchte in einem dynamischen Test untersucht. Neben der Bewertung der Bremsleuchte mussten die Probanden auch die Fahraufgabe übernehmen. Auf einer ausgewählten Landstraße ohne Straßenbeleuchtung und Umgebungsbebauung sowie wenig frequentiertem Verkehr im Umkreis von Darmstadt fuhren die Probanden mit einem Abstand von 35 m mit einer konstanten Geschwindigkeit von 70 km/h dem Testfahrzeug hinterher. Die Einhaltung des vorgeschriebenen Abstandes wurde mittels GPS überprüft. Auch hier wurden unterschiedliche Lichtstärken gezeigt und von den Probanden auf ihren Helligkeitseindruck hin bewertet. An dieser Studie nahmen 10 Probanden im Alter von 22 bis 26 Jahren teil.

2.1.4 Ripperger 2001

Ripperger [7] führte eine dynamische Feldstudie durch. In seiner Studie fuhren zwei Fahrzeuge auf einem 60 km langen Rundkurs mit einer konstant gehaltenen Geschwindigkeit von 50 km/h. Als Strecke dienten unbeleuchtete Straßen außerorts.

Das vordere Fahrzeug wurde mit einem Leuchtenpaar ausgestattet, welches aus zwei 100 cm² großen, quadratischen Kammern mit homogen leuchtender Fläche bestand. Diese wurden zusätzlich durch schwarze Umfeldblenden eingerahmt.

Die Probanden fuhren die Strecke jeweils 4-mal als Fahrer und als Beifahrer. Bei jeder Runde wurden 17 Bremsungen durchgeführt, zu denen sowohl Fahrer als auch Beifahrer mittels Fragebogen zur Helligkeit befragt wurden. Die abgefragten Antwortmöglichkeiten waren hierbei „zu dunkel“, „optimal“ und „zu hell“. Insgesamt nahmen an seiner Studie 10 Personen im Alter zwischen 23 und 29 Jahren teil.

3 Vergleich der Studienergebnisse

Für den Vergleich der Studienergebnisse sind die ermittelten Schwellwerte für das Bremslicht am relevantesten einzustufen, da bei dieser Lichtfunktion Blendung mit einer höheren Wahrscheinlichkeit auftreten kann.

3.1 Studienergebnisse

Die Ergebnisse der Studien sind in Abbildung 2 aufgetragen. Die Ergebnisse der mit Mittelwerten berechneten optimalen Helligkeiten von Schneider [6] (in grün dargestellt) zeigen, dass die optimal empfundene Helligkeit für das Bremslicht im Nahbereich bis 50 m mit zunehmendem Abstand steigt. Ab ca. 50 m erreicht die optimale Helligkeit einen Sättigungsbereich. Bei einem Abstand von 5 m liegen die durch die Probanden angegebenen optimalen Lichtstärken für die verwendeten Bremslichter der Heckleuchten Schneider 1 und Schneider 3 sogar unterhalb des Minimalwertes der ECE-Regelungen.

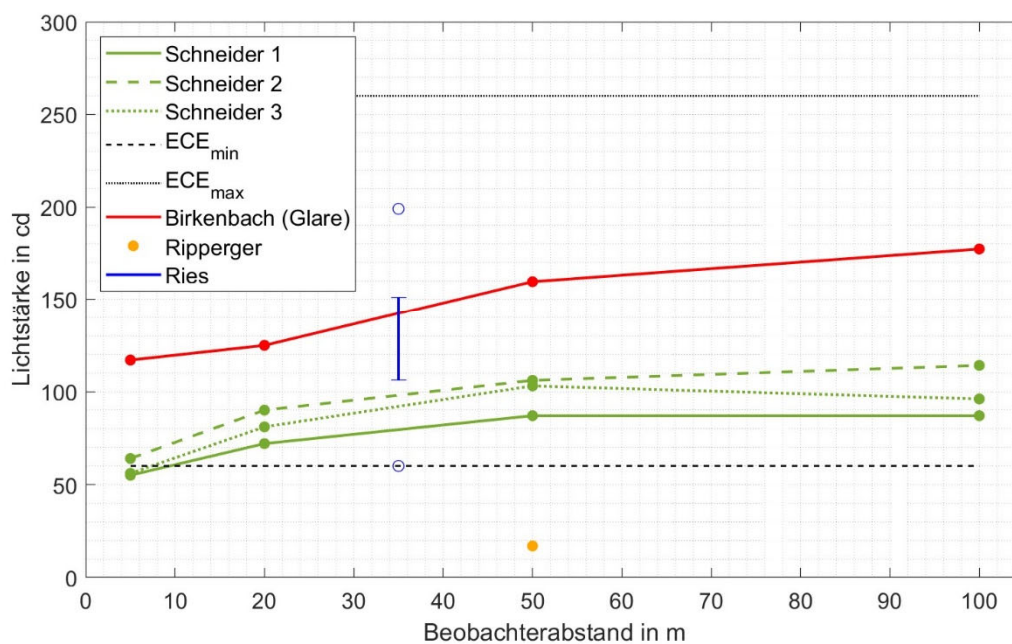


Abbildung 2 – Vergleich der Studienergebnisse von Schneider [6], Birkenbach [8], Ripperger [7] und Ries [9, 10] für die Lichtstärke eines Bremslichtes, aufgetragen über den Beobachterabstand.

Auch die Mittelwerte der von Birkenbach [8] angegebenen Blendschwellen beschreiben mit zunehmender Entfernung einen Anstieg der Blendschwelle. Im Gegensatz zur optimalen Helligkeit zeichnet sich hier jedoch keine Sättigung ab.

In der Studie von Ries wurde ein höherer Bereich für die optimale Lichtstärke als in den statischen Ergebnissen von Schneider angegeben. Bei Ripperger weichen die Ergebnisse von den anderen Studien ab. Hier liegt die optimale Lichtstärke in einer Entfernung von 50m, weit unterhalb der zulässigen minimalen Lichtstärke aus der ECE-Regelung.

4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse von Birkenbach deuten darauf hin, dass die Blendschwelle mit geringerem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug abnimmt. Befindet sich das Fahrzeug eines Probanden in einem Abstand von 3 m hinter dem Fahrzeug, wie es in einer Ampelsituation der Fall sein kann, so kann dies unter Berücksichtigung des Mittelwertes zu einer Blendempfindung der untersuchten Population führen. Bei einem Abstand von mehr als 50 m liegt die gleiche Lichtstärke jedoch unterhalb der ermittelten Blendschwelle nach Birkenbach. Die durch die ECE-Regelung zulässige maximale Lichtstärke liegt bei allen Abständen über der von Birkenbach ermittelten Blendschwelle. Dies deutet darauf hin, dass bei ungünstig ausgelegten geometrischen Größen der Lichtfunktionen Blendung möglich ist, obwohl die ECE-Normen eingehalten werden.

Die als optimal empfundenen Lichtstärkewerte nach Schneider weichen vom Maximum noch weiter ab und unterschreiten bei 5 m teilweise sogar die Minimalschwelle. Die Ergebnisse von Ries weichen von den übrigen Studienergebnissen ab. Die höhere Lichtstärke kann dadurch erklärt werden, dass die Probanden in diesem Versuch zusätzlich zur Bewertung auch noch eine Fahraufgabe absolvieren mussten. Dies wiederum kann dafür sorgen, dass sich die Blickverteilung des Fahrers verschiebt, wohingegen sich die Probanden bei den anderen Studien lediglich auf die Heckleuchten des vorausfahrenden Fahrzeugs konzentrieren mussten.

Bei Ripperger wurden im Vergleich zu den anderen Studien keine echten Heckleuchten untersucht. Durch die homogene Leuchtfläche und die dunklen Abgrenzungen scheinen diese Ergebnisse nicht mit den Ergebnissen mit für den Straßenverkehr zugelassenen Heckleuchten vergleichbar zu sein.

5 Fazit

Die in dieser Arbeit vorgestellten Studien deuten darauf hin, dass die Blendschwellen und die als optimal empfundene Bremslichthelligkeit unterhalb der maximal zulässigen Lichtstärke liegen können. Dies bedeutet, dass es im nächtlichen Straßenverkehr mit zugelassenen Heckleuchten unter bestimmten Voraussetzungen zu Blendung kommen kann, insbesondere in innerstädtischen Situationen in denen der Abstand zwischen Fahrer und den Heckleuchten eines vorausfahrenden Fahrzeugs gering ist.

Um die Blendung durch Heckleuchten zu vermeiden kann es sinnvoll sein, die Heckleuchtenfunktionen durch adaptive Steuerung auf die entsprechende Situation anzupassen. So könnte zum Beispiel ein Fahrzeug, welches erkennt, dass es gerade an einer Ampel steht und ein Fahrzeug hinter sich befindet, das Bremslicht dimmen und somit für eine bessere Sichtbarkeit der Umgebung für den nachfolgenden Fahrer sorgen.

Die Ergebnisse von Ries deuten darauf hin, dass mit einer zusätzlichen Fahraufgabe sich die Schwellwerte für die als optimal empfunden Helligkeit erhöhen. Es sind daher weitere dynamische Untersuchungen notwendig, um diese Erkenntnisse zu validieren und zu vertiefen.

Die Unterschiede in den drei Kurven von Schneider sowie die davon abweichenden Ergebnisse von Ripperger deuten auf einen Einfluss der geometrischen Form der Heckleuchte hin. Insbesondere die Größe der leuchtenden Fläche scheint sich auf die Blendschwelle auszuwirken. Daher schlussfolgern wir aus den Ergebnisse, dass die Untersuchung der flächenabhängigen Blendschwellen ein relevantes Forschungsfeld ist für zukünftige Studien.

6 Referenzen

- [1] P. Jahn, D. A. M. Helmer und C. Neumann, „Glaring effects of stop lamps in LED or incandescent bulb technology,“ *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Nr. 11, p. 698–706, 2015.
- [2] S. Völker, *Blendung durch Kfz-Scheinwerfer im nächtlichen Straßenverkehr*, Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2017.
- [3] Uniform provisions concerning the approval of front and rear position lamps, stop-lamps and end-outline marker lamps for motor vehicles (except motor cycles) and their trailers, Regulation No. 7, Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE), 2012.

- [4] Uniform provisions concerning the approval of direction indicators for power-driven vehicles and their trailers, Regulation No. 6, Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE), 2014.
- [5] Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices, Regulation No. 48, Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE), 2014.
- [6] Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS108), National Highway Traffic Safety Administration, 2011.
- [7] P. Schneider, „Investigation of the photometric characteristics of automotive rear lamps as a function of driving distances and ambient brightnesses,“ Master Thesis, Fachgebiet Lichttechnik, TU Darmstadt, Darmstadt, 2014.
- [8] Ries, „Assessment of the brightness of rear lamps in dynamic driving situations,“ Bachelor Thesis, Fachgebiet Lichttechnik, TU Darmstadt, Darmstadt, 2016.
- [9] C. Ries, D. Polin, C. Schiller und T. Q. Khanh, „Evaluation of Rear Lights in Driving Situations,“ *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*, Bd. 12, pp. 529-536, 2017.
- [10] J. Ripperger, „Photometric requirements for taillights and stop lamps for automotive vehicles,“ Ph. D. Thesis, Fachgebiet Lichttechnik, TU Darmstadt, Darmstadt, 2001.
- [11] S. Birkenbach, „Study regarding the brightness of taillights,“ Student Research Project, Fachgebiet Lichttechnik, TU Darmstadt, Darmstadt, 2016.
- [12] P. Rabenau, „Lighting and technological aspects for the dimensioning of adaptive OLED taillights in automobiles,“ Ph. D. Thesis, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Darmstadt, Darmstadt, 2019.

Automated and Repeatable Homogeneity Calculations on Simulated and Measured Luminance Fields

Anil Jean Pekköz¹, Jannes Buthmann^{1*}

¹ Team Licht & Sicht, EDAG Engineering GmbH, Birnbaumstücke 5, 38448 Wolfsburg, Deutschland

*Corresponding Author: jannes.buthmann@edag.com

Abstract

In the field of light system engineering, evaluating the performance of the developed device with various tests is as crucial as the development process. The homogeneity performance is one of the tested criteria which plays a significant role for customer satisfaction. To be able to validate the quality of a luminance distribution in a lighting system multiple methods has been developed. These methods which have different use-cases in terms of the evaluation are connected with one similarity - time consuming and with a need of a lot of effort which needs to be spend for the calculation. This issue is caused since the fact that a result with high accuracy is almost impossible to achieve with the conventional methodology of by-hand evaluation. Therefore, an exceptionally good assessment of uniformity for user satisfaction is hard to accomplish. In this project, we developed a program which can perform complex calculations in a semi-automated manner with the highest precision possible, limited by only the finite nature of provided images for the calculations.

Index Terms: Light System Engineering, Homogeneity Analysis, Automated Calculations, Diekmann-Gerloff Method

1 Introduction

In light engineering, many aspects such as physical integrity, production feasibility and light uniformity are tested throughout the development process of a light device. These tests are performed to ensure the user's safety and producibility.

The uniformity of emitted light distribution has a crucial role in the produced light shape and characteristics for interior-light systems are also playing a part in user satisfaction and well-being [1]. Therefore, there have been methods [1-3] and standardization to calculate the uniformity of light distribution. However, the applicability of these standardizations and methods are cumbersome since the non-standard shapes and capturing method. Consequently, uniformity calculations are done mostly by hand.



Furthermore, to save time in those by-hand-calculated results, the arrays are discretized into blocks via downsampling [4] to an array with fewer elements to shorten the calculation time needed, thus lowering the accuracy of the result.

With this in mind, we are proposing a program which can deploy various methods of calculation automatically via automatic field detection [5, 6] and morphological operations [7]. Moreover, since the calculations are based on hardware computation rather than by-hand calculations, the discretization can be reduced to the discrete limitation on a single pixel. Therefore, the calculations do not lack accuracy due to outside factors. Furthermore, the mathematical model implementation allows the user to integrate custom mathematical models which fulfill the user's/customer's requirements on uniformity.

2 Methods

Python has been used as the main programming language since its simple yet powerful nature in the field of image processing. Moreover, the Global Interpreter Lock (GIL) [8] which limits the usable threads has been bypassed for the most demanding process via the Low Level Virtual Machine (LLVM) [9] with parallel computing implementation. Therefore, execution time was almost the same as in other compiled languages.

A total of 7 standardized methods are used in the program 5 of them are standards from light system engineering on cars [1], 1 of them is a standard in display engineering [2,3] and the last one is a custom bundle of smaller methods from an OEM. The methods of light system engineering on cars are depicted in Table 1.

GK _x (Implemented as)	Equation	Description
$GK_1 (M_1)$	$\log\left(\frac{L_{max}}{L_{min}}\right)$	The method GK_1 calculates the uniformity with the logarithmic human perception in mind [6].
$GK_2 (M_2)$	$\frac{L_{max} - \bar{L}}{\bar{L}}$	The method GK_2 calculates the difference ratio between the maximum and the mean relative to the mean [1].
$GK_3 (M_3)$	$\frac{L_{max} - L_{min}}{\bar{L}}$	The method GK_3 is called the <i>Relative Percentage Difference</i> (RPD) [10] and represents the ratio between the <i>range</i> and the <i>mean</i> .
$GK_7 (M_4)$	$\frac{\sigma_L}{\bar{L}}$	The method GK_7 calculates the dispersion of values around the mean and is called the <i>Coefficient of Variation</i> [1, 11].
$GK_8 (M_5)$	$\sqrt{\sum_{\alpha=x,y} \left(\frac{\Delta S_{\alpha,n}}{\Delta \alpha_n}\right)^2}$	The method GK_8 calculates the normalized distance between the geometric and photometric centers [1].

Table 1: the standardized methods used in developing light systems for cars. The method names are shown with the standardized name and the name as implemented in the program. The equation and their basic descriptions are also provided.

The most interesting method mentioned in Table 1 is the GK_8 method since it uses more information to calculate the uniformity of the luminance distribution than the other methods.

Another method that is a standard in another field is the H_{mean} method [2,3] where a gradient-like approach was used. This method originates from benchmarking display's light uniformity. However, since some signal functions such as position light, daytime running light or interior lighting features are designed to signal or display a pattern rather than to illuminate areas other than the light source, this method can be used to evaluate those areas. Nevertheless, for the directly illuminating light devices, the light projection taken by a 3D Goniometer can be also used to evaluate the produced light. The equation is depicted at Eq. 1.

$$H_{mean} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(\sum_{i^* > i}^N \sum_{j^* > j}^M \left| \frac{L_{ij} - L_{i^*j^*}}{(r_{ij} - r_{i^*j^*})} \right| \right)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(\sum_{i^* > i}^N \sum_{j^* > j}^M \left| \frac{L_{mean}}{(r_{ij} - r_{i^*j^*})} \right| \right)} \quad (\text{Eq. 1})$$

The main challenge with H_{mean} is the permutative behavior which causes the exponential increase of vectors that must be calculated. Therefore, the general approach is to discretize the image in large areas to decrease the points. Nonetheless, in our approach, we are able to use every pixel to calculate the H_{mean} with the highest accuracy. Table 2 provides the vectors needed to calculate the H_{mean} for different situations.

Image size	500 × 500	1000 × 1000	1500 × 1500	3000 × 3000
(% Coverage)	(50%)	(50%)	(50%)	(50%)
# of Vectors	1.56×10^{10}	2.49×10^{11}	1.26×10^{12}	2.02×10^{13}

Table 2: Needed vectors for calculating the H_{mean} in different situations. The needed vectors are increasing exponentially since the permutative behavior between pixels in the calculations.

Another aspect of the program is the semi-automated area recognition for the calculation. This is provided by the different morphological operations [10] and local labeling algorithms. The local labeling algorithms are used to locate different areas. However, the false-positive fields induced by noise or by complex structure are dealt with a combination of morphological operators.

3 Results and Discussion

As the input, the EDAG's illuminated emblem shown in Figure 1 is used. The size of the luminance array is 2051 by 2449 with a precision of float-64 bit and the coverage in total is 48%. In the image, there are 4 separate areas to be calculated.

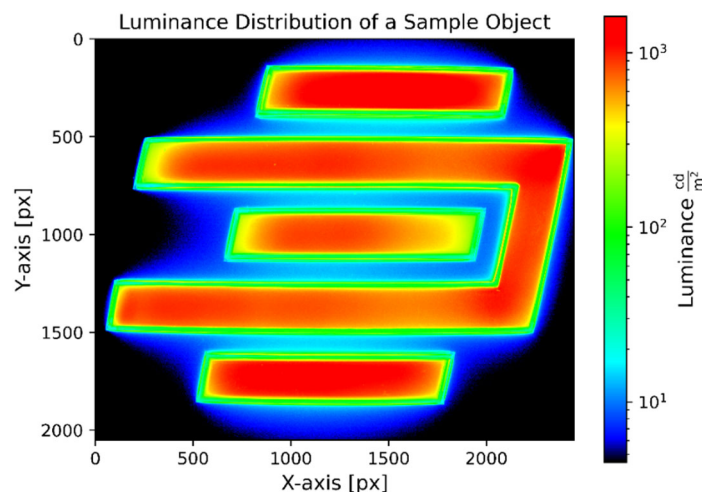


Figure 1: Input luminance image of the EDAG Emblem

The first step is to apply a global noise threshold predefined by the user. The noise-eliminated array is then used to apply the local labeling algorithm mentioned in the *Methods Section*. The resulting image with percentage filtration, where all areas which are smaller than a defined percentage of the total area are eliminated, is depicted in Figure 2.

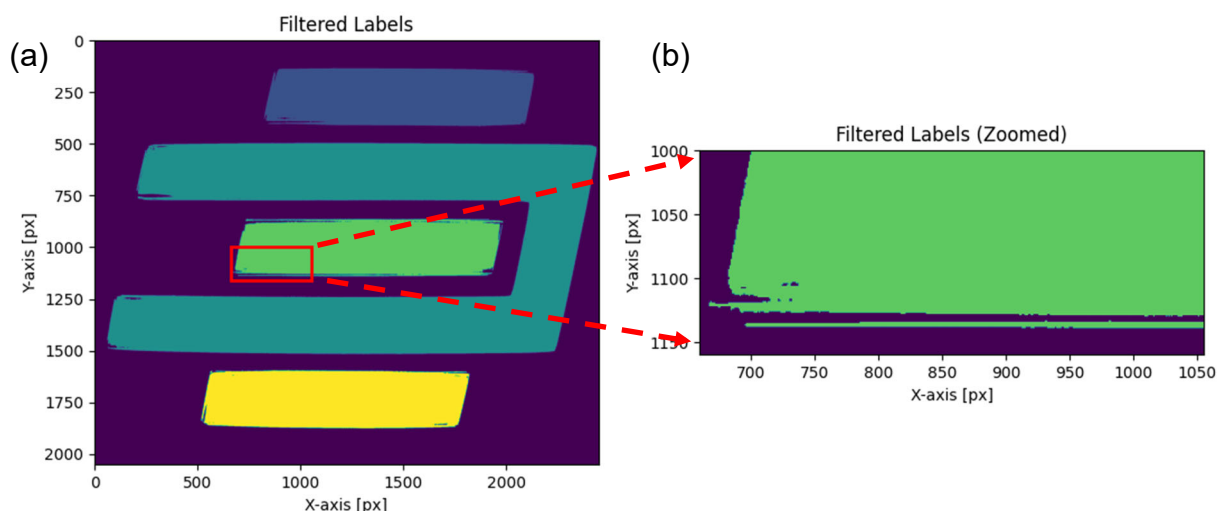


Figure 2: **A**, The filtered labels. The array now consists of 4 labels which can be addressed with a number and be called whenever a specific test has to be done. **B**, A zoomed portion of the filtered image to show the rough edges which are not optimal for further calculations. The zoomed portion is marked as the red box in Fig.2A.

The rough edges are fixed with an iterative Morphological Operations (MOs) which modifies the topology of the label till a relatively smoother edge has been archived.

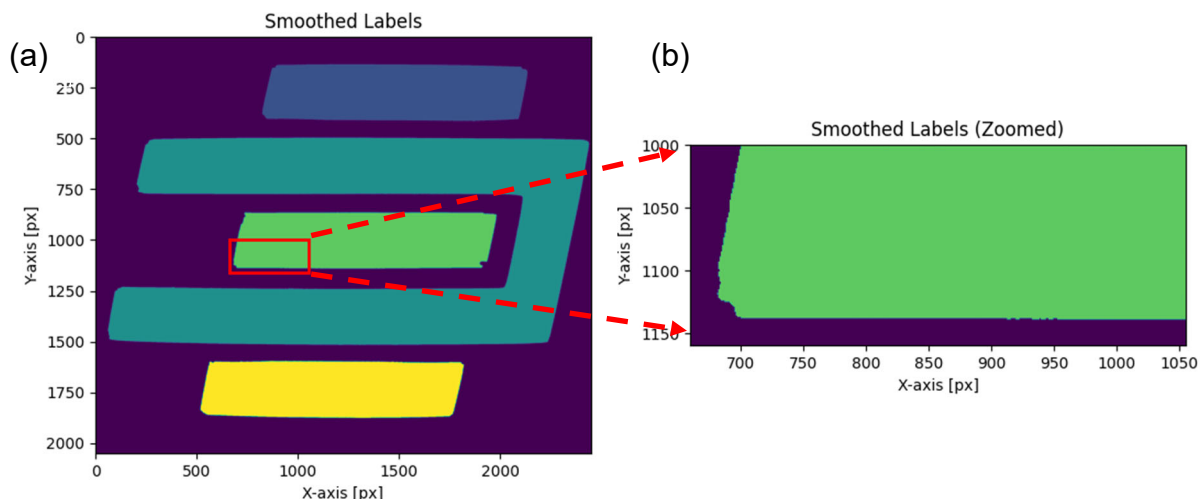


Figure 3: **A**, The same filtered image with MOs applied. **B**, The same zoomed spot as the Fig.3B to with the MOs applied. The difference in smoothness is visible.

The resulting labels array is now ready to be used as a map for the luminance array. Methods such as H_{Mean} and GK_x are applied sequentially for each label. The parallel acceleration is used for H_{Mean} since the other methods are mostly iteration-dependent.

At the end, the uniformity results are presented as a table where the columns are representing the method and the rows representing the labels. The result for this input image is depicted in Table 3.

Labels (from larger to smaller)	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	H_{Mean}
#2	208.46	1.7	1.23	4952.88	0.02	75.65%
#1	222.81	1.4	5.46	575.91	0.01	68.22%
#3	164.41	1.27	0.73	1035.06	0.03	69.22%
#4	205.85	1.29	0.68	638.7	0.02	71.49%

Table 3: The results calculate for each label by different methods. The rows are sorted from the largest area to the smallest.

The interpretation for each method is quite complex since each method represents a different aspect analytically. Moreover, there are some false-positive results for the GK_x methods for some numerical cases. Therefore, a whole new detailed study on those themes should be conducted to find the best combination of the GK_x methods and what should be *correctly* understood by those values. However, there is a detailed reference table for the H_{Mean} values depicted below.

Uniformity	The visual interpretation of the illuminated surface
100% - 80%	Highly uniform. No brightness change on the surface can be detected by a human observer.
80% - 60%	Uniform. The change in brightness on the surface can be detected but it is not disturbing for the human observer.
60% - 40%	Non-uniform. The change in brightness on the surface is disturbing.
Lower than 40%	Very non-uniform.

Table 4: A reference table for the H_{Mean} value [2, Translated].

Referencing this table, it is possible to make a quick statement from the gotten results. Moreover, it is also possible to reference old revision to see if the values are gotten better by the new revision.

4 References

- [1] Gocke, Tim: Objektivierete Homogenitätsbewertung des Erscheinungsbildes automobiler Signalleuchten, 01.01.2013, [online] doi:10.22032/dbt.39795.
- [2] Gerloff, Thorsten/Dirk Friedrich/Karsten Diekmann: Die Leuchtdichtehomogenität von Organischen Leuchtdioden (OLEDs), in: AUSGEWÄHLTE THEMEN DER LICHTMESSTECHNIK, Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LiTG), no. 27, 2015, https://www.litg.de/media/19235.27_Lichtmesstechnik_Download, pp. 16-24
- [3] Hupe, Christoph: Homogenitätsbewertung flächiger Lichtquellen und Leuchten, Lux Junior/TU Ilmenau, 2013, [online] https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/Bereiche/MB/lichttechnik/Literatur/2013/Hupe_Luxjunior_2013.pdf.
- [4] Digital Signal Processing First, Global Edition: 2nd. ed., Pearson, 01.01.2015
- [5] Chaki, Nabendu/Soharab Hossain Shaikh/Khalid Saeed: Exploring Image Binarization Techniques, in: Studies in computational intelligence, Springer Nature, 01.01.2014, [online] doi:10.1007/978-81-322-1907-1.
- [6] Wu, Kesheng/Ekow Otoo/Arie Shoshani: Optimizing connected component labeling algorithms, in: Proceedings of SPIE, SPIE, 29.04.2005, [online] doi:10.1117/12.596105.
- [7] Soille, Pierre: Morphological Image Analysis, in: Springer eBooks, 01.01.2004, [online] doi:10.1007/978-3-662-05088-0.
- [8] Beazley, David: Understanding the Python GIL, PyCon Conference, 2010, [online] <http://www.dabeaz.com/>.
- [9] The LLVM Compiler Infrastructure Project: n.d., [online] <https://llvm.org/>.

- [10] Cole, Tim J/Douglas G. Altman: Statistics Notes: What is a percentage difference?, in: BMJ, BMJ, 16.08.2017, [online] doi:10.1136/bmj.j3663, p. j3663.
- [11] Everitt, Brian/Anders Skrondal: The Cambridge Dictionary of Statistics, 4. ed., Cambridge University Press, 2010, [EBook]
<https://www.cambridge.org/9780521766999>.

Beleuchtung als Einflussfaktor für eine tiergerechte Mastputenhaltung

G. Raveendran*, K. Homeyer*, J. Raabe**, T. Bartels**, R. Lachmayer***

Organisation:

*Hochschule Hannover, Fakultät I - Elektro- und Informationstechnik; **Friedrich-Loeffler-Institut, Institut für Tierschutz und Tierhaltung; *** Leibniz-Universität Hannover, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Optimierung des Lichtmanagements in der Haltung von Mastputen“ (OptiLiMa) wird der Einfluss der Stallbeleuchtung auf das Verhalten von Mastputen untersucht. Dafür wird eine LED-Vollspektrumbeleuchtung mit Wellenlängen vom UVA-Bereich bis zum sichtbaren Licht sowie ein automatisches Tierbeobachtungssystem mittels KI-videobasierter Objekterkennung entwickelt. Im Fokus der Untersuchungen steht dabei ein bislang wenig untersuchter möglicher Haltungsfaktor, der Einfluss der Beleuchtung auf das Verhalten von Mastputen. Getestet wurde einerseits die Auswirkung von Flimmerfrequenzen mit 165 Hz, 500 Hz und 16 kHz sowie andererseits unterschiedliche Lichtspektren im für Menschen sichtbaren Bereich mit und ohne einen zusätzlichen UVA-Anteil. Die von den Puten bevorzugten Aufenthaltsbereiche im Maststall wurden analysiert. Zusätzlich wurde in Federproben die Konzentration von Corticosteron gemessen, um die Effekte der verschiedenen Flimmerfrequenzen auf die Langzeitsekretion dieses Stresshormons als Reaktion auf die Umgebungsbedingungen zu erfassen. Ziel der Studie ist es, Parameter für eine den Haltungsansprüchen von Mastputen gerecht werdende Stallbeleuchtung zu bestimmen, die ggf. zur Verbesserung des Tierwohls beitragen kann.

Index Terms: Künstliche Intelligenz, 24/7 Tierversorgung, Digitalisierung in der Putenhaltung

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln der Landwirtschaftlichen Rentenbank



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



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

1 Einleitung

Tierhalter sind laufend bemüht, die Haltung der Tiere zu verbessern, um einerseits Gesundheit und Wohlbefinden der Tiere zu erhalten, andererseits aber auch die Tierhaltung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu optimieren. Beschädigungspicken durch Artgenossen ist immer noch eine große Herausforderung in der Putenmast, die Tierverluste der Putenhalter liegen bei bis zu 10 %, was neben dem Leid der Tiere auch zu hohen finanziellen Einbußen führen kann.

Die Stallautomation bietet zahlreiche Möglichkeiten, diese Prozesse (Fütterungsprozess, Versorgung der Tränke etc.) mit minimalem Arbeits- und Ressourcenaufwand optimal zu gestalten. Unerwünschte Verhaltensweisen, wie z.B. Beschädigungspicken („Kannibalismus“), können nur durch intensive Beobachtung durch den Tierhalter frühzeitig erkannt und ggf. verhindert werden, technische Geräte können den Menschen und seine persönliche Wahrnehmung derzeit noch nicht ersetzen. Beschädigungspicken unterliegt multifaktoriellen Einflüssen, die schwer zu trennen sind, wobei agonistische Verhaltensweisen wie Rangordnungskämpfe bei Wildputen aber auch bei ihren domestizierten Abkömmlingen zum Normalverhalten gehören und keineswegs als Verhaltensstörungen anzusehen sind [2]. Anders als unter intensiven Haltungsbedingungen, in denen einzelne Tiere schwere Verletzungen durch Artgenossen erleiden können oder sogar zu Tode kommen, verlaufen Rangordnungskämpfe zwischen Wildtruthühnern in freier Wildbahn in der Regel harmlos und ohne Schäden [2].

Auch Beleuchtungssituation und Lichtverhältnisse können das Verhalten und das Stressniveau von Puten beeinflussen. Konventionelle Leuchtstoffröhren werden auch in der Stallbeleuchtung zunehmend durch innovatives Licht emittierende Dioden (LED) ersetzt. Der Einfluss dieser LEDs, insbesondere die Rolle der Flimmerfrequenzen auf die Pute, ist wenig untersucht, obwohl allgemein bekannt ist, dass das zeitliche visuelle Auflösungsvermögen bei Vögeln wesentlich höher ist als bei Menschen. Rechtliche Vorgaben und Empfehlungen fordern, Puten unter Licht mit einer Flimmerfrequenz von mehr als 160 Hz zu halten. Doch worauf basiert diese Mindestanforderung an die Flimmerfrequenz und ist sie ausreichend für das visuelle Wahrnehmungsvermögen der Pute? Die Tierschutznutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzV) legt fest, dass die künstliche Beleuchtung in Putenställen an die spezifische Wahrnehmungsfähigkeit der Tiere angepasst sein muss. Dies beinhaltet nicht nur die Berücksichtigung einer verträglichen Flimmerfrequenz, sondern auch eine geeignete spektrale Zusammensetzung des Lichts. Aufgrund der Empfindlichkeit der Puten Augen für kurze Wellenlängen müssen auch ultraviolette Anteile im Licht enthalten sein. Diese Anforderung dient dem Ziel, das Wohlbefinden und die natürlichen Bedürfnisse der Tiere zu berücksichtigen und ihnen eine artgerechte Umgebung zu bieten.

2 Motivation und Forschungsfragen

Vor diesem Hintergrund zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, die Ursache der Tierverteilung in Abhängigkeit von der Einstellung vordefinierter Lichtbedingungen eingehend zu untersuchen. Durch eine gründliche Analyse dieser Auswirkungen werden wertvolle Erkenntnisse gewonnen, die zur Identifizierung der geeigneten Lichtparameter für die Mastputenhaltung beitragen.

Ein tiefgehendes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Licht bzw. Beleuchtung, Tierverteilung und Verhalten ermöglicht es, die erforderlichen Parameter für eine adäquate Stallbeleuchtung präzise zu ermitteln. Es ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Unterscheidet sich die Verteilung von Mastputen in einem bestimmten Stallareal in Abhängigkeit von der Tageszeit und den Beleuchtungsverhältnissen?
- Welche Auswirkungen hat die Beleuchtung mit warmweißem/kaltweißem Licht und auch der Vergleich der Beleuchtung mit UV- oder ohne UV-Anteil auf das Verhalten von Mastputen zu verschiedenen Tageszeiten?

3 Experimentelles Design

Im Rahmen des Forschungsprojekts OptiLiMa werden Experimente mit einem innovativen LED-basierten Stallbeleuchtungssystem in einem konventionell betriebenen Mastputenstall (Größe: 20 m x 120 m) durchgeführt, in dem rund 7000 Mastputen ("Praxisherde") gehalten werden. Insgesamt sind 36 Leuchten im Stall installiert, die einzeln angesteuert werden können. Das gewünschte Spektrum lässt sich über die drei Farbkanäle (UV-A / Grün / Weiß) für jede Leuchte individuell einstellen (s. Abb. 1).

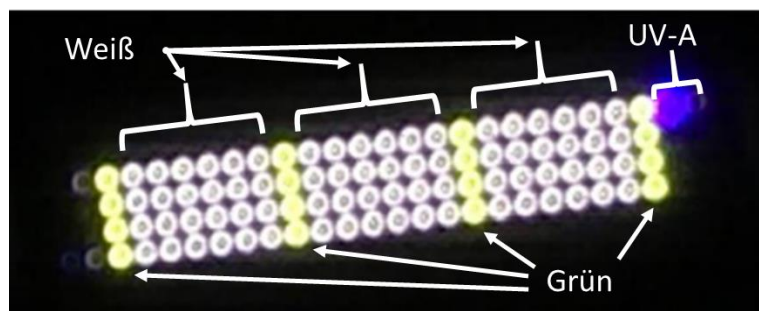


Abbildung 1: OptiLiMa-Leuchte mit 3 Kanälen

Durch die kanalweise Steuerung kann neben der Spektralen Zusammensetzung auch die Bestrahlungsstärke insgesamt variiert werden. Dies hat den Vorteil, dass unterschiedliche Bereiche (Konsumzonen, Komfortzonen, Ruhezone etc.) individuell angepasst beleuchtet werden können. In einem ersten Mastdurchgang wird die Akzeptanz und Präferenz der Puten eines homogen kaltweiß (5000 K) und eines homogen warmweiß (2700 K) beleuchteten Stallbereichs getestet. Dabei liegt das Augenmerk auf der Aktivität und der Aufenthaltsdichte der Puten im jeweiligen Bereich.

In einem zweiten Mastdurchgang wird der Beleuchtung einer Stallhälfte eine UVA-Komponente hinzugefügt, um die Tierverteilung bzw. Tieraktivität im Vergleich zu einer ohne UVA-Komponente beleuchteten Vergleichsfläche zu analysieren (vgl. Abb. 2).

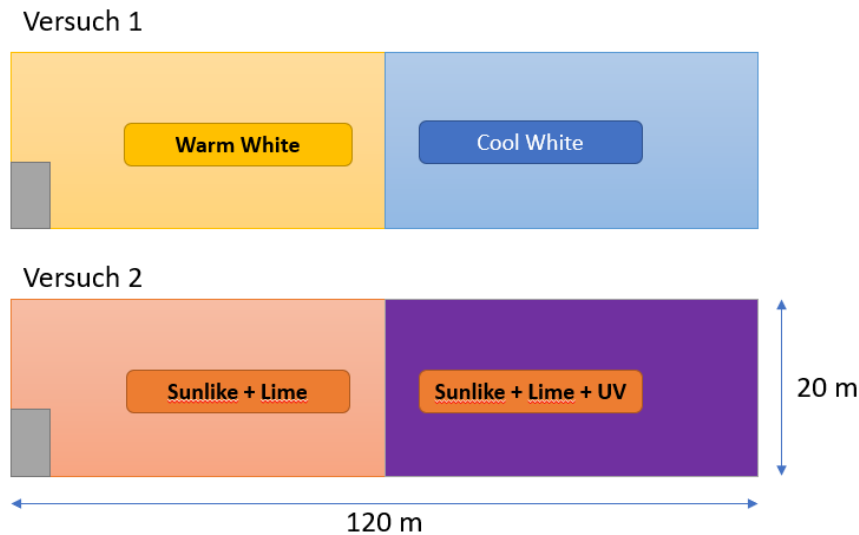


Abbildung 2: Beleuchtungsvorgabe für die ersten beiden Mastdurchläufe im Maststall

4 Analysesoftware zur automatischen Erfassung der Tierverteilung

Um das Verhalten der Puten im Stall, die Position ihres Aufenthalts sowie ihr Bewegungsverhalten analysieren zu können, wird eine Videoüberwachung installiert und eine Software entwickelt, die die Putenpositionen mit Hilfe einer KI-basierten Bildverarbeitung in Echtzeit bestimmt.

Angesichts der Tatsache, dass während der Überwachung sehr viele Daten anfallen (ca. 16 Stunden Videostreams von 12 Kameras pro Tag plus Positionsdaten der Tiere), ist es jedoch nicht praktikabel, diese manuell zu analysieren, indem jedes einzelne aufgezeichnete Video „von Hand“ betrachtet wird. Daher werden automatisierte Analyseverfahren eingesetzt, um die Daten effizient zu verarbeiten und extrahierte Informationen mittels Heatmaps darzustellen. Dies ermöglicht eine schnellere und präzisere Bewertung der Tieraktivitäten und unterstützt die Identifizierung von Trends oder Abweichungen.

4.1 Tierdetektionssystem für Mastputen

Um eine mit 7.000 männlichen Mastputen besetzte konventionelle Mastputenhaltung im Versuchsstall (Stallfläche 2.400 m²) zu überwachen, werden zwölf IP-Kameras eingesetzt. Diese zeichnen den Stallbereich mit einer Frequenz von drei Bildern pro Sekunde auf und übertragen die Videodaten über das Real-Time Streaming Protocol (RTSP). Für die Verarbeitung und Speicherung der Kameradaten werden drei Workstations verwendet. Zur Identifikation der Tiere im Videomaterial wird die Methode des maschinellen Lernens eingesetzt. Hierfür wurde ein Convolutional Neural Networks (CNNs) Modell entwickelt, das auf einem 50-schichtigen Residualnetzwerk

(ResNet) basiert. Das ResNet wird durch einen Single Shot MultiBox Detector (SSD) ergänzt, der in einem Durchlauf durch das Netzwerk Objekte (die einzelnen Puten) erkennt. Der SSD eliminiert die Notwendigkeit eines separaten Schritts zur Objektvorschlagserstellung und kombiniert Vorhersagen aus verschiedenen Merkmalskarten mit unterschiedlichen Auflösungen, um Objekte verschiedener Größen zu behandeln. Ein manueller Schritt besteht darin, die zu erkennenden Objekte im Bildmaterial zu markieren und das Netzwerk zu trainieren. Zur effizienten Verarbeitung und Ausführung der Algorithmen der neuronalen Netzwerke in Echtzeit bei drei Bildern pro Kamera und Sekunde werden pro Kamera eine Grafikkarte eingesetzt, jeweils 4 sind pro Workstation verbaut. Die erfassten Tierpositionsdaten werden in einer MySQL-Datenbank gespeichert. Zusätzlich wird eine Fernzugriffsfunktion für das Remote-Management implementiert. Abbildung 3 zeigt den Systemaufbau für die Tierdetektion.

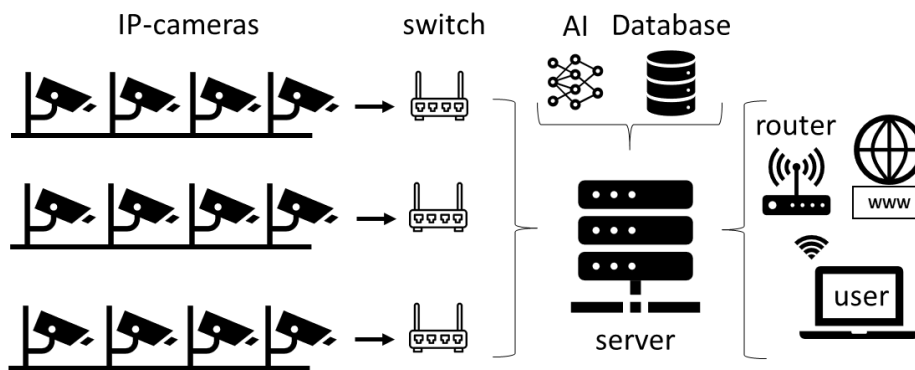


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Tierdetektionssystems

4.2 Kameraanordnung für die Auswertung der Tierpositionen

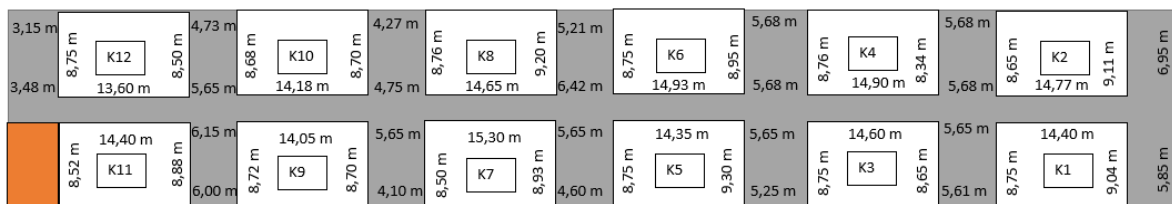


Abbildung 4: Kameraanordnung im Mastputenstall

Die Kameraanordnung wurde so gestaltet, dass ein möglichst großer Teil der Stallfläche überwacht werden kann, es ist ein Kompromiss zwischen Blickwinkel und Anzahl der Kameras; im Ergebnis wird der Stallbereich flächenmäßig zu etwa 65% abgedeckt. Damit können nicht alle Tiere erfasst werden, mit der vorhandenen Anordnung von 12 Kameras werden aber etwa 4.000 der insgesamt 7.000 Tiere erfasst. Schon dadurch kann ein umfassenderes Bild von der Tierverteilung und ihrem Verhalten abgeleitet werden.

4.3 Abfrage der Tierpositionsdaten mittels Threads

Die erfassten Positionsdaten bilden die Basis für die Analyse-Software (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 5: Detektierte Tiere im Erfassungsbereich einer Kamera

Aufgrund der enormen Datenmenge von über 21 TB Rohdaten (Bildmaterial und vorverarbeitete Daten für einen Mastdurchlauf) in der Datenbank stellt die effektive Auswertung eine bedeutende Herausforderung dar. Es ist daher von großer Bedeutung, einen effizienten Abfrageprozess zu entwickeln, um die Daten schnell und effektiv auswerten zu können. Eine der Lösungen besteht darin, Threads in SQL-Datenabfragen zu verwenden, um die Leistung und Skalierbarkeit des Systems zu verbessern. Die Verwendung von Threads ermöglicht eine parallele Ausführung von Datenabfragen, wodurch Engpässe vermieden werden und die Datenverarbeitung beschleunigt wird. Dies ist besonders wichtig, um die Auswertung der großen Datenmenge effizient durchführen zu können. Durch die Verbesserung der Leistung und Skalierbarkeit des Systems kann eine schnellere und effizientere Verarbeitung der Rohdaten erreicht werden. Daher wird das Konzept der parallelen Verarbeitung von Abfragen mit Threads in die Analyse-Software implementiert.

4.4 Visuelle Darstellung der Tierverteilung mittels Heatmaps

Die visuelle Darstellung der Tierverteilung mittels Heatmaps ist ein Werkzeug für die Beurteilung bei der wissenschaftlichen Analyse von Daten. Durch diese Methode können Informationen über die Verteilung der Tiere auf einen Blick erfasst werden. Die Nutzung von Heatmaps bietet dabei verschiedene Vorteile (Visualisierung, Mustererkennung, Überwachung von Tierverteilungen) und ermöglicht eine umfassende Untersuchung der Tierverteilung im Stall. Durch die Verwendung von Farben und Intensitäten werden Bereiche mit hoher und niedriger Tierdichte sichtbar gemacht. Dadurch können Muster und Trends in der Tierverteilung erkannt werden. Beispielsweise können bevorzugte Bereiche im Stall oder Unterschiede in der Verteilung zu unterschiedlichen Zeiten identifiziert werden. Darüber hinaus können die visualisierten Daten (Heatmaps) für gezielte Maßnahmen, wie die optimale Steuerung des Lichts im Stall, abgeleitet werden. Dies trägt zur Förderung einer nachhaltigen Tierhaltung bei.

Die Visualisierung der Tierverteilung im Maststall wird anhand eines Beispiels (siehe Abbildung 6) veranschaulicht. Durch die farbliche Darstellung werden Bereiche mit hoher Tierdichte (rot) und Bereiche mit niedriger Tierdichte (blau) sichtbar.

Die Benutzeroberfläche stellt die absolute Anzahl der Tiere in den jeweiligen Kamera-bereichen dar und ermöglicht es den Benutzern, Datensätze aus verschiedenen Analysezeitpunkten über einen Zeitschieberegler abzurufen und zu analysieren. Durch diese Funktion können historische Informationen über die Tierverteilung visualisiert und ausgewertet werden. Die Benutzeroberfläche bietet somit einen umfassenden Überblick über die zeitabhängige Verteilung der Tierpopulation im Stall.

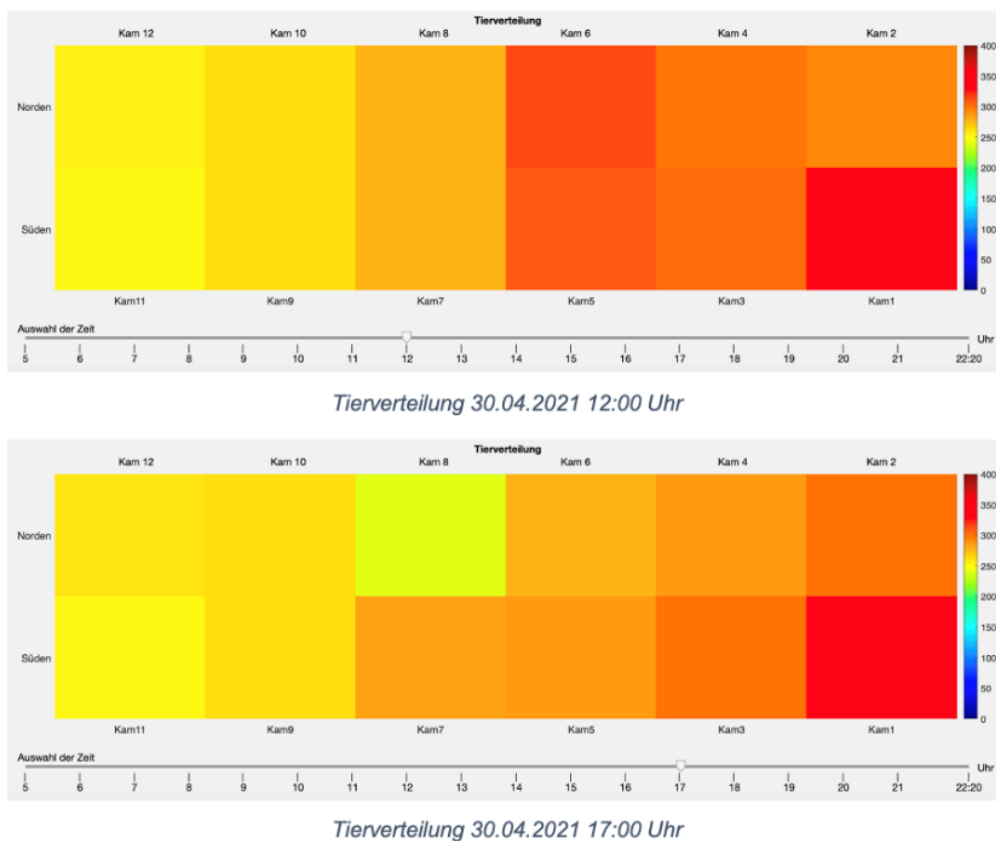


Abbildung 6: Heatmap für die Beurteilung der Tierverteilung im Stall zu verschiedenen Zeitpunkten

5 Auswertung der beleuchtungsabhängigen Tierverteilung

Die Auswertung der beleuchtungsabhängigen Tierverteilung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die Heatmaps jeder Kamera manuell ausgewertet. Indem die Heatmaps über einen bestimmten Zeitraum hinweg verglichen werden, können zeitliche Trends und Veränderungen in der Tierverteilung erkannt werden. Dies ermöglicht die Identifizierung von Verhaltensmustern, saisonalen Schwankungen oder anderen zeitabhängigen Faktoren. Im zweiten Schritt werden die Ergebnisse nach Zeiten sortiert und nach der Kameraanordnung in West und Ost aufgeteilt. Die Kameras 1 bis 6 werden dem östlich ausgerichteten Stallbereich zugeordnet und die Kameras 7 bis 12 dem nach Westen orientierten Stallbereich. Dadurch können die Tieraktivitäten in

den verschiedenen Beleuchtungszonengezielt analysiert werden, basierend auf der geografischen Ausrichtung des Maststalles. Im ersten Versuch wurde der westliche Stallbereich mit warmweißem Licht (WW) beleuchtet, während der östliche Stallbereich mit kaltweißem Licht (KW) beleuchtet wurde. Im zweiten Versuch wurde der westliche Stallbereich ohne UV-Anteil (ohne UV) beleuchtet, während der östliche Stallbereich einen UV-Anteil (mit UV) in der Beleuchtung aufwies (vgl. Abbildung 2).

Diese strukturierte Analyse ermöglicht es, potenzielle Zusammenhänge zwischen den Lichtverhältnissen und dem Verhalten der Tiere zu identifizieren, um Rückschlüsse auf ihre Wahrnehmung ziehen zu können.

5.1 Statistische Analyse der Tierverteilung in Bezug auf Lichtzonen

Nachdem die Kameraaufnahmen entsprechend ihrer Ausrichtung sortiert sind, werden die absoluten Werte der Tierverteilung entsprechend der Zeit sortiert und in einem Säulendiagramm dargestellt. Dadurch entsteht eine visuelle Darstellung der Veränderungen der Tierverteilung über einen bestimmten Zeitraum. Das Säulendiagramm ermöglicht es, Trends, Muster oder Abweichungen in der Tierverteilung zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und Stallhälften zu erkennen. In den Mastdurchgängen wird die Tierverteilung monatlich analysiert, um ein umfassendes Verständnis des Tierwachstums und der damit verbundenen Trends hinsichtlich Raumnutzung und Aufenthaltspräferenzen zu erhalten. Die monatliche Analyse ermöglicht es auch, gezielte Beobachtungen über einen bestimmten Zeitraum hinweg durchzuführen, um Veränderungen und Muster in Bezug auf das Tierwachstum und die Aktivität präzise zu klassifizieren. Dadurch können spezifische Entwicklungsphasen und Veränderungen in der Tierverteilung erkannt und bewertet werden. Die Kenntnisse der spezifischen Wachstumsphasen und Veränderungen in der Tierverteilung bieten die Möglichkeit, gezielte Maßnahmen zur Optimierung des Tierwachstums und des Wohlbefindens zu ergreifen. Durch das Lichtmanagement können optimale Bedingungen geschaffen werden, um die Haltungsbedingungen zu verbessern und die Gesundheit und das Wohlergehen der Tiere zu fördern.

Im Zeitraum vom 17.03.21 bis zum 23.06.21 wurde der erste Mastdurchgang durchgeführt, wobei im März zunächst Videomaterial aufgezeichnet wurde, um das Convolutional Neural Network (CNN) zu trainieren und das Modell für die spätere Analyse der Tierverteilung vorzubereiten. Gleichzeitig wurde der Aufbau der Anlage im Prozess implementiert und ein zuverlässiger Betrieb durch Identifikation und Beseitigung von Fehlern sichergestellt, um damit eine solide Grundlage für die anschließende Auswertung und Tierverhaltensanalyse zu schaffen.

Für den Monat April 2021 konnte folgendes Verteilungsszenario abgebildet werden: Am Vormittag betrug der Anteil der sich auf der Westseite befindlichen Tiere 51,3 %, der auf der Ostseite 48,7 % der insgesamt erfassten Tiere. Zu Mittag änderte sich das Verhältnis leicht, wobei sich 49,6 % der Tiere auf der Westseite und 50,4 % der Herde auf der Ostseite aufhielten.

Am Abend zeigte sich eine ähnliche Verschiebung, wobei nun 48,4 % der Puten auf der Westseite und 51,6 % auf der Ostseite residierten.

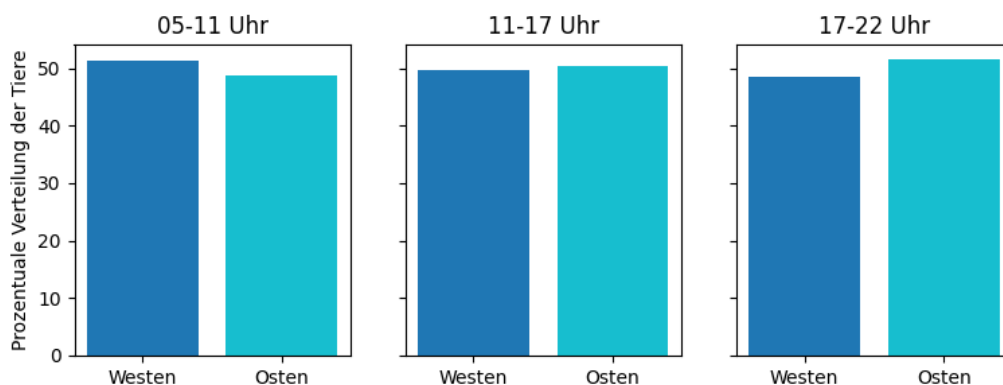


Abbildung 7: April vom Mastdurchgang 1 (Westen mit WW und Osten mit KW)

Es scheint eine leichte Tendenz zu geben, dass sich die Tiere am Morgen eher auf der Westseite (WW) aufhielten, während sie sich in der Mittagszeit und am Abend vermehrt auf der Ostseite (KW) befanden.

Im Monat Mai betrug der Anteil der Tiere am Vormittag auf der Westseite 48,8 % und auf der Ostseite 51,2 %. In der Mittagszeit änderte sich das Verhältnis leicht, wobei sich 48,5 % der Puten auf der Westseite und 51,5 % auf der Ostseite befanden. Am Abend zeigte sich eine ähnliche Verschiebung, wobei sich auf der Westseite 48,0 % und der Ostseite 52,0 % der Tiere aufhielten. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Tiere tendenziell die Ostseite (KW) des Stalls präferieren.

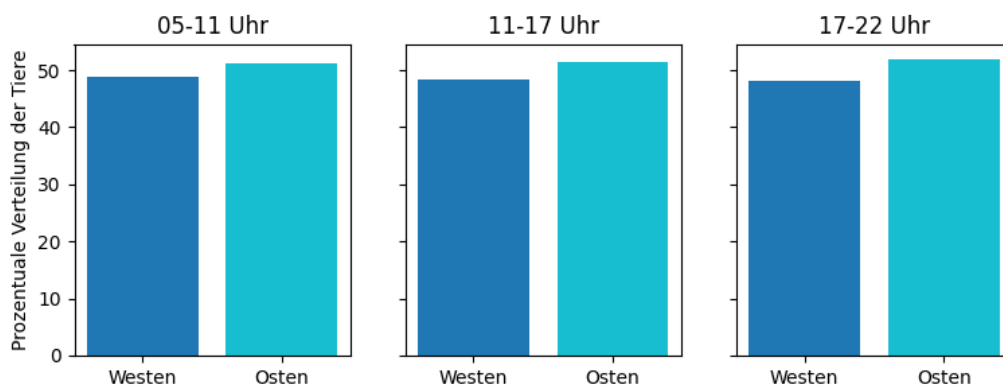


Abbildung 8: Mai vom Mastdurchgang 1 (Westen mit WW und Osten mit KW)

Im Versuchsmonat Juni betrug am Vormittag der Anteil der Tiere auf der Westseite 49,7 % und auf der Ostseite 50,3 %. In den Mittagsstunden änderte sich das Verhältnis leicht, wobei sich 49,3 % des Schwarms auf der Westseite und 50,7 % auf der Ostseite befanden. Am Abend zeigte sich erneut eine Verschiebung, wobei sich 48,3 % der Tiere auf der Westseite und 51,7 % der Puten auf Ostseite des Stalles aufhielten.

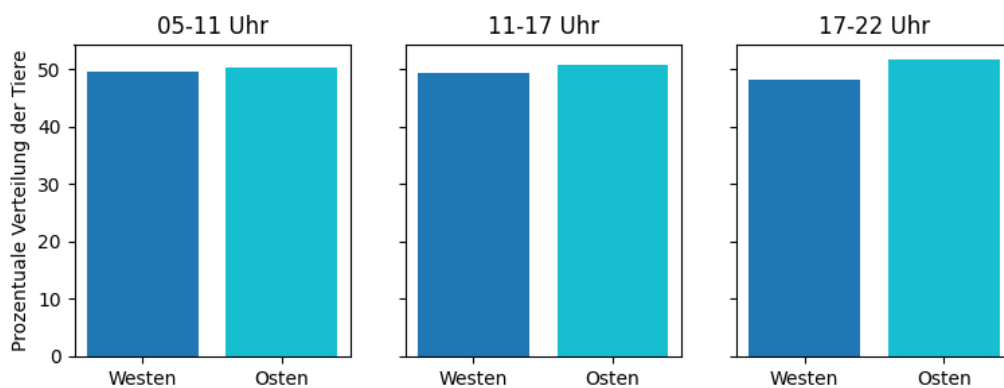


Abbildung 9: Juni vom Mastdurchgang 1 (Westen mit WW und Osten mit KW)

Diese Ergebnisse legen nahe, dass es im Laufe des Tages auch hier eine Tendenz gibt, dass sich die Tiere von der Westseite zur Ostseite des Stalls bewegen. Insbesondere am Abend scheint die Ostseite attraktiver für die Tiere zu sein, während sich die Tierversammlung auf der Westseite entsprechend verringert.

Im Zeitraum vom 13.07.21 bis zum 03.11.21 verlief der zweite Mastdurchgang, wobei sich im Versuchsmonat Juli am Vormittag 51,5 % der Tiere auf der Westseite und 48,5 % der Tiere auf der Ostseite aufhielten. Zu Mittag verschob sich das Verhältnis, wobei sich 48,8 % der Herde auf der Westseite und 51,2 % auf der Ostseite befanden. Am Abend zeigte sich eine deutlichere Veränderung, wobei auf der Westseite lediglich 47,3 % der Puten und auf der Ostseite 53,7 % der Puten verweilten.

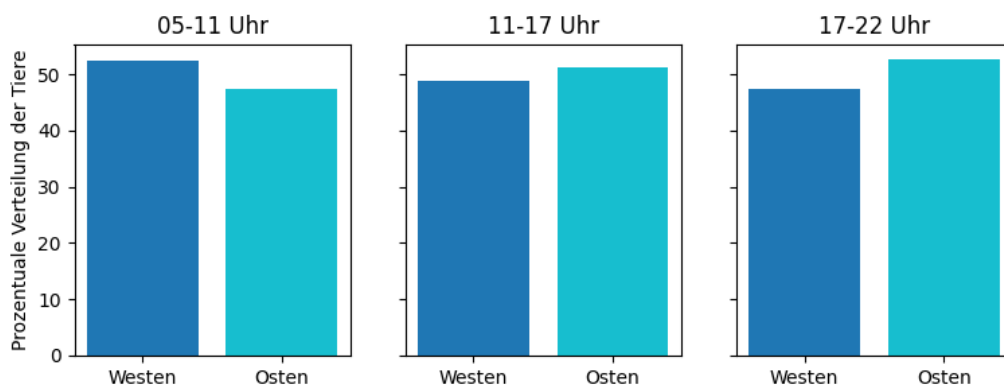


Abbildung 10: Juli vom Mastdurchgang 2 (Westen ohne UV und Osten mit UV)

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich die Tiere im Laufe des Tages von der Westseite (ohne UV) zur Ostseite (mit UV) des Stalls bewegen. Insbesondere am Abend scheint die Ostseite (mit UV) attraktiver für die Tiere zu sein, während die Anzahl der Tiere auf der Westseite (ohne UV) abnimmt.

Im Monat August lag während des Vormittags der Anteil der Tiere auf der Westseite bei 51,9 % und auf der Ostseite bei 48,9 %. Mittags verlagerte sich das Verhältnis mit 47,7 % auf der Westseite und 53,3 % auf der Ostseite. Am Abend zeigt sich eine ähnliche Verteilung, mit 48,5 % der Puten auf der Westseite und 52,5 % auf der Ostseite.

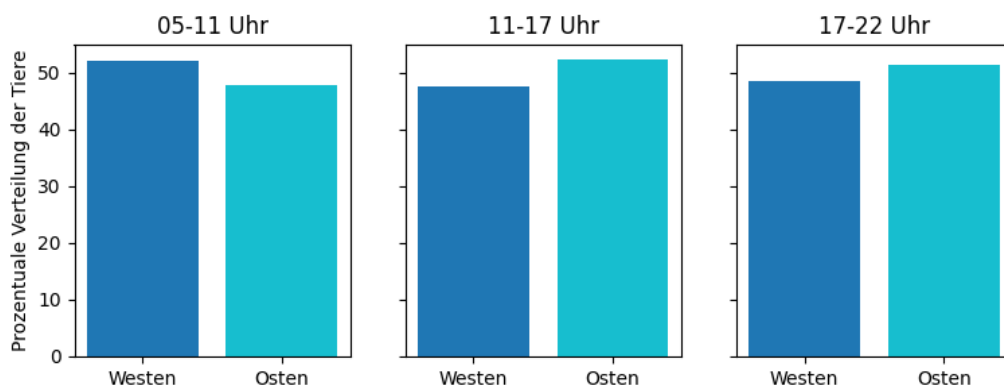


Abbildung 11: August vom Mastdurchgang 2 (Westen ohne UV und Osten mit UV)

Diese Daten deuten darauf hin, dass sich die Tierverteilung im Laufe des Tages leicht verschiebt. Morgens scheint die Ostseite (mit UV) einen geringeren Anteil an Tieren zu haben, während die Westseite dominiert. Im Laufe des Tages neigt sich das Verhältnis zugunsten der Ostseite (mit UV).

Im September betrug am Vormittag der Anteil der Tiere auf der Westseite 51,4 % und auf der Ostseite 48,6 %. Zur Mittagszeit hielten sich die Puten zu 48,3 % auf der Westseite und zu 51,7 % auf der Ostseite auf. Am Abend zeigte sich eine ähnliche Verteilung, wobei die Westseite 50,3 % der Herde und die Ostseite 49,7 % nahe zu gleichverteilt sind.

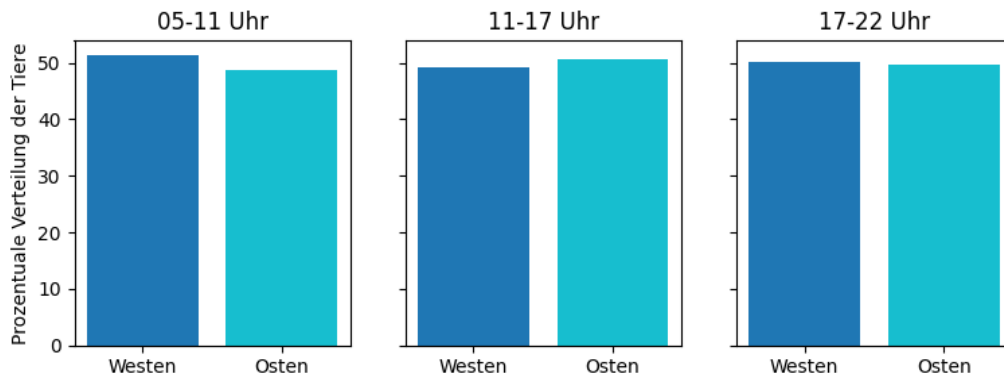


Abbildung 12: September vom Mastdurchgang 2 (Westen ohne UV und Osten mit UV)

Diese Daten deuten darauf hin, dass es im Verlauf des Tages zu leichten Verschiebungen in der Tierverteilung kommt. Während des Vormittags scheinen mehr Tiere die Westseite (ohne UV) aufzusuchen, während sich zur Mittags- und Abendzeit ein höherer Anteil der Herde auf der Ostseite (mit UV) befinden.

Im Monat Oktober lag der Anteil der sich auf der Westseite befindlichen Tiere während des Vormittags bei 53,9 % und auf der Ostseite bei 47,1 %. Mittags verschob sich das Verhältnis zu einem Anteil von 51,9 % Puten auf der Westseite und 48,1 % auf der Ostseite. Am Abend zeigte sich eine ähnliche Verteilung, wobei die Westseite 50,8 % der Herde aufsuchte und die Ostseite 49,2 % der Puten.

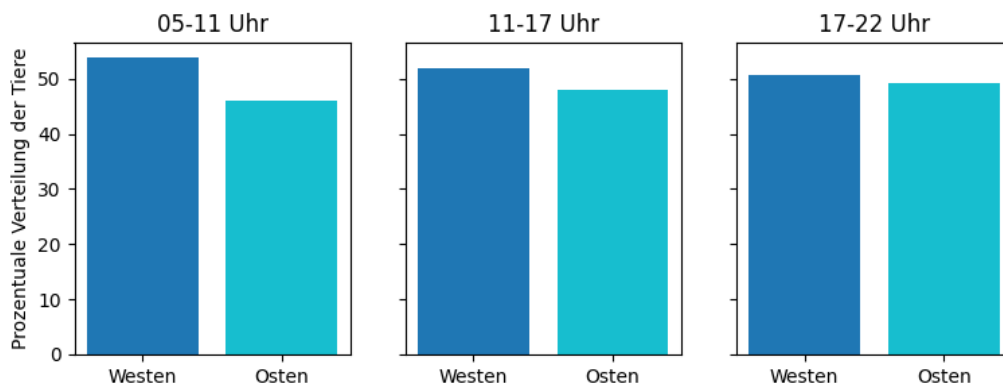


Abbildung 13: Oktober vom Mastdurchgang 2

Es scheint, dass die Tiere morgens eine Präferenz für die Westseite (ohne UV) haben, während sie mittags und abends eher eine ausgeglichene Verteilung aufweisen.

Das Tierbeobachtungssystem wurde im November vorübergehend abgeschaltet und demontiert, um Reinigungsarbeiten im Stall durchzuführen. Dies ermöglichte eine effiziente Reinigung und Wartung, ohne das System zu beeinträchtigen. Nach Abschluss der Arbeiten wurde das System wieder installiert und in Betrieb genommen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Mastputen morgens bevorzugt auf der Westseite des Stalls aufhielten, unabhängig von der Art des Lichts. Mögliche Gründe dafür sind Umweltgeräusche, die von der Straße kommen, die an der Westseite vorbeiführt, der morgendliche Start des Futternachlaufs auf der Westseite oder auch der Standort des Eingangs- und Arbeitsbereichs des Stalls auf der Westseite. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Mastputen mittags im östlichen Teil des Stalls verteilen. Dabei könnte die UV-Beleuchtung eine Rolle bei der Anziehung der Tiere zu helleren Bereichen spielen, insbesondere in jüngerem Alter. Das UV-Licht zieht sie zu den helleren Bereichen, was möglicherweise auf ihre natürliche Wahrnehmung oder auch Präferenz für intensiveres Lichtspektrum zurückzuführen ist. Es ist wichtig anzumerken, dass weitere Studien erforderlich sind, um die genauen Zusammenhänge zwischen UV-Licht, Verhalten und der Verteilung der Mastputen im Stall zu untersuchen, da innerhalb des Projektzeitraums nur eine begrenzte Anzahl von Mastdurchläufen durchgeführt werden konnten. Abends wurden die Mastputen vermehrt auf der Ostseite des Stalls erfasst. Es kann keine klare Korrelation zu der angebotenen Beleuchtungsvariante festgestellt werden. Eine Vermutung liegt nahe, dass die Tiere sich am Ende der Hellphase eher in einem helleren Licht aufhalten, das weniger warmweiße und keine UV-Anteile aufweist. Die Geräusche könnten erneut eine Rolle spielen, da die Ostseite weniger von Verkehrsgeräuschen betroffen ist, sowie die Akustik der im Westen gelegene Futterkette, da diese nachts nicht aktiv ist.

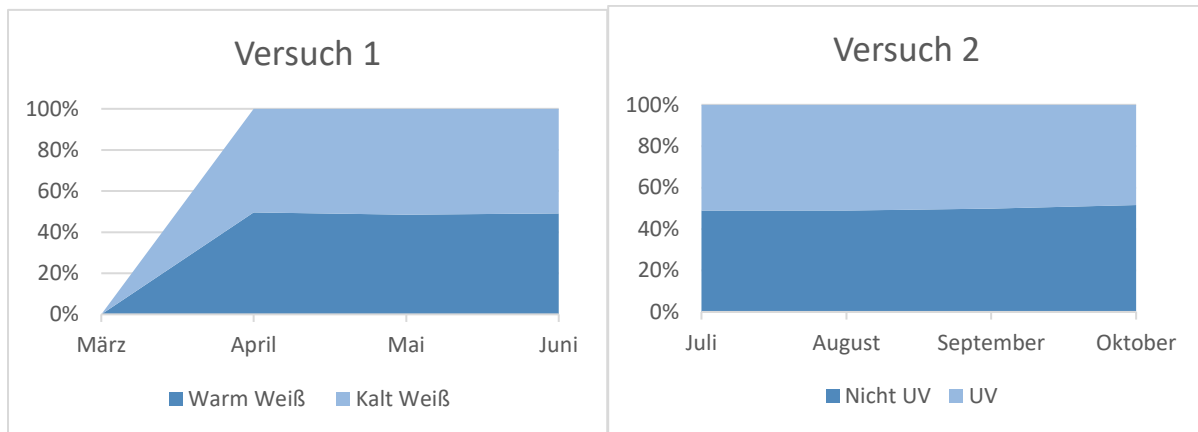


Abbildung 14: Tierverteilung in den zwei Beleuchtungszonen im Verlauf des Mastdurchlaufs

In Abbildung 14 wird eine Übersicht zur Beantwortung der zweiten Fragestellung gegeben, die den Einfluss der Beleuchtung auf das Verhalten der Tiere betrifft. Im ersten Mastdurchgang zeigte sich ein Durchschnittswert der untersuchten drei Monate von 48,9 % für warmweißes Licht und 51,1 % für kaltweißes Licht. Im März ergab sich aufgrund der Systemarchitektur eine signifikante Zunahme der Detektion, wodurch eine immer größere Anzahl von Tieren erkannt wurde. Im zweiten Mastdurchgang mit und ohne UV-Licht werden Mittelwerte von 49,6 % ohne UV und 50,4 % mit UV festgestellt. Bei genauer Betrachtung des Monats Oktober, in dem die Tiere die 20. Lebenswoche erreichten, war eine leichte Tendenz erkennbar, dass jüngere Mastputen das UV-Licht bevorzugten, mit einem Durchschnittswert von 48,5 % ohne UV und 51,5 % mit UV. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Unterschiede auch durch Umweltgeräusche oder andere Faktoren beeinflusst sein könnten, wie bereits erwähnt wurde, und nur die Verteilung von ca. 2/3 der Herde erfasst werden konnte.

6 Fazit und Ausblick

Die beiden Versuche haben keine eindeutigen Trends gezeigt, welche Beleuchtung von den Mastputen bevorzugt wird. Es bedarf weiterer Versuche und Analysen, um diese Frage zu beantworten. Ein möglicher Ansatz wäre der Wechsel der Lichtzonen zwischen Ost und West, um die Lichtabhängigkeit genauer zu verifizieren und festzustellen, ob die möglichen Störungen in ähnlicher Weise wirken. Es ist jedoch deutlich erkennbar, dass ein Tagesverhalten der Tiere im Stall vorliegt, bei dem sie im Stall umherwandern, jedoch keine gravierenden Unterschiede hinsichtlich der Lichtzusammensetzung zeigen. Die zweite Forschungsfrage, ob bei Mastputen altersabhängige Präferenzen einer bestimmten Beleuchtung bestehen, kann gegenwärtig nicht eindeutig beantwortet werden. Es zeigt sich lediglich eine Tendenz zum kaltweißen Licht, die jedoch noch nicht fundiert bestätigt werden kann. Die subjektive Einschätzung des Tierbetreuers und die automatische Erfassung zeigen deutliche Unterschiede. Der Tierhalter war der Ansicht, dass die Tiere die gesamte Stallfläche nicht ausnutzen und sich hauptsächlich auf der Westseite aufhalten. Die Auswertung der Kameradaten ergab jedoch ein gegenteiliges Bild. Dies zeigt, dass eine

automatische Erfassung sinnvoll ist, um eine objektive Beurteilung der Putenherde vorzunehmen, ohne die „Störung“ durch das Personal.

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Schlussfolgerungen auf Beobachtungen und Vermutungen basieren und weitere Untersuchungen erforderlich sind, um eine genauere Erklärung für das Verhalten der Mastputen zu liefern. Es ist wichtig anzumerken, dass das Licht nicht der alleinige Faktor ist, der das Tierverhalten beeinflusst. Vielmehr handelt es sich um ein multifaktorielles Zusammenspiel verschiedener Einflussgrößen. Durch den Einsatz des automatischen Tiererfassungssystems können nun sämtliche Einflussfaktoren separat untersucht werden, um den größten Einfluss zu ermitteln und die Beziehungen zwischen den Faktoren zu analysieren. Die Integration von Rohdaten und die Durchführung detaillierter Analysen können dazu beitragen, die Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen Licht, Umweltakustik und anderen Faktoren besser zu verstehen. Durch kontinuierliche Forschung und datengesteuerte Ansätze können Tierhalter ihr Stallmanagement weiter verbessern und optimale Bedingungen für ihre Tiere schaffen.

Als Ausblick ergeben sich weitere Fragenstellungen, wie die Analyse von agonistischen Verhaltensweisen wie beispielsweise Rangordnungskämpfen in den verschiedenen Lichtbereichen, die Untersuchung der Aktivität einzelner Tiere und die Analyse von Bewegungsmustern und zurückgelegten Wegstrecken. Auch die Wechselhäufigkeiten der Tiere von der Komfortzone in die Konsumzone zur Nahrungs- und Wasseraufnahme in den jeweiligen Lichtbereichen ist interessant zu erforschen. Die erfassten Rohdaten können eine gute Basis für weiterführende Untersuchungen und Auswertungen bilden.

7 Weiterführende Literatur

[1] Bartels, T., J.-H. Lütgeharm, M. Wähner, J. Berk (2017): UV reflection properties of plumage and skin of domesticated turkeys (*Meleagris gallopavo* f. dom.) as revealed by UV photography. *Poult. Sci.* 96, 4134–4139.

[2] Bartels, T., R. A. Stuhmann, E. T. Krause, L. Schrader (2020): Research Note: Injurious pecking in fattening turkeys (*Meleagris gallopavo* f. dom.). Video analyses of eliciting factors and behavioral sequence in small groups of male turkeys. *Poult. Sci.* 99, 6326-6331.

[3] Bortolotti, G. R., T. A. Marchant, J. Blas, and T. German (2008): Corticosterone in feathers is a long-term, integrated measure of avian stress physiology. *Funct. Ecol.* 22, 494–500.

[4] Hart, N. S., J. C. Partridge, and I. C. Cuthill (1999): Visual pigments, cone oil droplets, ocular media and predicted spectral sensitivity in the domestic turkey (*Meleagris gallopavo*). *Vis. Res.* 39, 3321–3328.

[5] Lewis, P. D., and T. R. Morris (2006): *Poultry lighting: the theory and practice.* Northcot, Andover, UK.

Analyse von Schwierigkeiten bei der Konzeptionierung von nachhaltiger automobiler Lichttechnik

Christian Rogalski, Mathias Niedling

Abstract/Zusammenfassung

Mit steigendem Konsumentenbewusstsein für das Thema Nachhaltigkeit steigt gleichzeitig auch der Bedarf an immer nachhaltigeren Produkten. Dies betrifft auch die Automobilindustrie und damit auch deren Zulieferer. Um Kreislaufprozesse zu ermöglichen, Materialien bestmöglich wiederzugewinnen und so den Einfluss auf die Umwelt größtmöglich zu reduzieren sind in der Literatur Methoden zum Ökodesign oder der recyclinggerechten Konstruktion beschrieben. Demgegenüber stehen Anforderungen an die Produkte, welche die Funktion des Produktes in der Anwendung garantieren sollen. Anforderungsprofil und Ökodesign-Vorgaben können sich jedoch behindern oder sogar widersprechen. Im Rahmen dieses Papers werden am Beispiel eines automobilen Scheinwerfers zunächst Elemente identifiziert, die nicht dem Ökodesign entsprechen. Anschließend werden in Kombination mit den Anforderungen Ursachen für diese Bauweisen identifiziert und potenzielle Verbesserungen diskutiert, um ökologische Vorteile zu erzielen.

Index Terms: Anforderungen, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit, Automobile Lichttechnik

1 Introduction/Einleitung

Die Idee der Nachhaltigkeit ist allgegenwärtig und findet sich auch in den Strategien vieler Firmen wieder. Die Gesetzgebung zwingt Unternehmen zum Umdenken [1] und auch die Kunden vieler Firmen legen zunehmend Wert auf nachhaltige Produkte [2]. Dies hat auch die Automobilindustrie erkannt. Ressourcen sollen entlang der Wertschöpfungskette geschont und Emissionen verringert werden [3,4,5]. Ein vielversprechender Ansatz zur Erreichung dieser Ziele ist die Kreislaufwirtschaft.

Hierbei wird versucht die Menge der verwendeten Ressourcen, die zur Herstellung eines Produktes notwendig sind, größtmöglich zu reduzieren, die Lebensdauer des Produktes oder einzelner Komponenten größtmöglich zu verlängern und Komponenten oder Materialien am Ende ihrer Lebensdauer bestmöglich zurückzugewinnen [6].

Dabei kann zum einen zwischen offenen und geschlossenen Kreisläufen und zum anderen zwischen zehn verschiedenen Ansätzen unterschieden werden, diese reichen von dem Verzicht auf Funktionen bis zur Rückgewinnung von Energie durch das Verbrennen der Materialien [6]. In einem geschlossenen Kreislauf werden die



Komponenten und Materialien wieder für gleiche Produkte, oder Produkte derselben Funktion genutzt, während die Ressourcen in einem offenen Kreislauf auch für andere Produkte genutzt werden.

Damit ein Produkt kreislauffähig ist, muss es dafür ausgelegt sein. Das sog. Ökodesign zeigt Möglichkeiten in der Produktentwicklung auf, um beispielsweise recyclinggerechte Bauteile herzustellen.

Heutige Scheinwerfer in der automobilen Lichttechnik erfüllen jedoch vielseitige Anforderungen, die Kreislaufprozesse erschweren können. Im Rahmen dieser Ausarbeitung werden Kreislaufprozesse aufgezeigt und Anforderungen zugeordnet.

2 Scheinwerfersysteme

Scheinwerfersysteme sind fester Bestandteil der automobilen Lichttechnik und befinden sich an der Fahrzeugfront. Sie erfüllen zum einen gesetzlich geforderte Sicherheitsfunktionen, wie die Ausleuchtung der Straße und zum anderen auch Designanforderungen und bieten Herstellern von Kraftfahrzeugen damit eine Möglichkeit die Erkennbarkeit ihrer Marke sicherzustellen.

2.1 Funktionen

Zur Erreichung der Anforderungen müssen verschiedene Funktionen erfüllt werden. Zum einen muss eine lichttechnische Einrichtung verbaut sein, sodass die Straße ausgeleuchtet werden kann und die Sichtbarkeit des Fahrzeuges selbst erhöht wird [7]. Diese müssen vor Umwelteinflüssen geschützt werden und mit dem Fahrzeug verbunden werden. Dies wird mittels der Kombination eines Gehäuses und einer transparenten Abschlusscheibe sichergestellt.

Moderne Beleuchtungseinrichtungen verwenden zur Erzeugung des Lichts mit LEDs bestückte Leiterplatten. Diese sind zwar deutlich effizienter als konventionelle Halogenleuchtmittel [8], erzeugen dennoch so viel Abwärme, dass die Leiterplatten passiv gekühlt werden müssen. Bei heute vielfach verwendeten Projektionssystemen werden die Leiterplatten zusammen mit entsprechenden Optikelementen an sog. Tragrahmen befestigt.

Um das Erscheinungsbild des Scheinwerfers zu verbessern, werden die Tragrahmen, aber auch Verkabelungen im hinteren Bereich des Gehäuses, mit sog. Blenden oder Abdeckrahmen verkleidet. Diese Bauteile haben i. d. R. dekorative Aufgaben.

2.2 Materialien

Um die zuvor beschriebenen Funktionen zu erfüllen, werden kosten- und prozessoptimierte Materialien verwendet. Ein Großteil heutiger Scheinwerfersysteme besteht aus verschiedenen technischen Kunststoffen, darunter vor allem Polycarbonat und Polypropylen. Um die gewünschten Materialeigenschaften zu

erzielen können zusätzlich Füllstoffe wie Glasfasern eingesetzt werden. Weitere Materialien sind im wesentlichen Aluminium für das Thermomanagement, Stahl für Befestigungselemente und Kupfer zur Versorgung und Steuerung der Beleuchtungseinrichtungen.

3 Herausforderungen und Potenziale

Die zuvor beschriebenen Materialien zur Erfüllung der geforderten Funktionen müssen gleichzeitig auch einer Vielzahl an Anforderungen gerecht werden. Diese können sich auf mechanische Eigenschaften, die Funktionssicherheit während der Nutzungsphase oder auf Design und Herstellkosten beziehen. Dies führt zu einem komplexen Anforderungsmix.

Um Herstellungskosten zu reduzieren, ist der Aufbau von Scheinwerfern hinsichtlich der Montage optimiert. Dies kann dazu führen, dass eine Demontage des Systems am Ende des Produktlebens erschwert oder sogar verhindert wird. Hierbei muss man zusätzlich zwischen dem angestrebten Kreislaufansatz unterscheiden.

Bei Ansätzen bei denen ganze Komponenten oder Teile wiederverwendet werden, müssen diese zerstörungsfrei entnommen werden können. Liegt der Fokus auf die Rückgewinnung der Materialien, sind nicht zerstörungsfreie Entnahmen möglich. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass durch eine gezielte Materialsortierung der Recyclinggrad beeinflusst werden kann [9].

Im Rahmen der weiteren Untersuchung werden zunächst zehn verschiedene Kreislaufansätze beschrieben. Anschließend erfolgt eine Zuordnung von Anforderungen an Scheinwerfersysteme, welche Einfluss auf diese Ansätze nehmen.

3.1 Ansätze in der Kreislaufwirtschaft

Wie zuvor beschrieben wurde, gibt es eine Vielzahl von Ansätzen und Herangehensweisen zur Kreislaufwirtschaft, wie sie in Abbildung 1 dargestellt sind. Die zentrale Gemeinsamkeit all dieser Ansätze ist es, dass der Einsatz von (fossilen) Ressourcen langfristig reduziert wird [6].

Der Kreislaufansatz, welcher einer linearen Wirtschaft am nächsten kommt, ist das Wiedergewinnen. Hier wird versucht, die den Materialien inhärente Energie durch Verbrennung zu gewinnen und für die Strom- und Wärmeenergiegewinnung zu nutzen. Der zweite Ansatz, das Recycling, verfolgt das Ziel, die jeweiligen Materialien der verschiedenen Komponenten wieder zu verwenden. Dabei ist offen, ob die jeweiligen Materialeigenschaften beeinflusst werden.

Bei den beiden Ansätzen Umfunktionieren und Wiedereinsatz werden verbaute Komponenten wiederverwendet. Bei letzterem für gleiche Funktionen. Dabei kann es sich sowohl um einzelne Bauteile als auch ganze Baugruppen handeln.

Das Auffrischen und Reparieren von Bauteilen verlängert die Lebensdauer ganzer Systeme durch die Wartung oder den Austausch einzelner Komponenten.

Die Wiederverwendung zielt darauf ab, dass das ganze Produkt durch eine zweite Partei weitergenutzt wird, ohne wiederaufgefrischt zu werden.

Mit den Kreislaufansätzen Reduktion, Umdenken und Ablehnen wird massiv in das Produkt als solches eingegriffen. Durch die effizientere Gestaltung einzelner Komponenten, die Integration mehrerer Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen Nutzungsszenarien oder dem Verzicht auf bestimmte Funktionalitäten können insgesamt weniger Ressourcen eingesetzt werden. Denn jedes Produkt, das nicht gebaut wird, muss später nicht wieder dem Kreislauf zugeführt werden, in dem wiederum Ressourcen zur Verarbeitung genutzt werden müssen.

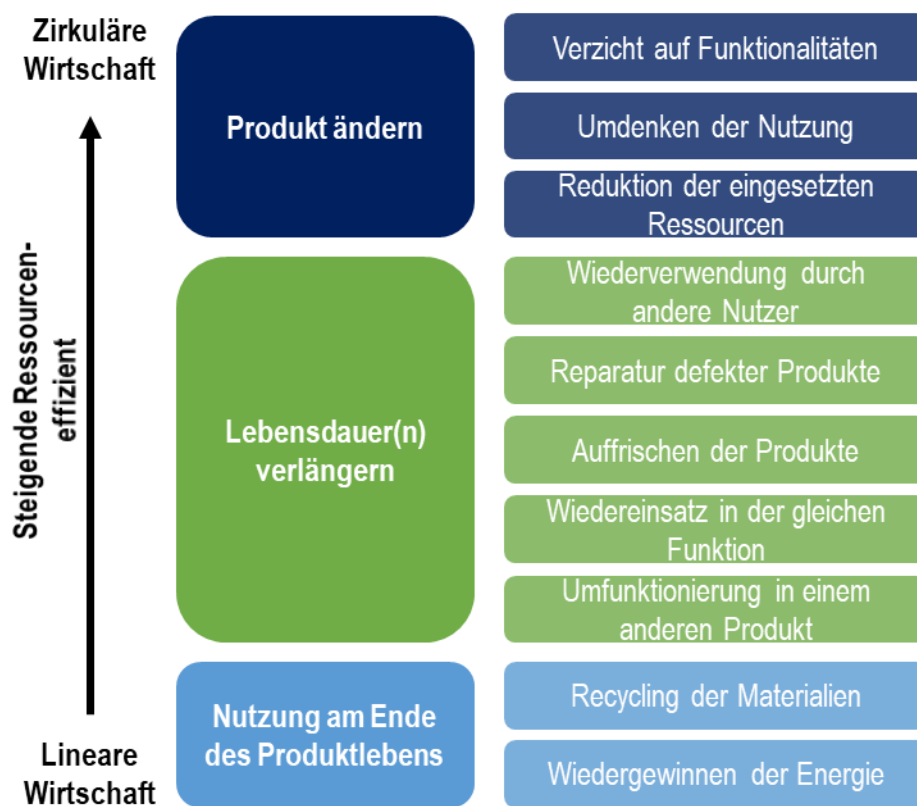


Abbildung 1: Kreislaufansätze, eigene Darstellung nach [6]

Nicht alle Kreislaufansätze sind für Scheinwerfersysteme kurzfristig denkbar. Auf Scheinwerfer kann aufgrund gesetzlicher Vorschriften nicht verzichtet werden. Ebenso wird bereits aufgrund ökonomischer Überlegungen die Materialnutzung auf ein Minimum reduziert, weswegen diese Betrachtung im Rahmen dieses Papers entfällt. Die Wiedergewinnung der Energie wird ebenso ausgeklammert, da keine Restriktionen diesbezüglich vorliegen.

3.2 Anforderungen

Moderne Scheinwerfersysteme sind robuste mechatronische Systeme mit langen Produktlebensdauern. Zusammen mit der Fähigkeit das Erscheinungsbild eines

Fahrzeuges zu prägen, wird mit jedem Scheinwerfer ein komplexes System entwickelt, das unterschiedlichsten Umweltbedingungen standhalten muss, die stark von der Art des Antriebsstrangs und dem Nutzungsort abhängen.

Zusammenfassend lassen sich zwei integrale Anforderungsgruppen identifizieren, welche direkten Einfluss auf die Kreislauffähigkeit von Produkten nehmen. Zum einen die Anforderungen, welche sich auf die Funktionssicherheit während der Nutzung beziehen und zum anderen Anforderungen, die das Design betreffen. Zu ersteren gehören auch mechanische Gesichtspunkte.

Nach einem freien Fall aus einer bestimmten Höhe dürfen sich keine Teile lösen. Dies ist besonders bei versteckten Bauteilen wichtig, um keine potenziell unentdeckten Risiken zu erzeugen. Selbes gilt auch für die Standhaftigkeit gegenüber Vibrationen. Durch die Fahrt auf der Straße und besonders auch bei Verbrennungsmotoren induziert durch den Motor treten Schwingungen auf, die das System nicht negativ beeinflussen dürfen.

Da Scheinwerfer außenliegende Bauteile sind müssen diese auch vor vielfältigen Umwelteinflüssen geschützt werden. Dies betrifft unter anderem den Schutz vor dem Eindringen von Fremdmedien. Darunter zählen (salzhaltiges) Wasser, Staub, Laugen aber auch Öle, Säuren und Insekten, die während der Fahrt oder während der Reinigung des Fahrzeuges eindringen könnten und eine sichere Nutzung gefährden könnten. Auch muss das System vor mechanischer Belastung wie Steinschlägen oder dem möglichen Kontakt mit der Motorhaube geschützt sein.

Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass Temperaturen, die durch die Nutzung der lichttechnischen Einrichtungen und bei einem Verbrennerfahrzeug auch durch den Motor in das System induziert wird, nicht die verwendeten Materialien beschädigen oder die Funktionsweise behindern. Durch den weltweiten Einsatz der Systeme und den daraus resultierenden Umgebungstemperaturen führt dies zu einem breiten Temperaturfeld, in dem der Scheinwerfer, auch bei plötzlichem Temperaturwechsel, sicher funktionieren muss. Das heißt also auch, dass sowohl Frost als auch starke Sonneneinstrahlung während der geforderten Lebensdauer berücksichtigt werden müssen.

Da der Scheinwerfer maßgeblich zum Erscheinungsbild des Fahrzeuges beiträgt, sind heutige Scheinwerfer fahrzeugspezifische Produkte, die besonders in sichtbaren Bereichen ein hohes Maß an Oberflächenqualität aufweisen müssen. Dazu zählt auch die transparente Abschlusscheibe, welche eine geometrisch komplexe Form annehmen kann. Optisch weniger ansprechende Komponenten, die z. B. zur Befestigung benötigt werden, können durch Blenden oder Zierelementen verdeckt werden. Dabei muss auch beachtet werden, dass geringe Spalt- und Fugenmaße eingehalten werden müssen.

3.3 Herausforderungen

Um die beschriebenen Anforderungen zu erfüllen und dabei die Produktionskosten größtmöglich zu reduzieren sind heutige Scheinwerfer abgeschlossene Systeme. Eine Abschlusscheibe aus Kunststoff wird in der Regel mittels eines nichtlösbaren Klebstoffs mit einem Gehäuse verbunden, wodurch innere Komponenten nicht zerstörungsfrei entnommen werden können. Da zusätzliches Gewicht den Energiebedarf für die Beschleunigung von Fahrzeugen beeinflusst, sind Scheinwerfer möglichst gewichtsreduziert herzustellen. Durch die Kombination der verschiedenen Anforderungen an das Scheinwerfersystem wird Einfluss auf Kreislaufprozesse genommen, welche die Lebensdauer und das Lebensende des Produktes betreffen.

Durch das Verbinden der Abschlusscheibe mit dem Gehäuse durch einen Klebstoff werden gleich mehrere Anforderungen erfüllt. Zum einen ist das System vor dem Eindringen der verschiedenen Medien geschützt. Zum anderen hält es den Vibrationen und den mechanischen Belastungen stand. Sollte es zu einem Unfall kommen und die Abschlusscheibe beschädigt werden ist eine Reparatur unter den Randbedingungen nicht möglich, da die Komponenten nicht lösbar miteinander verbunden sind. Dies hat auch Auswirkungen auf die innenliegenden Teile. Sollte es beispielsweise zum Ausfall der Lichtmodule kommen, können diese nicht ausgetauscht werden.

Dies hat auch Einfluss auf die Wiederverwendung von Komponenten für neue Scheinwerfer oder andere Anwendungen, da diese nicht einfach entnommen werden können, ohne zunächst die Verbindung zwischen Abschlusscheibe und Gehäuse zu trennen.

Durch die Leichtbauanforderungen und die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten werden vorrangig Kunststoffe in einem Scheinwerfer eingesetzt. Um jedoch die geforderten mechanischen Eigenschaften einzuhalten, müssen technische Kunststoffe, die für ihren Anwendungsfall speziell ausgelegt sind, verwendet werden. Zum Teil sind zusätzliche Füllstoffe wie Glasfasern enthalten. Da diese Materialien oftmals nicht den Designanforderungen entsprechen werden zusätzliche Abdeckungen eingesetzt, die aus einem anderen Kunststoff hergestellt sind und derartig mit den Bauteilen verbunden sind, dass sie nicht mehr sichtbar sind. Das hat zur Folge, dass diese Zierelemente nicht, oder nur unter enormen Aufwänden, zerstörungsfrei von den anderen Komponenten getrennt werden können und auch hierdurch eine Wiederverwendung erschwert wird. Gleichzeitig vergrößert sich die Anzahl unterschiedlicher Materialien.

Um Materialien bestmöglich zu recyceln, ist eine sortenreine Trennung vorteilhaft, z.T. sogar notwendig. Moderne mechanische Recyclinganlagen können metallische Werkstoffe nach einer Zerkleinerung des Systems zwar grob herausfiltern, eine Unterscheidung unterschiedlicher schwarz eingefärbter Kunststoffe ist jedoch oft nicht möglich und somit wird das Recycling erschwert [10].

Dasselbe gilt auch für Beschichtungen, wie sie zum Schutz der Abschlusscheibe eingesetzt werden, und mit Kunststoff umspritzte Komponenten. Diese können nur schwer mittels mechanischer Verfahren entfernt werden und ohne eine Trennung sogar zur Veränderung der Materialeigenschaften führen.

4 Diskussion und Ausblick

Die vorrangigere Ausarbeitung konnte zeigen, dass durch die Vielzahl an Anforderungen Kreislaufansätze beeinflusst werden. Zwar sind andere Aufbaukonzepte denkbar, doch sind ökonomische und stilistische Randbedingungen heute und auch zukünftig wichtige Faktoren. Hierbei ist zu bewerten, welcher ökologische Nutzen letztendlich generiert werden kann und welche Randbedingungen dafür verändert werden müssen. So könnte der erneute Einsatz von Glas für Abschlusscheiben dafür sorgen, dass diese besser recycelt werden könnten, doch ist der Energieaufwand für das Einschmelzen des Materials sehr hoch. Außerdem würde das Design massiv beeinflusst werden, da die aktuell aus Kunststoff hergestellten Formen mit Glas nicht möglich sind und das Gewicht des Systems erhöht wird.

Auch bei Reparaturlösungen bedarf es anderer Konzepte, hierbei stellt sich die Frage, welche Ressourcen für eine verbesserte Reparierbarkeit zusätzlich eingebracht werden müssen. Denn sollte eine Reparatur nur selten durchgeführt werden, ist es denkbar, dass durch den erhöhten Ressourcenaufwand der ökologische Vorteil von Reparaturlösungen verringert wird, oder sogar schlechter ist als eine Lösungsalternative, die sich auf die Wiedergewinnung der Ressourcen konzentriert. Hier Bedarf es also weiterer Untersuchungen, um Potenziale sinnvoll zu nutzen.

Aufgrund gesetzlicher Forderungen benötigt jedes Fahrzeug zwei Scheinwerfer mit all seinen heutigen Funktionen. Mit der Entwicklung autonom fahrender Fahrzeuge könnte sich dieser Sachverhalt jedoch ändern, wodurch auch Ansätze wie der Verzicht auf bestimmte Funktionen denkbar werden.

5 Referenzen

- [1] G Amanatidis, Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft, Europäische Union, <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/de/sheet/76/ressourceneffizienz-und-kreislaufwirtschaft>, 09.2022, zuletzt geöffnet 09.06.23.
- [2] L. Papasabbas, Der wichtigste Megatrend unserer Zeit, <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/der-wichtigste-megatrend-unserer-zeit/>, 2019, zuletzt geöffnet 09.06.23
- [3] BMW Group, Nachhaltigkeit, <https://www.bmwgroup.com/de/nachhaltigkeit.html>, zuletzt geöffnet 09.06.23
- [4] Mercedes Benz Group, Nachhaltigkeit, <https://group.mercedes-benz.com/nachhaltigkeit/>, zuletzt geöffnet 09.06.23

- [5] Kia, Nachhaltigkeit, <https://www.kia.com/de/ueber-kia/nachhaltigkeit/>, zuletzt geöffnet 09.06.23
- [6] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell and A. Hanemaaijer, Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain, The Hague, 01.2017
- [7] ADAC, Licht am Auto: Überblick, Funktionen und Checkliste, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/licht-und-beleuchtung/richtige-beleuchtung-auto/>, 14.04.23, zuletzt geöffnet 09.06.23
- [8] D. Decker, M. Kleinkes, Energieeffizienz von lichttechnischen Systemen, ATZelextronik 02.2009
- [9] H. Martens and D. Goldmann, Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2016
- [10] G. Hartmann, Bewertung aktueller Scheinwerferbauweisen hinsichtlich ihrer Umweltfreundlichkeit und Rezyklierbarkeit unter Zuhilfenahme eines neuen Bewertungsschemas, Aachen, 03.2021

Effects of Light on Attention of Fulltime Daytime Workers – A Laboratory Study

Hannah Rolf¹, Ljiljana Udovicic¹, Stephan Völker²

¹Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)

²Technische Universität Berlin (TUB)

Abstract

In addition to its impact on our circadian rhythm, researchers have investigated also alerting effects of light. While effects of light on sleep-wake rhythm and hormone cycles are well proven, evidence for effects on attention is less clear. Circadian effects of light can be best predicted by the activation of ipRGCs within the retina. Hence, we wanted to test the hypothesis whether an increase in activation leads to an improvement of attention during the day. Here we present a laboratory study that focused on alerting effects of light on fulltime daytime workers. We included a workday-like exposure duration and lighting scenes that comply with regulations for office workplaces. It was found that besides attention, participants' mood and perceived well-being were also affected. Contrary to our hypothesis, the results for different correlates of attention were best under lighting with the least activation of ipRGCs.

Index Terms: *NIF Effects, Alerting Effects, Attention, Light*

1 Introduction

In Germany, regulations for lighting at workplaces are defined by the Workplaces Ordinance and the associated Technical Rule ASR A 3.4 [5]. There, a minimal horizontal illuminance of 500 lx at desk level in the primary working area and a vertical illuminance of at least 175 lx are demanded. These regulations primarily focus on the assurance of a proper vision at work in order to complete the given working tasks. However, by now it is well known that light also elicits effects beyond vision. On one hand, long-term effects on the human circadian system, e.g. sleep-wake cycle and hormone cycles could be shown. On the other hand, research on acute effects on attention, mood and working performance gains more and more interest. Until now, several laboratory studies investigating the impact on attention have been conducted [14, 16]. Those studies show a great variability in study designs, lighting scenarios and correlates of attention that were investigated. In



general, studies were conducted either during the evening and night or during the day. In addition, some researchers focused on monochromatic light exposure, while others considered polychromatic white light. Concerning correlates of attention, three major groups of studies can be identified. In most studies subjective scales were used in order to gain knowledge about the perceived state of participants. Here, the Karolinska Sleepiness Scale (KSS) is most frequently used [14, 7]. Further information about acute effects are gathered by including psychomotor tasks. In general, these require a response to different types of stimuli. The complexity of the tasks and the exact implementation regarding types of stimuli, task duration or inter-stimulus intervals differs remarkably. However, certain types of tasks are used frequently, such as the Psychomotor Vigilance Task (PVT), the Go-NoGo-Task (GNG-Task) and the NBack Task. In addition, some studies also include physiological correlates of attention, such as heart rate variability, skin conductance or several EEG parameters. Although comparison of studies is impeded by the variations in study design, several research groups tried to narrow down the existing evidence by reviewing the body of research [1, 7, 14, 17]. Overall, some studies found effects of light on the attention, while others could not confirm them. Therefore, evidence for acute alerting effects is much smaller than for circadian effects. In general, this also is evoked by difficulties in study designs, such as too small sample sizes or lighting scenarios that are far away from real-life lighting. Still, in 2020 Brown published a metastudy in which he stated that effects on attention could be best predicted by the so-called melanopic equivalent daylight illuminance (MEDI) [2]. This value describes the activation of the photopigment melanopsin within a specific type of receptor cells of the retina (ipRGCs – intrinsically photosensitive retinal ganglion cells). It equals the illuminance that a D65 light source must have to elicit the same activation as the light source of interest. Those receptor cells are connected to several brain regions that control our circadian rhythm, as well as mood and attentional state. Therefore, they are thought to mainly mediate non-image forming (NIF) effects of light. The importance of the MEDI was further underlined in 2022 by Brown et al. who published recommendations for indoor light exposure [3]. For daytime levels, a MEDI threshold of 250 lx was introduced. Most of the existing literature on alerting effects of light does not explicitly focus on a variation of MEDI. Furthermore, many studies only include short exposure durations that are not easily translatable to real-life working conditions of fulltime daytime workers. Since especially ipRGCs are known to display a different temporal behavior than cones, it is possible that several effects can only be seen after longer exposure. In addition, regulations for lighting at workplaces should be considered in order to facilitate the transferability to real-life settings.

Our work was an attempt to address these issues by executing a laboratory study that includes a workday-like exposure duration, different lighting scenes that do all comply with existing lighting regulations for workplaces and a sample size of 42 participants.

2 Methodology

In the laboratory study, we included three lighting scenes that differed in their MEDI. For the first scene (wl – warm low) a color temperature of 2700 K and a horizontal illuminance of 500 lx at desk level was chosen. In order to increase the MEDI, the spectrum was then changed to a color temperature of 5400 K for the second lighting scene (cl – cool low). In order to further increase the MEDI, the spectrum was not changed, but the horizontal illuminance at desk level was set to 1500 lx (cb – cool bright). Figure 1 shows spectra and MEDI measured vertically on the anterior edge of the desk at a height of 120 cm. As shown there, changing the spectrum from wl to cl led to a 2.1 fold increase in MEDI, while increasing the illuminance gave a 2.8 fold increase. Thereby, the MEDI could be increased by a factor of approximately 5.9 from lighting scene wl to cb.

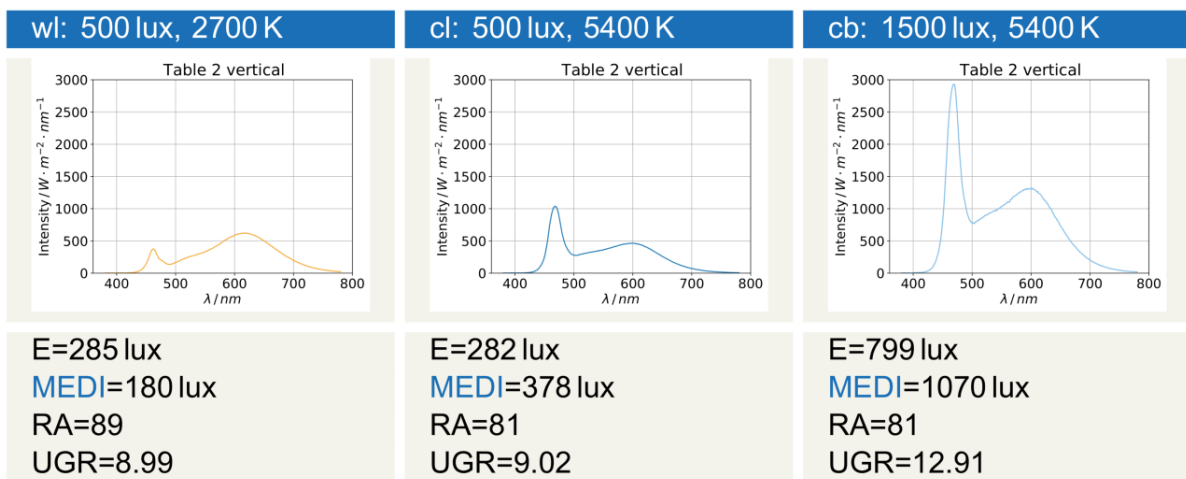


Figure 1: Information about lighting scenes.

To examine alerting effects of light, a combination of subjective scales and psychomotor tasks was used. In general, the KSS, a PVT, a combination of a GNG-Task and a 2-Back-Task, as well as a simple GNG-Task was included. In addition, participants completed the NASA-Task-Load-Index, as well as several visual analogue scales concerning their impression of the lighting and room and their mood state. Detailed information about scales and tasks and a discussion why they were chosen can be found elsewhere [10].

In general, we aimed at investigating the effects on different types of attention, lighting appraisals and mood. All tasks were completed six times a day, as shown in Figure 2.

Between test phases, participants completed different types of work tasks that were either chosen to simulate office work or motor work. These were also analyzed separately but were added particularly to ensure that attention had to be maintained over the full course of the day. Office work included text comprehension and typewriting, while in phases of motor work either constructs of building blocks on an elastic band had to be built or participants had to build a box from paper by cutting, drawing a pattern and assembling the box. Types of work were randomized in such a way that half of the participants started with the office work (A) in the mornings, while the other half started with motor work (B).

All participants completed four session days on which lighting scenes were shown in a randomized manner. Lighting scene cb was repeated twice. In addition, before the start of the first session, an introduction day was included. On this day, all tasks and work types were practiced in order to reduce possible learning effects. Figure 3 shows a photograph and a luminance image taken in the laboratory room.

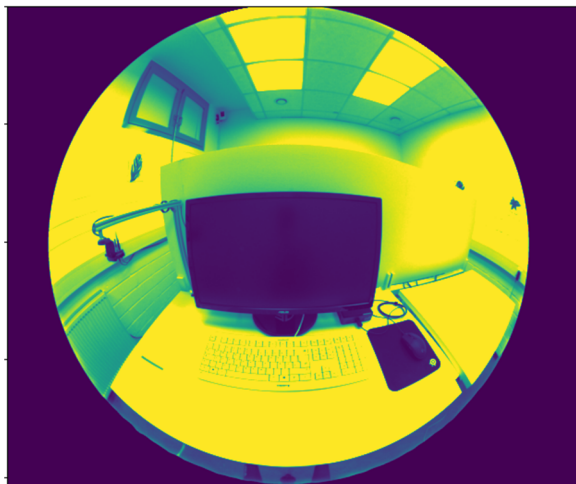


Figure 3: Luminance image and photograph of laboratory room.

In addition, several covariables were taken into account during the design of the study. Therefore, exclusion criteria were applied in order to obtain a more homogeneous group of participants. Only participants under the age of 35, who were no extreme chronotypes (as assessed by D-MEQ), did not show an explicitly bad sleep quality (as assessed by PSQI [3]), did not smoke or consume coffee, black tea or alcohol in an extensive manner and passed the Ishihara color blindness test were included. Other covariables, such as sex, order of working phases and whether participants were caffeine consumers could be included in the analysis.

9:00	Welcome
9:15	Test Phase 1
9:50	Office Work 1
10:45	Test Phase 2
11:20	Office Work 2
12:15	Test Phase 3
12:40	Lunch Break
13:20	Test Phase 4
13:55	Motor Skills 1
14:50	Test Phase 5
15:25	Motor Skills 2
16:20	Test Phase 6
16:45	Farewell

Figure 2: Protocol of a session day.

During the whole session block, participants wore Actiwatch Spectrum Devices (AWSDs) [7]. Those include three different sensors in the blue, green and red part of the spectrum. From these detectors, AWSDs also calculate illuminance values. In accordance to Price et al., we used the signal from the blue and green detectors in order to provide information about exposure in terms of MEDI [8].

2.1 Statistical Analysis

Data of test and work phases was analyzed using linear mixed models (LMMs). In general, these enable the inclusion of several parameters simultaneously, while also providing the opportunity to account for the within-subject design of the study. Hence, the participant ID (PID) was included as random intercept. Lighting Scenes (*case*) and Time Points (*time*) were used as fixed effects in every model. Further variables were included as fixed effects, whenever this inclusion led to an improvement of the so-called Akaike Information Criterion (AIC). This quantity described the information lost by a given model. Hence, the model with the smallest AIC was chosen in order to provide the analysis that best describes the data collected in the experiment. Optional fixed effects included the session day, sex, order of working phases, caffeine consumption and chronotype (*chron*). Furthermore, an interaction term of lighting and time points could be included if this led to an improvement of the AIC. For every parameter of the tasks and scales, a new model was built. Model assumptions of LMMs include normal distribution of residuals, as well as homogeneity of variances. Both were examined by visual inspection. Normal distribution was investigated by histograms, while for homogeneity of variance scatter plots of fitted against residual values were used. Here, data points should not display a strong pattern.

Besides continuous parameters, such as the mean reaction time during the PVT, also ordinal parameters, such as the KSS score or lapses, were investigated. However, these were also analyzed using LMMs. Although also other possibilities, such as proportional odd models were considered, these were rejected in favor of LMMs because they would require similarly occupied classes. On one hand we wanted to avoid a classification after acquiring the data, on the other hand classes would have to be built in such a way that they were similarly occupied which is why the meaning of classes could be questioned. Hence, LMMs were chosen and residuals were found to be generally normally distributed and scatter plots of residuals against fitted values did not display strong patterns besides the pattern introduced by the ordinal manner of the variable.

3 Results

3.1 Light Exposure

Vertical illuminance and MEDI was measured on every workplace in the laboratory room. Workplaces for motoric work were generally brighter because they did not

include a monitor. However, differences between the two motor and office workplaces were within the range of uncertainty of the spectroradiometer.

Differences in light exposure as measured by AWSDs were found to behave in the expected manner, as shown in Figure 4.

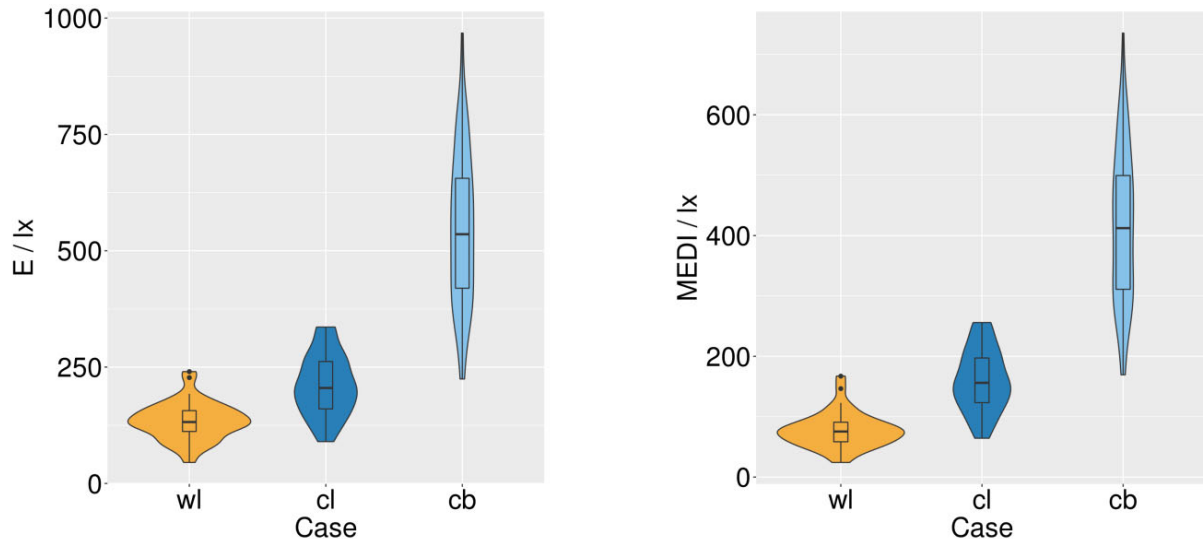


Figure 4: Average illuminance and MED1 during session days, measured by AWSDs.

However, illuminance values between cl and wl differed more than expected. This could be explainable by differences in the sensitivity curve used for the calculation of illuminance values by the AWSD and the exact $V(\lambda)$ curve, as discussed by Figueiro et al. [4]. AWSDs are likely to overestimate light in the blue range of the spectrum.

3.2 Test Phase – Mean reaction time of PVT

As an example, results for the mean reaction time (RT) of the PVT will be presented. The model that best described the measured data included the following variables:

$$\text{Mean RT} \sim \text{case} + \text{time} + \text{day} + \text{sex} + (1|\text{PID})$$

As already mentioned, the PID was included as random intercept. Predicted values of the model are shown in Figure 5.

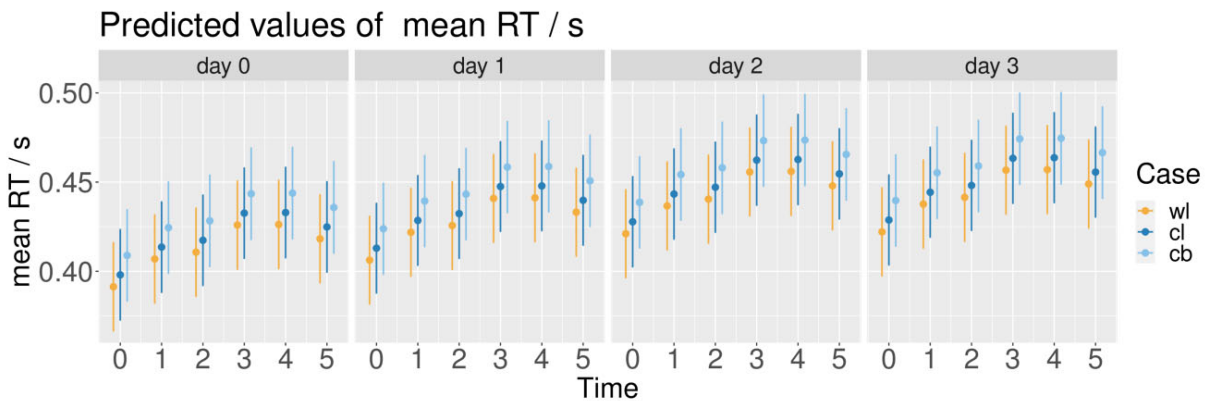


Figure 5: Predicted values for mean reaction time in PVT. Only differences in the parameters case, time and day are displayed.

Here, it is easily seen that reaction times increased during the day until time point three, were approximately constant on time point four and then decreased during the last test phase. In addition, reaction times increased from day one to three and did not change significantly again on day four. Regarding the effect of the lighting, it is crucial that reaction times were the lowest under the warm lighting and were significantly increased in both cold lighting scenes. Indeed, post-hoc testing revealed a significant difference between all lighting scenes.

3.3 Test Phase – KSS Score

KSS Scores were best predicted by the following model:

$$\text{KSS Score} \sim \text{case} + \text{time} + \text{day} + (1|\text{PID})$$

As shown in Figure 6, sleepiness was lower for the warm lighting. However, post-hoc testing did not reveal significant effects. Regarding the course of the day, sleepiness increased from time zero to one, while it decreased slightly until time point three. For time points four and five a significant increase in sleepiness was seen, while for the last test phase sleepiness was slightly reduced again. In comparison to day zero, sleepiness values were significantly increased on days two and three.

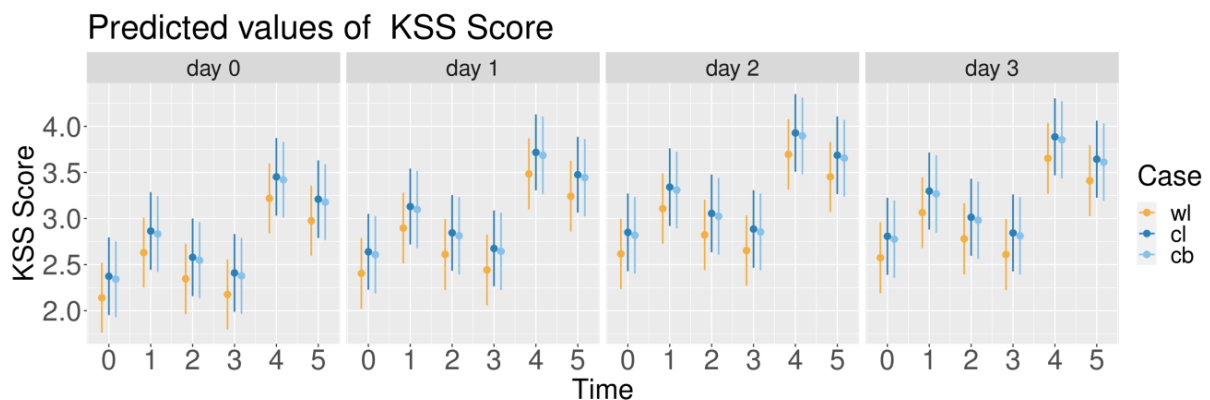


Figure 6: Predicted values of KSS scores. Only differences in the parameters case, time and day are displayed.

3.4 Test Phase – Lighting Appraisals and Mood

Figure 7 shows violin plots of the results of two different scales considering lighting appraisals. It is shown that the cold bright lighting was perceived as too cold and unnatural. In addition, several scales were also analyzed using LMMs. These included:

- Distraction
- Exhaustion
- Weariness
- Comfort

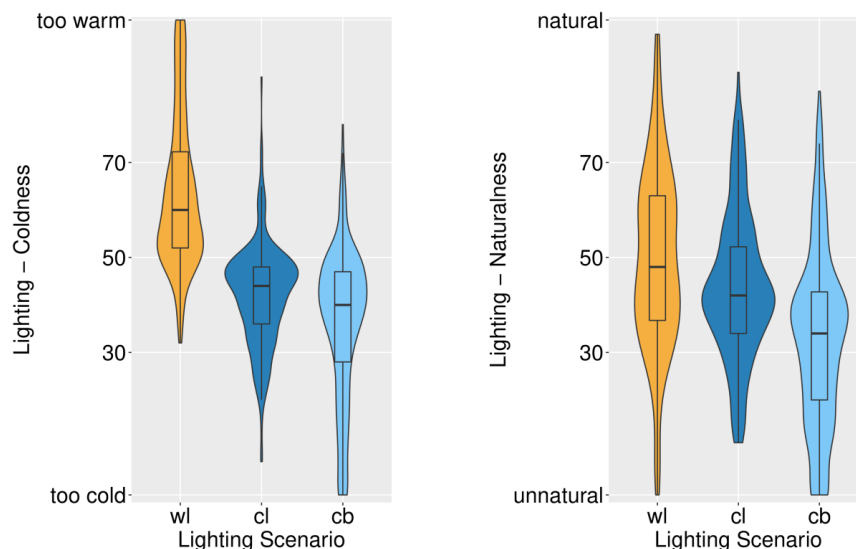


Figure 7: Ratings for coldness and naturalness of lighting scenes.

It was found that the warm lighting was perceived as significantly less exhausting, distracting and more comfortable than the cold bright lighting.

In general, parameters of test phases did either not show significant differences regarding lighting, or results were best under warm lighting.

3.5 Work Phases

For the parameters of work phases, no significant differences induced by the lighting scenarios were seen, except for a deviation in drawing patterns on boxes.

4 Discussion

Results of work and test phases were not in accordance with the hypothesis that an increase in MEDI would lead to improvements of attention. For most parameters the

warm lighting with the lowest MEDI led to the best results or parameters did not show differences regarding lighting. Furthermore, also lighting appraisals and perceived comfort and mood were best under warm lighting.

If ipRGCs also have the ability to influence our limbic system, it is understandable that such parameters may be affected by the present lighting in a similar manner as attention. In addition, it is possible that mood or comfort may in turn influence the attention of people. In 2011, Rautkylä et al. provided a model to describe the link between light exposure and brain mechanisms. Here the authors also included the limbic system and strongly recommend to take into account emotional components when investigating alerting effects of light [9].

In addition, there has been research on the effects of lighting on mood, workplace satisfaction and comfort or pleasantness [12, 14, 15]. However, results are partly contradictory and a full picture is still to be drawn. Nevertheless, it is quite clear that lighting has the potential to elicit changes in such parameters which may also in turn affect attention. Possibly, also intrinsic motivation may be influenced by light which may lead to improvements or impairment of attention [6].

The hypothesis that an increase in MEDI leads to an improvement of attention mainly considers the idea that a higher MEDI leads to an increase in ipRGC activation that in turn supports attention. However, even if this effect is evoked by either lighting scene cl or cb in this study, possible positive effects may be counteracted by negative effects of poorer mood and an increase in discomfort. Especially for long exposure durations, perceived discomfort may lead to severe impairments of test results. Furthermore, it is possible that the young study population that was included in the study can more easily compensate a lack of ipRGC activation than an increased feeling of unpleasantness.

Regarding the course of the day, it is striking that results improve during the last test phase for almost all parameters. It is suggested that this is a 'going-home-effect' meaning that participants have a higher intrinsic motivation due to the fact that they can leave the laboratory after this test phase. Effect of the lunch break were only seen in some parameters.

5 Conclusion

In general, the hypothesis that an increase in MEDI leads to an improvement of attention during the day could not be supported by the study results. In future studies, effects on mood and comfort should be equally included in the study designs and addressed by questionnaires. For real life workplaces our results show that not only an increase in MEDI, but also the effects on mood and comfort should be considered when changing lighting at office workplaces. Hence, more pleasing lighting solutions are favorable. These may include the possibility for employees to control brightness, spectral composition or proportion of direct and indirect lighting to increase overall acceptance and comfort.

Overall, further studies that equally consider the interplay of effects of light on attention, mood and well-being should be executed in order to increase our existing knowledge and enable the design of new lighting solutions that support people's attention but also well-being at work.

6 Literaturverzeichnis

[1] Alwalidi, Margarita; Hoffmann, Sabine (2022): Alerting Effect of Light: A Review of Daytime Studies. In: *Journal of Daylighting* 9 (2), S. 150–163. DOI: 10.15627/jd.2022.12.

[2] Brown, Timothy M. (2020): Melanopic illuminance defines the magnitude of human circadian light responses under a wide range of conditions. In: *0742-3098 n/a (n/a)*, e12655. DOI: 10.1111/jpi.12655.

[3] DGSM (2020): Pittsburgh Schlafqualitätsindex (PSQI). Online verfügbar unter https://www.dgsm.de/fachinformationen_frageboegen_psqi.php.

[4] Figueiro, M. G.; Hamner, R.; Bierman, A.; Rea, M. S. (2013): Comparisons of three practical field devices used to measure personal light exposures and activity levels. In: *Lighting Research & Technology* 45 (4), S. 421–434. DOI: 10.1177/1477153512450453.

[5] Lok, Renske; Smolders, Karin C. H. J.; Beersma, Domien G. M.; Kort, Yvonne A. W. de (2018): Light, Alertness, and Alerting Effects of White Light: A Literature Overview 33 (6), S. 589–601. DOI: 10.1177/0748730418796443.

[6] Makki, Arooj; Abid, Momina (2016): Influence of Intrinsic and Extrinsic Motivation on Employee's Task Performance. In: *SASS* 4 (1), S. 38. DOI: 10.5430/sass.v4n1p38.

[7] Philips (2023): Actigraphy technology and solutions | Philips. Online verfügbar unter <https://www.usa.philips.com/healthcare/sites/actigraphy>, zuletzt aktualisiert am 23.02.2023, zuletzt geprüft am 24.02.2023.

[8] Price, Luke L. A.; Udovičić, Ljiljana; Behrens, Thomas; van Drongelen, Alwin; Garde, Anne Helene; Hogenelst, Koen et al. (2019): Linking the non-visual effects of light exposure with occupational health. In: *International Journal of Epidemiology* 48 (5), S. 1393–1397. DOI: 10.1093/ije/dyz131.

[9] Rautkylä, E.; Puolakka, M.; Halonen, L. (2012): Alerting effects of daytime light exposure – a proposed link between light exposure and brain mechanisms. In: *Lighting Research & Technology* 44 (2), S. 238–252. DOI: 10.1177/1477153511409294.

[10] Rolf, Hannah; Udovicic, Ljiljana; Völker, Stephan (2021): Effects of Light on Attention during the Day: Spectral Composition and Exposure Duration. *Lux junior 2021: 15. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs*, 04. – 06. Juni 2021, Ilmenau : Tagungsband, p. 211. DOI: 10.22032/DBT.49330.

- [11] Souman, Jan L.; Tinga, Angelica M.; Te Pas, Susan F.; van Ee, Raymond; Vlaskamp, Björn N. S. (2018): Acute alerting effects of light: A systematic literature review. In: *Behavioural Brain Research* 337, S. 228–239. DOI: 10.1016/j.bbr.2017.09.016.
- [12] Veitch, Jennifer A.; Stokkermans, Mariska G. M.; Newsham, Guy R. (2013): Linking Lighting Appraisals to Work Behaviors. In: *Environment and Behavior* 45 (2), S. 198–214. DOI: 10.1177/0013916511420560.
- [13] Vetter, Céline; Pattison, P. Morgan; Houser, Kevin; Herf, Michael; Phillips, Andrew J. K.; Wright, Kenneth P. et al. (2022): A Review of Human Physiological Responses to Light: Implications for the Development of Integrative Lighting Solutions. In: *LEUKOS* 18 (3), S. 387–414. DOI: 10.1080/15502724.2021.1872383.
- [14] Zeng, Yunyi; Sun, Hongli; Yu, Juan; Lin, Borong (2022): Effects of correlated color temperature of office light on subjective perception, mood and task performance. In: *Building and Environment* 224, S. 109508. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109508.
- [15] Zhu, Yingying; Yang, Minqi; Yao, Ying; Xiong, Xiao; Li, Xiaoran; Zhou, Guofu; Ma, Ning (2017): Effects of Illuminance and Correlated Color Temperature on Daytime Cognitive Performance, Subjective Mood, and Alertness in Healthy Adults 51 (2), S. 199–230. DOI: 10.1177/0013916517738077.

Light-based Solutions for the Acceptance of Facing Rearward in Autonomous Vehicles

Leonhard Rottmann

HELLA GmbH & Co. KGaA

Abstract

The introduction of autonomous vehicles into road traffic is accompanied by the development of innovative seating layouts. Concepts of such layouts often include rotatable front seats, which are supposed to enable a new level of social interaction during autonomous driving and find much approval among potential users. This contrasts with a seemingly very low willingness to be driven autonomously while sitting in the opposite direction of travel. Two reasons for this emerge, lack of trust in the autonomous vehicles and fear of motion sickness. With both being a point of concern in AVs in general, research suggests them being even more eminent when facing against the direction of travel.

Based on current literature, a new model is proposed taking seating orientation and motion sickness into account. Building on this model, the use of light-based HMIs to increase transparency with respect to perception and intention of the AV is discussed. The goal of the work is to gain a more detailed understanding of the acceptance of rearward seating orientations in autonomous vehicles, incorporating trust and motion sickness.

Index Terms: Autonomous vehicle, HMI, motion sickness, trust, acceptance

1 Introduction

SAE L4 and L5 autonomous vehicles (AVs) are anticipated to improve road safety and eco friendliness. Further advantages include an improved utility and comfort for the driver, who's role transitions to that of a passenger free to use the traveling time for non-driving related tasks (NDRTs), such as working, playing games, watching movies or social interaction with other passengers. Many concepts of such AVs, e.g., of autonomous shuttles include seating arrangements with rotatable or rearward facing seats, (Mercedes-Benz F 015, Volkswagen SEDRIC, Yanfeng Automotive Interiors XiM18, Zoox Boz, Volvo 360c, Renault Symbioz, Renault EZ-Ultimo, Nio EVE, ...), as they are common in public transportation vehicles such as trains and busses. Advantages of such seating setups include not only a potentially increased safety



during crashes [28], but also the support of social activities during autonomous rides [27, 30, 49].

2 Motivation

Pettersson and Karlsson found that potential passengers of autonomous vehicles put a focus on social aspects of AVs: “Being able to engage more in other passengers was perceived as one of the main values to be found in autonomous cars” [49]. Participants were asked to draw the car designs they imagined for autonomous driving, with 89% of the participants drawing interior concepts with rotatable seats. In a study conducted by Jorlöv et al., a setup with two front-facing and two rearward-facing seats was preferred over setups with 90-Degree and 46-Degree rotated seats that faced each other [30]. An expert workshop conducted by Sun et al. (2021) to arrive at “a new type of seat, [...] which could be adjusted for use on non-driving orientated activities”, resulted in an interior concept with rotatable front seats [58]. While there appears to be a general desire for setups with rearward facing seats in autonomous cars, especially when traveling with peers as opposed to strangers, there are reservations towards facing rearwards while being driven. Han et al. (1998) found that train passengers “like being seated in the same direction (‘forward’) nine times more than the opposite one (‘backward’)” [21]. A survey conducted by Murphy et al. (2013) revealed that 17% of respondents ruled out sitting backwards in a train entirely. Here the question arises as to the acceptance of sitting backwards in non-rail bound L4 and L5 AVs [43]. The following sections explain why this acceptance is expected to be even lower.

3 Transparency and Trust

Literature suggests that informational needs of passengers of AVs include transparency concerning the vehicles perception and intentions (e.g., [1, 17]). Using a simulator study and comparing manual, L2 and L3 automated driving, Beggiato et al. found that the most requested information in automated driving is on system status, current and planned maneuvers, and surrounding traffic [1]. Similarly, Feierle et al. report that mainly information about maneuvers, about reasons for those maneuvers and about the surroundings were demanded by participants of a simulator study with L3 automation [17]. Kaber et al. (2012) stress that passengers of AVs desire to monitor lateral and longitudinal driving maneuvers as well as the cars reactions to the road and traffic situation [31]. Sun et al. found that passengers of L3 AVs “exhibited strong needs to monitor the driving tasks to enhance their situational awareness” [58]. Evidence suggests that these needs persist at higher automation levels, at least in passengers that do not fully trust the AV yet. In a dynamic driving simulator study, Chang et al. (2019) found that the use of a situational awareness display that depicts the AVs perception and intentions increases trust in passengers of autonomous taxis [8]. Choi & Ji (2015) report that system transparency explains a significant portion of variance of trust in AVs [11]. Beggiato et al. report a connection between trust and

information needs: “The more trust, the less information is demanded” [1]. Paddeu et al. (2020) found that rearward facing passengers report significantly lower trust and comfort than forward facing passengers of autonomous shuttles [47]. Since rearward facing passengers experience less trust than forward facing passengers, this lack of trust might be explained by the lack of information due to reduced visibility of the surroundings and upcoming traffic events. Based on these findings, two main differentiators between forward- and rearward facing seating positions in autonomous cars can be distinguished. On one hand, rearward facing passengers experience lower *intention transparency*, that is the vehicle’s ability to adequately communicate its planned driving maneuvers to the passengers (e.g., direction and intensity of upcoming longitudinal and lateral motion). On the other hand, they also experience less *perception transparency*, that is the vehicle’s ability to adequately communicate what elements of the driving environment it recognizes (e.g., other relevant road users and objects like traffic signs).

Since the intention to use and the acceptance for such vehicles is dependent on the amount of trust put into them [3, 7, 10, 11, 16, 24, 28, 33, 44, 48, 68, 69, 71, 72], the question arises whether the trust of rearward facing passengers can be increased by increasing to a level as close as possible to that of forward facing passengers by increasing intention transparency and perception transparency. Achieving this goal would aid enabling the advantages of self-driving shuttles and AVs with face-to-face seating layouts in general.

4 Motion Sickness

Lack of trust and information is not the only factor preventing passengers of AVs from wanting to sit facing rearward. While some report that a fundamentally changed interior could scare other road users who are afraid of AVs [49], one of the most fundamental concerns regards the fear of motion sickness [34]. Motion sickness is already a concern in AVs with traditional seating layouts, since the renunciation from the driving task and the increased engagement in NDRTs leads to less predictability of upcoming maneuvers and therefore a higher probability of a neural mismatch between anticipated and felt motion of the passengers [14, 15, 19]. According to the neural mismatch and sensory rearrangement theory [51], this mismatch leads to symptoms like nausea. Another explanation for the occurrence of motion sickness is found in the postural instability theory, which states that the lack of postural stability, which can be caused by not being able to properly anticipate upcoming movements, leads to motion sickness [54]. Literature suggests that motion sickness is significantly higher when being driven and facing rearwards rather than forwards due to an even more impaired ability to anticipate the upcoming motion trajectory [5, 15, 55, 60]. On the contrary, Schmidt et al. (2019) found no effect of seating direction on motion sickness during real highway and inner-city drives [56].

5 Autonomous Driving Acceptance Model

To improve the acceptance of facing rearwards in AVs, we must first understand how this acceptance comes about. Since no existing model of the acceptance of autonomous vehicles fully accounts for the positive impact of information transparency or the negative impact of motion sickness, current models cannot adequately explain the difference in acceptance between using AVs while being seated facing forwards and being seated facing backwards. Given the theoretical and empirical background presented, a new Autonomous Driving Acceptance Model for SAE levels 4 and 5 (ADAM) is postulated (Fig.1). It builds upon the Autonomous Vehicle Acceptance Model (AVAM) that was proposed by Hewitt et al. (2019) and the model for the acceptance of driverless automated shuttles proposed by Nordhoff et al. (2021a) [25, 44]. AVAM is based on the Universal Theory of Usage and Acceptance of Technology (UTAUT) [61] and the Car Technology Acceptance Model (CTAM) [46]. AVAM predicts the behavioural intention to use AVs on the basis of seven factors: performance expectancy, effort expectancy, attitude, social influence, self-efficacy, anxiety and perceived safety.

However, since ADAM only accounts for L4 and L5 autonomous driving, self-efficacy is negligible because there is no demand regarding specific abilities or competences such as supervising the vehicle or taking over control. Furthermore, Hewitt et al. found the importance of effort expectancy to shrink with increasing automation level [25]. Since L4 and L5 autonomous driving does not require any input from the passengers and instead allows them to pursue NDRTs, effort expectancy should not have an influence on its acceptance. Consequently, Nordhoff et al. (2021a) found no such effect [44]. In their meta-analysis, Zhang et al. (2021) found that perceived ease of use, which they equate with effort expectancy, is a significant predictor for behavioral intention when it comes to partial automation, but not when it comes to full automation [72].

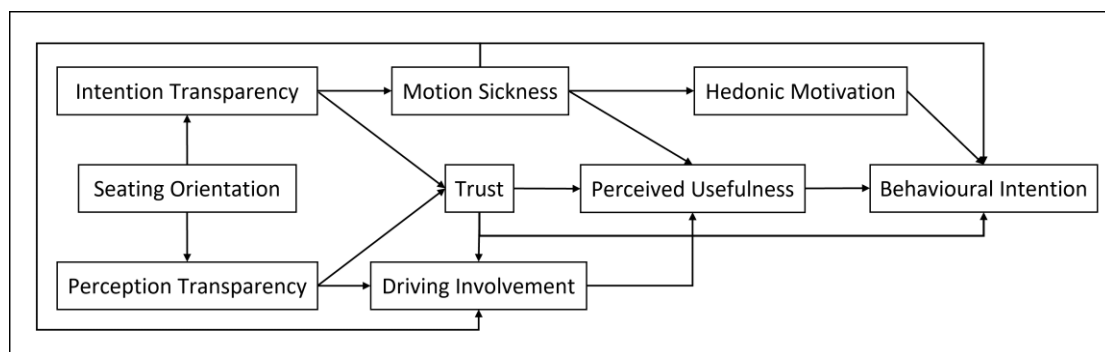


Fig. 1. Autonomous Driving Acceptance Model.

For this reason, effort expectancy too is eliminated from the proposed model. The possibility of NDRTs being one of the biggest advantages of L4 and L5 AVs, performance expectancy is replaced by perceived usefulness, derived from the CTAM. While literature suggests the two to be interchangeable [45, 68, 71],

perceived usefulness takes the passengers' freedom of choosing how to use travel time to their liking into account and therefore presents a better fit for fully automated and autonomous driving, specifically.

Since trust is highly negatively correlated with anxiety and highly positively correlated with perceived safety, both are removed, as it is assumed that the predictive power of both factors will render insignificant as soon as trust is added to the model. Zhang et al. (2020) proposed a structural model that included initial trust as the main predictor for attitude toward using AVs [70]. In this model, perceived safety risk had a significant effect on initial trust. Similarly, Nordhoff et al. (2021a) included trust as opposed to perceived safety in their “structural equation modeling approach for the acceptance of driverless automated shuttles” and found trust to be the second-strongest predictor for behavioral intention after compatibility [44]. Nordhoff et al. (2021a) adopted compatibility as well as trialability from the Diffusion of Innovation Theory (DIT), [44, 52]. However, along with automated shuttle sharing, these factors specifically aim at the use of shared autonomous shuttles. Rahman et al. (2019) found no effect of compatibility on acceptance of non-publicly shared AVs and since ADAM is universally applicable for both privately owned AVs as well as shared shuttles, these factors are neglected here [53].

Concerning social influence, Zhang et al. (2020) found it to be a significant predictor for trust and perceived usefulness, as well as behavioral intention [70]. For this reason, these effects are integrated into the proposed model. They also found a significant correlation between trust and perceived usefulness. This is in line with the rationale that a lack of trust would lead to self-assuring behaviour, such as active monitoring of the vehicle and traffic. Such behaviour would prevent passengers from conducting NDRTs and therefore diminish the usefulness of the autonomous drive. For this reason, trust is anticipated to predict perceived usefulness. Hewitt et al. define attitude toward using technology as “an individual’s overall affective reaction upon using a system”. However, when establishing UTAUT, Venkatesh et al. (2003) substantiate the omission of attitude by reporting “empirical evidence to suggest that affective reactions [...] may operate through effort expectancy” [61]. Since effort expectancy is not anticipated to be influential to the acceptance of L4 and L5 AVs, attitude is replaced by hedonic motivation. Venkatesh et al. (2012) define hedonic motivation as “the fun or pleasure derived from using technology” and establish it as a predictor of behavioral intention in UTAUT2 [62]. Nordhoff et al. (2021b) found hedonic motivation to be the strongest predictor for the intention to use automated shuttles [45].

Motion sickness expectancy is included to accommodate for the influence of motion sickness on the acceptance of AVs. It is also expected to negatively influence usefulness, since the experience of motion sickness typically leads to motion sickness mitigating behavior, such as staring at the horizon or closing one’s eyes. Similar to the effect of lack of trust, this would prevent passengers from conducting

their desired NDRTs, again diminishing the autonomous drive's usefulness. Motion sickness is also expected to have a negative impact on hedonic motivation since experiencing symptoms like nausea should reduce the sense of pleasure while using an AV.

6 Interior Lighting

Having identified the factors that determine the acceptance of facing rearwards in AVs, means to enhance that acceptance need to be developed. Since rearward facing passengers are not able to gather information about the vehicle's perception and action via a quick glance through the windshield, the informational demand of such passengers is expected to be even more urgent than that of forward facing passengers. This information should ideally be delivered in ways that make it perceivable and processable without the need for full attention, which would require the interruption of NRDTs. Wolfe et al. (2017) argue that *"The shift towards increased automation in the vehicle will result in increasing periods of time when the driver is oriented well away from the roadway, rendering it imperative that we consider the capabilities and limitations of vision throughout the entire field of view. [...] much of visual information acquisition and processing does not require attention"* [67]. They stress the importance of considering peripheral information when designing HMLs of AVs and the necessity to gather a better understanding of the capabilities of the peripheral field of view in this context. To this end, the use of interior ambient lighting emerges as a promising medium to convey such information, since it has shown to be perceivable and processable via the peripheral field of view [2].

6.1 State of the Art

While a handful of manufacturers have already started to implement informational functionality through ambient lighting, primarily in the form of a blind spot warning function (2020 Seat Leon, 2021 Mercedes S-Class), several studies have shown that this functionality can be extended to meet various informational needs. Pfromm et al. (2013) implemented a 360° LED strip in a static driving simulator to indicate the distance of relevant traffic objects to the ego vehicle, which led to shorter gaze attention times [50]. Furthermore, the authors report an intuitive understanding and high acceptance of the system, which indicates that such a function can potentially cater to the informational needs of passengers of AVs by providing them with transparency about the vehicles perceptions from the peripheral field of view. Löcken et al. (2015) visualized lane change recommendations and warnings during manual highway drives, again utilizing a 360° LED strip in a static driving simulator [39]. Using different colors and blinking frequencies, the concept led to significantly less critical lane changes and more lane changes to the right. Meschtscherjakov et al. (2015) used LED strips mounted on the A-Pillars of a manually driven driving simulator to visualize either a predefined speed, the current speed, or the current speed limit [41]. They found that displaying the current speed limit through LED strips

improves the convergence of the current speed towards that limit in manually operated cars and conclude that peripherally perceivable speed information is less visually distractive than glances at the speedometer. Matviienko et al. (2016) implemented navigation aids in the form of light signals from an LED strip mounted to the steering wheel in a manually operated driving simulator [40]. They found that the peripherally perceived signals drew less attention time from the driver and were preferred over traditional display-based navigation aids.

Since then, the rise of interest in AVs spawned research on the application of ambient lighting functions for automated and autonomous driving. Van den Beukel (2016) compared light-based iHMIs with auditive and graphic iHMIs with regards to their ability to aid drivers in L3 AVs [4]. He found light-based information transmission to be superior to displays and acoustic information transmission in terms of situational awareness, acceptance, and the perceptibility of potentially dangerous situations from the peripheral field of view, further exemplifying the benefits of transmitting information that is perceivable and processable without the need for full attention. Löcken et al. (2016) used LED strips between A- and B-pillars to indicate acceleration, deceleration, turning- and lane change maneuvers in L4 highway drives with a static simulator [37]. They conclude that the depiction of intended maneuvers of automated vehicles through LED strips helps passengers to understand these maneuvers. However, the system was only evaluated qualitatively and no conclusion with regards to trust, acceptance or user experience was made. Wilbrink et al. (2020) conducted a VR study with a virtual L4 vehicle in urban driving scenarios and displayed either the vehicles intentions or it's perception via LED strips [65]. They found that both variants can increase the usability of L4 AVs as well as trust in them, with no significant differences between the two concepts. This begs the question whether the simultaneous display of both perception and intention has additional benefits.

Lau et al. (2020) found that passengers of L3 AVs prefer the depiction of the vehicle's status, it's intended maneuvers and the detection of other road users through LED strips during NDRTs [36]. Without NDRTs, they prefer the depiction of only the vehicle's status. Colley et al. (2021) used LED strips as well as augmented reality (AR) and a head-up-display (HUD) in a VR study to visualize critical vulnerable road users and the vehicles intended reaction to them. They found that each concept increases perceived safety and trust in L5 AVs as well as perceived intelligence and intention of the developers compared to a baseline with no visualization. While there was no evidence for the superiority of the LED based iHMI compared to the AR and HUD based iHMIs, this might be explained by the fact that the participants did not engage in any NDRTs during the rides, which renders the LEDs' advantage of visibility via the peripheral field of view insignificant. Schneider et al. (2021) conducted a study with a static driving simulator and found that system information transmitted via a combination of app, augmented reality and LED strips improves usability, user experience and perceived control during L5 autonomous rides [57].

Again, the participants were not instructed to engage in any NDRT, so conclusions on the effectiveness in use cases with occupied passengers cannot be deduced. Hecht et al. (2022) utilized LED strips that color coded the remaining time until the next takeover request in L3/L4 AVs through a study with a static simulator [22]. The concept led to higher usability and lower workload compared to a baseline without such functionality. Using an online video study, Tinga et al. (2022) found that displaying the reliability of the automation via LED strips increases usability, number of correct statements during thinking-aloud and less subjective expenditure of time in automated vehicles [59]. Interestingly, Colley et al. (2022) found that not displaying the AVs perception or intention at all, but instead masking the environment and replacing it by an alternative one without any traffic leads to even higher trust, usefulness, perceived safety, and satisfaction [13]. However, these findings are based on an online video study, which raises the question whether passengers still prefer such a system in real traffic, which might differ in terms of perceived risk.

Additionally, video studies are not feasible to investigate the mitigation of motion sickness as another enabler for the acceptance of facing rearwards in AVs. Concerning this mitigation, Diels et al. (2016) suggest to “*allow occupants to anticipate the vehicle’s motion trajectory*” and consider this a fundamental principle for the design of AVs [15]. Kuiper et al. (2018) asked participants to conduct tasks on a tablet that was either mounted on the dashboard of an L5 AV or at height of the glovebox [35]. Participants using the former experienced significantly less motion sickness. Based on these findings, the authors conclude that stimuli perceived via peripheral vision can help mitigate motion sickness. In recent years, the use of light-based cues to achieve this purpose has been investigated by a handful of researchers. Bohrmann et al. (2021) investigated the effect of ambient lighting that dynamically adapts to the current speed and change of speed of an AV on Motion Sickness and conclude that visualizing the longitudinal vehicle dynamics “*could have potential benefits in the mitigation of carsickness*” [6]. They stress that “*subsequent studies should consider additional visualization of lateral vehicle dynamics to extend the functionality of the feedback system as well as adding diffuser covers to potentially mitigate mental workload or overstimulation.*” However, the authors focused on displaying current as opposed to upcoming maneuvers, which might not be an ideal approach to resolve a neural mismatch between anticipated and felt motions. Additionally, only longitudinal dynamics were visualized, which raises the question what the ideal visualization for lateral or circular motions would be. Using a motion platform in combination with VR, Bloch investigated the effect of visual cues on the door panels, between the back seats and on the floor of the AV that represent an AV’s motions either in real-time or half a second in advance [5]. Participants were seated facing rearwards and occupied by playing a computer game while being driven. Bloch found a reduction of motion sickness symptoms of 8% for real-time cues and 9% for predictive cues, both statistically significant. A possible explanation for these relatively small effects could be the confounding impact of simulator

sickness [42]. Low fidelity in VR and dynamic simulators can cause this subtype of motion sickness even when the passengers have full vision on the road ahead [9, 26, 66]. Sensory conflicts due to simulator sickness were not addressed by the visual cues used in the experiment, which might be why motion sickness was only mitigated partially. This raises the question on how effective these motion cues would render in actual car rides.

Using a hidden driver, Bin Karjanto et al. (2017) conducted a Wizard-of-Oz (WoZ)-Study to simulate a L5 AV and compared drives with LEDs that indicate turning maneuvers 3 seconds in advance to drives without such LEDs [32]. The LEDs led to significantly lower motion sickness and higher situational awareness. Similarly, Hainich et al. (2021) used ambient LED strips to visualize upcoming turning maneuvers via light signals [20]. The function was able to mitigate motion sickness in especially susceptible passengers during drives on a test track with a L4 AV. However, NDRTs were operationalized by completely blocking the outside view. While this proves to be an effective way of inducing a neural mismatch, the external validity of such an operationalization seems questionable, since NDRTs like using a phone, reading, or working still allow for occasional glances through the car's windows. Nevertheless, there is evidence for the effectiveness of visualizing upcoming motions to mitigate motion sickness. Still the question arises as to whether this effect can be enhanced by providing a finer graduation of the vehicle's dynamics, similar to the approach by Bohrmann et al. [6].

6.2 Requirements for Future Concepts

The visualization of the AV's intended maneuvers and perceived environment is expected to increase the intention transparency and perception transparency and therefore counteract the negative impact of a rearward facing seating position on these factors. That in turn should then improve motion sickness expectancy, trust, NDRT-freedom, perceived usefulness, hedonic motivation, and behavioural intention (Fig. 2).

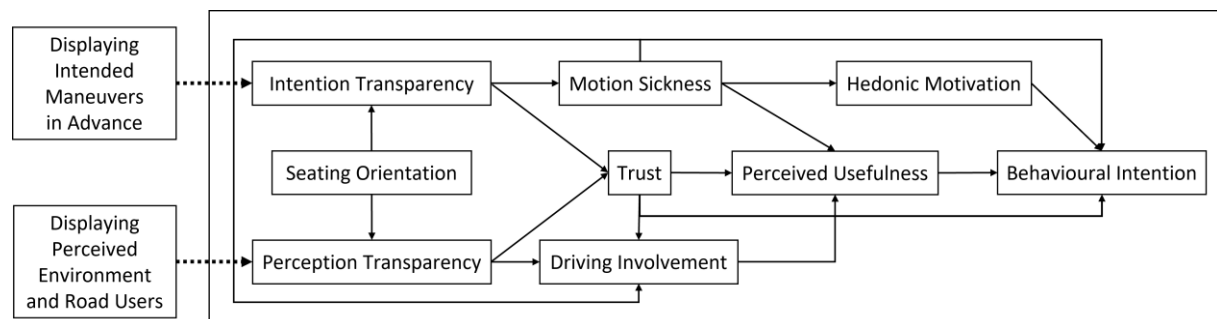


Fig. 2: Increasing acceptance by improving intention transparency and perception transparency.

Functional interior lighting is anticipated to also improve those variables in forward facing passengers, as they also engage in NDRTs, therefore do not have full information about the vehicle's perception and intentions and should profit from information provided to them via their peripheral field of view. However, this improvement is expected to be lower than in rearward facing passengers, since they have even less information about the vehicle's perception and intention. To enable this information transfer, perceptibility via the peripheral field of view needs to be ensured. Simultaneously, passengers must not be blinded or distracted from their NDRT, since this would negatively impact their acceptance of facing rearwards. A balance for achieving visibility and avoiding distraction and glare needs to be established by identifying ideal parameters for position and size of the light sources in the vehicle interior. Addressing the question concerning the position of light-based in-vehicle HMIs is necessary because existing research on this topic mainly focuses on a traditional driver's position [38, 39]. According to Funke and Frensch (2006), color detection is expected to be worse in peripheral vision than in foveal vision, since the number of cones on the retina diminishes with increasing distance from the fovea [18]. Regarding the size of the light source, Wernecke and Vollrath (2010) found that larger light sources are easier to perceive via the peripheral field of view [63]. According to Funke and Bengel, a sufficient size of the peripheral object can aid the perceptibility of changes in color via the peripheral vision. Since coding different messages via light signals at once might prove to be beneficial, enabling passengers to clearly distinct between different colors and color changes through the use of appropriate sizes of the peripheral light displays is desirable. However, it is still unclear whether simply maximizing the size of the light source is helpful for information transfer during NDRTs or rather distracts from them.

Additionally, light sources need to be positioned in a way that ensures equal perceptibility and understandability for forward facing passengers and rearward facing passengers. Weirich et al. (2022) conducted an online study and compared various positions for LED-strips through preference ratings on abstract renderings of car interiors [62]. For manual driving, they found a preference for LED-strips beneath the side windows and at the foot area, both of which are already established positions in modern cars. Interestingly, preferences were much more equally distributed between various positions, such as at the ceiling and the a-pillars for autonomous driving. The finding that there seems to be no clear preference for positioning of interior lighting during autonomous driving might suggest that the ideal positioning depends on the current NDRT, since the peripheral field of view changes with the orientation of the passenger and the current NDRT. For example, light from surfaces on the ceiling of the vehicle might prove to be more perceptible from a reclined seating position used for relaxation. Light signals from the floor mats could be more perceptible when the passenger reads a book or works on a tablet, which often entails a downward tilt of the head. Light from the door panels and the pillars of AVs could be used to enhance the visibility of signals during social interaction, since these surfaces are more at level with

the faces of other passengers. Overall, illuminating these surfaces could aid to make displayed signals more perceptible than using only LED strips beneath the windows, which have already been investigated extensively. A comparison between light-based HMIs on these surfaces during various NDRTs is necessary to identify optimal positions. Existing HMI concepts typically display simple information like system status or intended turning maneuvers via LED strips (e.g., [20, 22]) and more complex information like allowed NDRT in current driving mode or detected other road users via displays (e.g., [8, 58]). However, the display of complex information via the peripheral field of view might prove to be superior to the use of traditional displays that require direct attention. To this end, the use of larger light-emitting surface areas provides new possibilities in terms of pattern complexity. In comparison to LED-strips, which typically only have a single LED in one dimension and multiple LEDs in another, LED-arrays consist of multiple LEDs in both dimensions. These “two-dimensional” arrays allow for the depiction of symbols and more complex animations. Optimal light-signals for coding different messages about the vehicles perception and intention need to be identified to ensure that those messages are not only easy to perceive but also to comprehend.

7 Conclusion and Outlook

While rotating seats in AVs offer opportunities for new levels of social interaction during car rides, motion sickness and lack of trust inhibit their acceptance from potential passengers. Perception transparency and intention transparency are elaborated as key factors to manipulate these factors in order to facilitate acceptance. Interior lighting is identified as a promising medium to convey information about the vehicle intention and perception to passengers without causing distraction from NDRTs. Future research needs to examine the required parameters for position, size, and visual qualities e.g., resolution and luminance of the interior lighting elements to prevent distraction and ensure peripheral visibility. Furthermore, an optimal degree of complexity for light-based messages needs to be identified to ensure comprehensibility while still providing sufficient details.

8 References

- [1] Beggiato, M., Hartwich, F., Schleinitz, K., Krems, J., Othersen, I., & Petermann-Stock, I. (2015). What would drivers like to know during automated driving? Information needs at different levels of automation. In *7. Tagung Fahrerassistenzsysteme*.
- [2] Bengler, K., Rettenmaier, M., Fritz, N., & Feierle, A. (2020). From HMI to HMIs: Towards an HMI framework for automated driving. *Information*, 11(2), 61.

- [3] Benleulmi, A. Z., & Blecker, T. (2017). Investigating the factors influencing the acceptance of fully autonomous cars. In *Digitalization in Supply Chain Management and Logistics: Smart and Digital Solutions for an Industry 4.0 Environment. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Vol. 23* (pp. 99-115). Berlin: epubli GmbH. 10.15480/882.1449
- [4] van den Beukel, A. P. (2016). Driving automation interface design: supporting drivers' changing role. 10.3990/1.9789036542395
- [5] Bloch, M. (2018). *Alleviating motion sickness through presentations on interior panels of autonomous vehicles* (Master's thesis, University of Twente).
- [6] Bohrmann, D., Bruder, A., & Bengler, K. (2022). Effects of Dynamic Visual Stimuli on the Development of Carsickness in Real Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(5), 4833-4842. 10.1109/TITS.2021.3128834
- [7] Buckley, L., Kaye, S. A., & Pradhan, A. K. (2018). Psychosocial factors associated with intended use of automated vehicles: A simulated driving study. *Accident Analysis & Prevention*, 115, 202-208. 10.1016/j.aap.2018.03.021
- [8] Chang, C. C., Grier, R. A., Maynard, J., Shutko, J., Blommer, M., Swaminathan, R., & Curry, R. (2019, November). Using a situational awareness display to improve rider trust and comfort with an AV taxi. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 63, No. 1, pp. 2083-2087). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications. 10.1177/1071181319631428
- [9] Chang, E., Kim, H. T., & Yoo, B. (2020). Virtual reality sickness: a review of causes and measurements. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 36(17), 1658-1682. 10.1080/10447318.2020.1778351
- [10] Cho, Y., Park, J., Park, S., & Jung, E. S. (2017). Technology acceptance modeling based on user experience for autonomous vehicles. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 36(2), 87-108. 10.5143/JESK.2017.36.2.87
- [11] Choi, J. K., & Ji, Y. G. (2015). Investigating the importance of trust on adopting an autonomous vehicle. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 31(10), 692-702. 10.1080/10447318.2015.1070549
- [12] Colley, M., Britten, J., Demharter, S., Hisir, T., & Rukzio, E. (2022, September). Feedback Strategies for Crowded Intersections in Automated Traffic—A Desirable Future?. In *Proceedings of the 14th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 243-252). 10.1145/3543174.3545255
- [13] Colley, M., Krauss, S., Lanzer, M., & Rukzio, E. (2021). How should automated vehicles communicate critical situations? a comparative analysis of visualization concepts. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 5(3), 1-23. 10.1145/3478111

- [14] Diels, C. (2014). Will autonomous vehicles make us sick. *Contemporary ergonomics and human factors*, 301-307. 10.13140/RG.2.1.1461.0087
- [15] Diels, C., & Bos, J. E. (2016). Self-driving carsickness. *Applied ergonomics*, 53, 374-382. 10.1016/j.apergo.2015.09.009
- [16] Du, N., Haspiel, J., Zhang, Q., Tilbury, D., Pradhan, A. K., Yang, X. J., & Robert Jr, L. P. (2019). Look who's talking now: Implications of AV's explanations on driver's trust, AV preference, anxiety and mental workload. *Transportation research part C: emerging technologies*, 104, 428-442. 10.1016/j.trc.2019.05.025
- [17] Feierle, A., Danner, S., Steininger, S., & Bengler, K. (2020). Information needs and visual attention during urban, highly automated driving—An investigation of potential influencing factors. *Information*, 11(2), 62. 10.3390/info11020062
- [18] Funke, J., & Frensch, P. A. (Eds.). (2006). *Handbuch der Allgemeinen Psychologie-Kognition*. Hogrefe Verlag.
- [19] Golding, J.F. and Gresty, M.A. 2013. Motion sickness and disorientation in vehicles. in: Bronstein, A.M. (ed.) Oxford textbook of vertigo and imbalance Oxford University Press. pp. 293-306 10.1093/med/9780199608997.003.0028
- [20] Hainich, R., Drewitz, U., Ihme, K., Lauermann, J., Niedling, M., & Oehl, M. (2021). Evaluation of a Human–Machine Interface for Motion Sickness Mitigation Utilizing Anticipatory Ambient Light Cues in a Realistic Automated Driving Setting. *Information*, 12(4), 176. 10.3390/info12040176
- [21] Han, S. H., Jung, E. S., Jung, M., Kwahk, J., & Park, S. (1998). Psychophysical methods and passenger preferences of interior designs. *Applied Ergonomics*, 29(6), 499-506. 10.1016/S0003-6870(97)00009-4
- [22] Hecht, T., Weng, S., Kick, L. F., & Bengler, K. (2022). How users of automated vehicles benefit from predictive ambient light displays. *Applied ergonomics*, 103, 103762. 10.1016/j.apergo.2022.103762
- [23] Heiß, M. A. B. F. E. (2021). *Fragebogenbasierte Studie zu Kinetose (Bewegungskrankheit) während des Autofahrens* (Doctoral dissertation).
- [24] Herrenkind, B., Brendel, A. B., Nastjuk, I., Greve, M., & Kolbe, L. M. (2019). Investigating end-user acceptance of autonomous electric buses to accelerate diffusion. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 74, 255-276. 10.1016/j.trd.2019.08.003
- [25] Hewitt, C., Politis, I., Amanatidis, T., & Sarkar, A. (2019, March). Assessing public perception of self-driving cars: The autonomous vehicle acceptance model. In *Proceedings of the 24th international conference on intelligent user interfaces* (pp. 518-527). 10.1145/3301275.3302268
- [26] Himmels, C., Rock, T., Venrooij, J., & Riener, A. (2022, September). Simulator Fidelity Influences the Sense of Presence in Driving Simulators. In *Adjunct*

Proceedings of the 14th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (pp. 53-57). 10.1145/3544999.3552526

[27] Ive, H. P., Sirkin, D., Miller, D., Li, J., & Ju, W. (2015, September). " Don't make me turn this seat around!" driver and passenger activities and positions in autonomous cars. In *Adjunct Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 50-55). 10.1145/2809730.2809752

[28] Jin, X., Hou, H., Shen, M., Wu, H., & Yang, K. H. (2018, September). Occupant kinematics and biomechanics with rotatable seat in autonomous vehicle collision: a preliminary concept and strategy. In *2018 IRCOBI Conference Proceedings. IRCOBI*.

[29] Jing, P., Xu, G., Chen, Y., Shi, Y., & Zhan, F. (2020). The determinants behind the acceptance of autonomous vehicles: A systematic review. *Sustainability*, 12(5), 1719. 10.3390/su12051719

[30] Jorlöv, S., Bohman, K., & Larsson, A. (2017, September). Seating positions and activities in highly automated cars—a qualitative study of future automated driving scenarios. In *International research conference on the biomechanics of impact* (pp. 13-22).

[31] Kaber, D. B., Liang, Y., Zhang, Y., Rogers, M. L., & Gangakhedkar, S. (2012). Driver performance effects of simultaneous visual and cognitive distraction and adaptation behavior. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 15(5), 491-501. 10.1016/j.trf.2012.05.004

[32] Bin Karjanto, J., Md. Yusof, N., Wang, C., Delbressine, F., Rauterberg, M., Terken, J., & Martini, A. (2017, September). Situation awareness and motion sickness in automated vehicle driving experience: a preliminary study of peripheral visual information. In *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications Adjunct* (pp. 57-61). 10.1145/3131726.3131745

[33] Kaur, K., & Rampersad, G. (2018). Trust in driverless cars: Investigating key factors influencing the adoption of driverless cars. *Journal of Engineering and Technology Management*, 48, 87-96. 10.1016/j.jengtecman.2018.04.006

[34] Köhler, A. L., Prinz, F., Wang, L., Becker, J., Voß, G. M. I., Ladwig, S., ... & Depner, N. (2019, October). How will we travel autonomously? User needs for interior concepts and requirements towards occupant safety. In *28th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*.

[35] Kuiper, O. X., Bos, J. E., & Diels, C. (2018). Looking forward: In-vehicle auxiliary display positioning affects carsickness. *Applied Ergonomics*, 68, 169-175. 10.1016/j.apergo.2017.11.002

[36] Lau, M., Wilbrink, M., Dodiya, J., & Oehl, M. (2020, July). Users' internal HMI information requirements for highly automated driving. In *International Conference on*

Human-Computer Interaction (pp. 585-592). Springer, Cham. 10.1007/978-3-030-60703-6_75

[37] Löcken, A., Heuten, W., & Boll, S. (2016, October). AutoAmbiCar: Using ambient light to inform drivers about intentions of their automated cars. In *Adjunct proceedings of the 8th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications* (pp. 57-62). 10.1145/3004323.3004329

[38] Löcken, A., Müller, H., Heuten, W., & Boll, S. (2013). AmbiCar: Towards an in-vehicle ambient light display. *Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 107.

[39] Löcken, A., Müller, H., Heuten, W., & Boll, S. (2015, June). An experiment on ambient light patterns to support lane change decisions. In *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 505-510). IEEE. 10.1109/IVS.2015.7225735

[40] Matviienko, A., Löcken, A., El Ali, A., Heuten, W., & Boll, S. (2016, September). NaviLight: investigating ambient light displays for turn-by-turn navigation in cars. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (pp. 283-294). 10.1145/2935334.2935359

[41] Meschtscherjakov, A., Döttlinger, C., Rödel, C., & Tscheligi, M. (2015, September). ChaseLight: ambient LED stripes to control driving speed. In *proceedings of the 7th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications* (pp. 212-219). 10.1145/2799250.2799279

[42] Mühlbacher, D., Tomzig, M., Reinmüller, K., & Rittger, L. (2020). Methodological considerations concerning motion sickness investigations during automated driving. *Information*, 11(5), 265. 10.3390/info11050265

[43] Murphy, P., Wardman, M., & Magee, A. (2013). Valuing Different Seating Layouts for Rolling Stock on Commuter Routes. In *European Transport Conference 2013 Association for European Transport (AET)*.

[44] Nordhoff, S., Madigan, R., Van Arem, B., Merat, N., & Happee, R. (2021). Interrelationships among predictors of automated vehicle acceptance: a structural equation modelling approach. *Theoretical issues in ergonomics science*, 22(4), 383-408. 10.1080/1463922X.2020.1814446

[45] Nordhoff, S., Malmsten, V., van Arem, B., Liu, P., & Happee, R. (2021). A structural equation modeling approach for the acceptance of driverless automated shuttles based on constructs from the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology and the Diffusion of Innovation Theory. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 78, 58-73. 10.1016/j.trf.2021.01.001

[46] Osswald, S., Wurhofer, D., Trösterer, S., Beck, E., & Tscheligi, M. (2012, October). Predicting information technology usage in the car: towards a car technology acceptance model. In *Proceedings of the 4th International Conference on*

Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (pp. 51-58).

10.1145/2390256.2390264

[47] Paddeu, D., Parkhurst, G., & Shergold, I. (2020). Passenger comfort and trust on first-time use of a shared autonomous shuttle vehicle. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 115, 102604. 10.1016/j.trc.2020.02.026

[48] Panagiotopoulos, I., & Dimitrakopoulos, G. (2018). An empirical investigation on consumers' intentions towards autonomous driving. *Transportation research part C: emerging technologies*, 95, 773-784. 10.1016/j.trc.2018.08.013

[49] Pettersson, I., & Karlsson, I. M. (2015). Setting the stage for autonomous cars: a pilot study of future autonomous driving experiences. *IET intelligent transport systems*, 9(7), 694-701. 10.1049/iet-its.2014.0168

[50] Pfromm, M., Cieler, S., & Bruder, R. (2013, October). Driver assistance via optical information with spatial reference. In *16th International IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC 2013)* (pp. 2006-2011). IEEE.

10.1109/ITSC.2013.6728524

[51] Reason, J. T. (1978). Motion sickness adaptation: a neural mismatch model. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 71(11), 819-829.

10.1177/014107687807101109

[52] Rogers, E. M., Singhal, A., & Quinlan, M. M. (2014). Diffusion of innovations. In *An integrated approach to communication theory and research* (pp. 432-448). Routledge.

[53] Rahman, M. M., Deb, S., Strawderman, L., Burch, R., & Smith, B. (2019). How the older population perceives self-driving vehicles. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 65, 242-257. 10.1016/j.trf.2019.08.002

[54] Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1991). An ecological theory of motion sickness and postural instability. *Ecological psychology*, 3(3), 195-240.

10.1207/s15326969eco0303_2

[55] Salter, S., Diels, C., Herriotts, P., Kanarachos, S., & Thake, D. (2019). Motion sickness in automated vehicles with forward and rearward facing seating orientations. *Applied ergonomics*, 78, 54-61. 10.1016/j.apergo.2019.02.001

[56] Schmidt, E., Emmermann, B., Venrooij, J., & Reinprecht, K. (2019). Occurrence of motion sickness during highway and inner-city drives. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe*.

[57] Schneider, T., Hois, J., Rosenstein, A., Ghellal, S., Theofanou-Fülbier, D., & Gerlicher, A. R. (2021, May). Explain yourself! transparency for positive ux in autonomous driving. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-12). 10.1145/3411764.3446647

- [58] Sun, X., Cao, S., & Tang, P. (2021). Shaping driver-vehicle interaction in autonomous vehicles: How the new in-vehicle systems match the human needs. *Applied ergonomics*, 90, 103238. 10.1016/j.apergo.2020.103238
- [59] Tinga, A. M., Cleij, D., Jansen, R. J., van der Kint, S., & van Nes, N. (2022). Human machine interface design for continuous support of mode awareness during automated driving: An online simulation. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 87, 102-119. 10.1016/j.trf.2022.03.020
- [60] Turner, M., & Griffin, M. J. (1999). Motion sickness in public road transport: passenger behaviour and susceptibility. *Ergonomics*, 42(3), 444-461. 10.1080/001401399185586
- [61] Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS quarterly*, 425-478. 10.2307/30036540
- [62] Venkatesh, V., Thong, J. Y., & Xu, X. (2012). Consumer acceptance and use of information technology: extending the unified theory of acceptance and use of technology. *MIS quarterly*, 157-178. 10.2307/41410412
- [63] Weirich, C., Lin, Y., & Khanh, T. Q. (2022). Evidence for Human-Centric In-Vehicle Lighting: Part 1. *Applied Sciences*, 12(2), 552. <https://doi.org/10.3390/app12020552>
- [64] Werneke, J., & Vollrath, M. (2010). Eine neue Methode zur Gestaltung von peripheren Warnsignalen im Kraftfahrzeug. *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik-VDI-Berichte*, 2090, 2090.
- [65] Wilbrink, M., Schieben, A., & Oehl, M. (2020, March). Reflecting the automated vehicle's perception and intention: Light-based interaction approaches for on-board HMI in highly automated vehicles. In *Proceedings of the 25th International Conference on Intelligent User Interfaces Companion* (pp. 105-107). 10.1145/3379336.3381502
- [66] de Winkel, K. N., Talsma, T. M., & Happee, R. (2022). A meta-analysis of simulator sickness as a function of simulator fidelity. *Experimental Brain Research*, 1-17. 10.1007/s00221-022-06485-6
- [67] Wolfe, B., Dobres, J., Rosenholtz, R., & Reimer, B. (2017). More than the Useful Field: Considering peripheral vision in driving. *Applied ergonomics*, 65, 316-325. 10.1016/j.apergo.2017.07.009
- [68] Xu, Z., Zhang, K., Min, H., Wang, Z., Zhao, X., & Liu, P. (2018). What drives people to accept automated vehicles? Findings from a field experiment. *Transportation research part C: emerging technologies*, 95, 320-334. 10.1016/j.trc.2018.07.024

- [69] Yuen, K. F., Wong, Y. D., Ma, F., & Wang, X. (2020). The determinants of public acceptance of autonomous vehicles: An innovation diffusion perspective. *Journal of Cleaner Production*, 270, 121904. 10.1016/j.jclepro.2020.121904
- [70] Zhang, T., Tao, D., Qu, X., Zhang, X., Zeng, J., Zhu, H., & Zhu, H. (2020). Automated vehicle acceptance in China: Social influence and initial trust are key determinants. *Transportation research part C: emerging technologies*, 112, 220-233. 10.1016/j.trc.2020.01.027
- [71] Zhang, T., Tao, D., Qu, X., Zhang, X., Lin, R., & Zhang, W. (2019). The roles of initial trust and perceived risk in public's acceptance of automated vehicles. *Transportation research part C: emerging technologies*, 98, 207-220. 10.1016/j.trc.2018.11.018
- [72] Zhang, T., Zeng, W., Zhang, Y., Tao, D., Li, G., & Qu, X. (2021). What drives people to use automated vehicles? A meta-analytic review. *Accident Analysis & Prevention*, 159, 106270. 10.1016/j.aap.2021.106270

Untersuchungen zur Optimierung von barrierefreien visuellen Kontrasten

*Martin Schlanke**; Dr. Cornelia Vandahl*, Dr. Karin Bieske*, Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz*, Martin Schlanke*; Oliver Kolbe**, Prof. Dr. Michael Gebhardt**; Prof. Dr. Kathleen Kunert****

* TU Ilmenau (D-98693 Ilmenau, Prof. Schmidt-Str. 26)

** Ernst-Abbe-Hochschule Jena (D-07745 Jena, Carl-Zeiß-Promenade 2)

*** REGIOMED REHA Klinik Masserberg (D-98666 Masserberg, Hauptstraße 18)

Zusammenfassung

Die visuelle Barrierefreiheit ist eine Voraussetzung dafür, dass Personen mit Seheinschränkungen selbstständig am öffentlichen Leben teilnehmen können. In Anforderungen und Normen gibt es deshalb Mindestkontraste und Vorgaben für die Reflexionsgrade der Materialien, mit denen die Sehobjekte realisiert werden müssen. Die Anforderungen an die Kontraste sind so groß, dass sie mit vielen Materialien nur schwer erfüllt werden können. Es ist bekannt, dass eine Optimierung der Beleuchtung dazu führt, dass auch weniger hohe Kontraste sicher erkannt werden. Dazu zählen die Erhöhung der Leuchtdichte und die Vermeidung von Blendung. Im Rahmen einer Forschung wurde ein Teststand entwickelt, mit dem die Parameter gezielt variiert werden konnten und an Testpersonen Untersuchungen zum Kontrastsehen durchgeführt wurden.

Die Erhöhung der Umfeldleuchtdichte führte dabei zu einer Verbesserung der Wahrnehmung von Kontrasten. Trotz Erhöhung der Umfeldleuchtdichte konnte nicht jeder Kontrast von allen Probanden erkannt werden. Direktblendung führt dazu, dass Kontraste schlechter wahrgenommen wurden.

Einleitung

Ein Großteil der Informationen aus unserer Umwelt wird über das Auge aufgenommen, daher wird ein Großteil relevanter Informationen im öffentlichen Raum visuell dargeboten. Nach Hochrechnung der Weltgesundheitsorganisation (WHO) lebten im Jahr 2002 in Deutschland 1,2 Millionen sehbehinderte und blinde Menschen [1]. Die Gutenberg Gesundheitsstudie von 2015 erfasste einen Anteil von 11,6 % der Gesamtbevölkerung mit meist altersbedingten Augenerkrankungen, die zu Sehbehinderungen führen [2]. Visuelle Barrierefreiheit ist daher eine Voraussetzung, dass Personen mit Seheinschränkungen selbstständig am öffentlichen Leben teilnehmen können. Diese Barrierefreiheit kann durch die Gestaltung der Kontraste der für die Orientierung und Erkennung notwendigen Elemente erreicht werden. In Normen finden sich daher Mindestkontraste und Vorgaben für die Reflexionseigenschaften der Materialien, mit denen die Sehobjekte realisiert werden müssen. Damit soll sichergestellt werden, dass Sehobjekte sicher erkannt werden können [3]. Die Anforderungen an die Kontraste sind so



groß, dass diese mit vielen derzeit verwendeten Baumaterialien kaum erfüllt werden können, bspw. bei der Verwendung von Naturstein oder im denkmalgeschützten Bereich.

Es ist bekannt, dass eine Optimierung der Beleuchtungssituation dazu führt, dass auch weniger hohe Kontraste sicher erkannt werden können. Dazu zählen u. a. die Erhöhung der Leuchtdichte und die Vermeidung von Blendung. Diese Möglichkeiten, die Sehbedingungen durch gezielte Optimierung der Beleuchtung zu verbessern, werden bisher kaum genutzt. Die Erweiterung der Normen setzt allerdings den Nachweis voraus, dass mit einer verbesserten Beleuchtung die Wahrnehmung bei verringerten Kontrasten gesichert ist. Dieser Nachweis soll im Rahmen dieses Projektes erbracht werden, das in Kooperation von der Technischen Universität Ilmenau und der Ernst-Abbe-Hochschule Jena in Zusammenarbeit mit der REGIOMED REHA Klinik Masserberg durchgeführt wurde.

1 Grundlagen

Die DIN 32975:2009-12 „Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung“ legt das Hauptaugenmerk darauf, die sichere Wahrnehmung durch hohe Kontraste zu gewährleisten: „Zur Kennzeichnung von Bedienelementen, für Orientierungs- und Leitsysteme ... ist ein Kontrast von mindestens 0,4 einzuhalten.“ [3]. Der Kontrast benachbarter Felder ist dabei nach Formel (1) definiert:

$$(1) \quad K_M = \frac{L_O - L_U}{L_O + L_U}$$

mit: K_M Michelson-Kontrast
 L_O Leuchtdichte des Sehobjektes in cd/m^2
 L_U Leuchtdichte des Umfeldes in cd/m^2

Dabei wird in der DIN 32975 Norm eine Sehschärfe (Visus) von 0,1 zugrunde gelegt. Der Visus wird durch den kleinsten Sehwinkel definiert, unter dem ein Objekt erscheinen muss, damit dessen Form oder Eigenschaften erkannt werden kann (siehe Abbildung 1) [4].

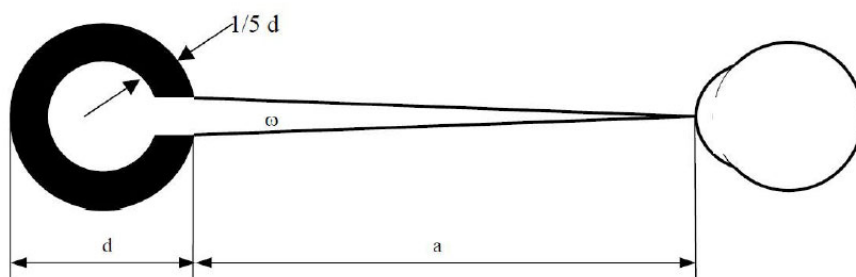


Abbildung 1: Beziehung zwischen Sehwinkel ω und Objektweite a und Gesamtdurchmesser d . Darstellung nach HAUCK [5].

Sehbehinderungen gehen in der Regel nicht nur mit einer Reduktion der zentralen Sehschärfe, sondern auch mit einer Reduktion der Kontrastempfindlichkeit einher. Daher benötigen Betroffene höherer Kontraste als Normsehende. Allerdings können eine höhere Leuchtdichte und ein blendfreies Umfeld dazu führen, dass die für ein sicheres Erkennen notwendigen Kontraste geringer sind, als sie ohne optimierte Beleuchtung sind.

Erste systematische Untersuchungen zur Abhängigkeit des kleinsten erkennbaren Kontrastes (= Schwellenkontrast) von der Leuchtdichte und der Blendung finden sich in einer Arbeit von HAUCK [6]. Die Erhöhung der Leuchtdichte von $1 \text{ cd}/\text{m}^2$ auf $10 \text{ cd}/\text{m}^2$ führte zu einer Verringerung des Schwellenkontrastes um 40 %. Noch offen ist, ob dies in gleichem Maße auch für die Kontraste in der praktischen Anwendung gilt. Die Anforderung der Normen gilt derzeit unabhängig von der Leuchtdichte und damit von der Beleuchtung.

Ebenso deuten die Ergebnisse des Forschungsprojektes VISKON [7] darauf hin, dass auch bei verringerten Kontrasten eine Wahrnehmung möglich ist, wenn die Leuchtdichten bzw. die Beleuchtungsstärken erhöht werden.

2 Forschungsansatz

Ziel ist die Optimierung von Beleuchtungsparametern zur Verbesserung der Wahrnehmbarkeit von visuellen Kontrasten von Leitelementen, um die Barrierefreiheit im öffentlichen Raum für Menschen mit Sehbehinderung zu gewährleisten. Dazu sollen die Anforderungen in den Normen und Planungsempfehlungen um konkrete Vorgaben für die Beleuchtung erweitert werden. Von den Ergebnissen der Forschung könnten auch ältere Personen profitieren.

Durch Untersuchungen mit sehbehinderten Testpersonen sollen unter anderen die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie hängt die Erkennbarkeit der Kontraste von Sehobjekten von der Umfeldleuchtdichte ab?
- Welchen Einfluss hat eine vorliegende Sehbeeinträchtigung im Vergleich zu jüngeren und älteren Menschen ohne Sehbeeinträchtigung bei der Erkennung von Kontrasten?
- Verändert die Blendempfindlichkeit, die häufig im Zusammenspiel mit Sehbeeinträchtigungen einhergehen können, die benötigt Umfeldleuchtdichte zum Erkennen eines Kontrastes?
- Welchen Einfluss hat die Blendung durch Beleuchtungssysteme auf den erforderlichen Kontrast?

3 Material und Methoden

3.1 Testaufbau

Die Untersuchungen fanden an einem speziell konzipierten Teststand in den Räumlichkeiten der REGIOMED REHA Klinik Masserberg statt. Als Ausgangssituation wurde ein nächtliches Straßenszenario gewählt (Leuchtdichte $0,1 \text{ cd/m}^2$). Die Testperson blickte in einen kugelähnlichen Raum (Rhombenkuboktaeder) mit einem Durchmesser von $1,80 \text{ m}$ hinein (siehe Abbildung 2) und betrachtete dort auf ein Testfeld mit Sehzeichen.

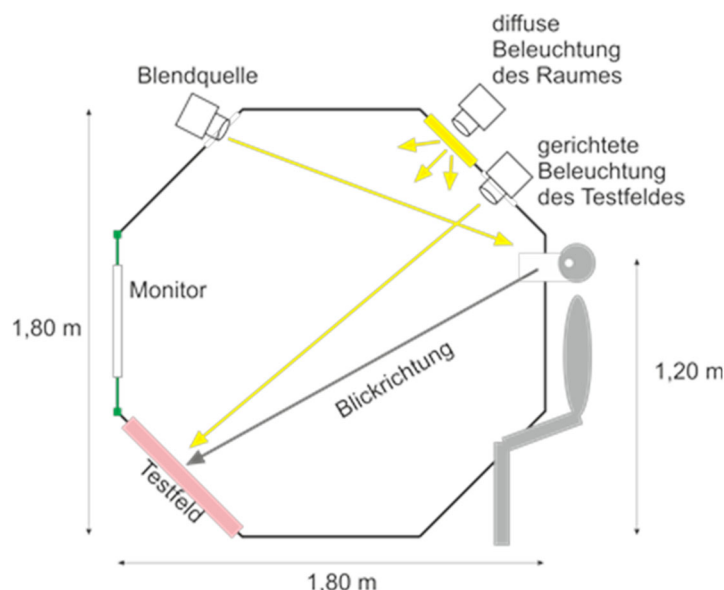


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Einblickvorrichtung mit definierten Beleuchtungsbedingungen.

Da in realen Orientierungssituationen Kontrastmarkierungen in der Regel bodennah positioniert sind, wurde für eine realitätsnahe Prüfung ein Testfeld mit Sehobjekten in einem 45°-Winkel zum Boden unterhalb der horizontalen Sehachse mit einem Sehabstand von 1,9 m positioniert. Eine diffuse Beleuchtung sorgte für eine gleichmäßige Beleuchtungsstärke auf der Rauminnenwand. Die Beleuchtung des Raumes konnte mit verschiedenen Farbtemperaturen erfolgen. Die Wände und der Boden der Einblickvorrichtung bestanden aus dunkelgrauer, matter Pappe und wiesen einen einheitlichen Reflexionsgrad von $\rho = 0,15$ auf. Die Decke wurde mit einer Pappe mit einem Reflexionsgrad von $\rho = 0,07$ ausgekleidet, um eine nächtliche Lichtsituation zu simulieren. Auf diese Weise wurde durch die Raumbeleuchtung eine homogene Ausleuchtung innerhalb der Vorrichtung gewährleistet und verhindert, dass die anderen Lichtquellen eine signifikante Veränderung der Raumbeleuchtung verursachen. Durch Variation der Beleuchtungsstärken ergeben sich die in Tabelle 1 angegebenen einstellbaren Leuchtdichten.

Gegenüber der Testperson befindet sich eine Blendquelle. Der Blendwinkel zur Blickrichtung beträgt 40° (siehe Abbildung 3 links). Die Beleuchtungsstärke am Auge der Testperson ist so dimensioniert, dass ein Schwellenanstieg („Threshold Increase“ =TI) von 20 % erreicht wird. Die Kugelfrückseite lässt sich von außen öffnen (siehe Abbildung 3 rechts). Für die Sehschärfeprüfungen wird in der Öffnung der Monitor des Prüfgerätes positioniert. Bei allen anderen Untersuchungen ist die Öffnung verschlossen und wird nur zum Wechseln der Testfelder kurzzeitig geöffnet.



Abbildung 3: Blick auf das Testfeld bei eingeschalteter Blendquelle (rechts). Rückseite der Einblickvorrichtung mit offener Klappe zum Wechseln der Testfelder (links).

3.2 Testobjekt

Als Testobjekt kommen Streifen von 1 cm und 2 cm Breite zum Einsatz. Diese sind jeweils 10 cm lang und werden in verschiedenen Kontrasten dargeboten. Die logarithmische Reihe der untersuchten Kontrastwerte ist in Abb. 3 dargestellt. Neben 4 Positivkontrasten wird ein Negativkontrast untersucht. Die Breite der Streifen bezog sich auf DIN 18040-01, in der für die Markierung von Setzstufen eine 2 cm breite, kontrastreiche Markierung vorgegeben wird [8].

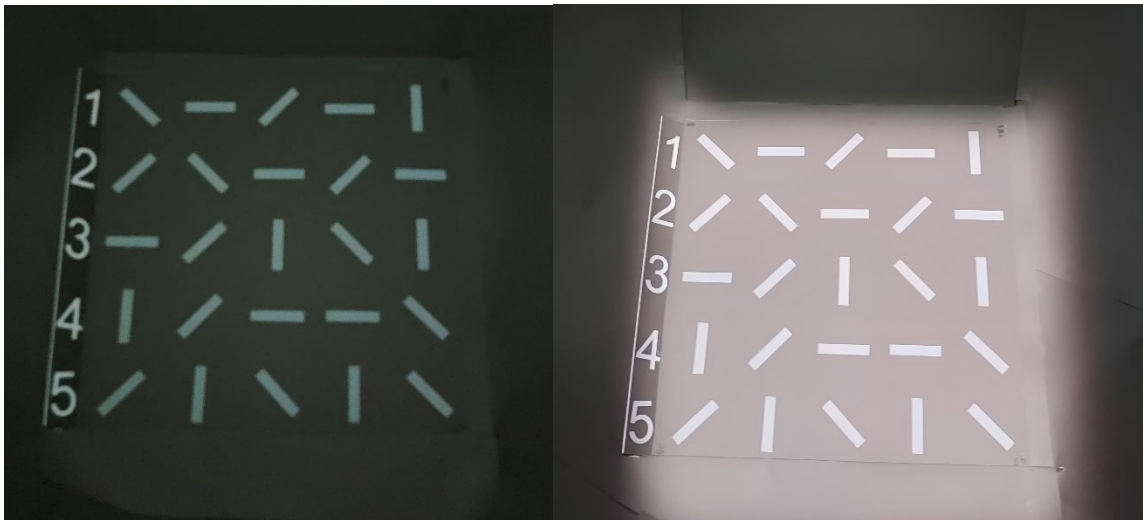


Abbildung 4: Sehfeld des Probanden, links: die Leuchtdichte des Testfeldes ist identisch mit der der Umgebung, rechts: das Testfeld ist heller als die Umgebung.

Für die objektive Prüfung der korrekten Detektion des Streifens durch den Probanden, wurde das Sehobjekt randomisiert in vier Orientierungen (0° , 45° , 90° und 135°) dargeboten. Auf einem $75\text{ cm} \times 75\text{ cm}$ großen Testfeld befinden sich 25 Streifen gleichen Kontrastes. Durch Öffnen einer Klappe an der Rückseite der Kugel können die Testfelder ausgetauscht werden. Die Ermittlung des Schwellenwertes (50-prozentige Wahrnehmungswahrscheinlichkeit) der Leuchtdichte erfolgt anhand der psychometrischen Funktion. Aufgrund der hohen Ratewahrscheinlichkeit von 25 %, galt eine Kontraststufe als erkannt, wenn die Testperson die Orientierung von mindestens 4 von 6 Sehobjekten richtig identifizierte. Anschließend wurde die Leuchtdichte auf der Fläche weiter erhöht bis 6 von 6 Streifen richtig benannt wurden. Die Antwortzeit durch die Testpersonen war auf 3 s pro Sehobjekt begrenzt. Spätere Antworten wurden als „nicht erkannt“ interpretiert.

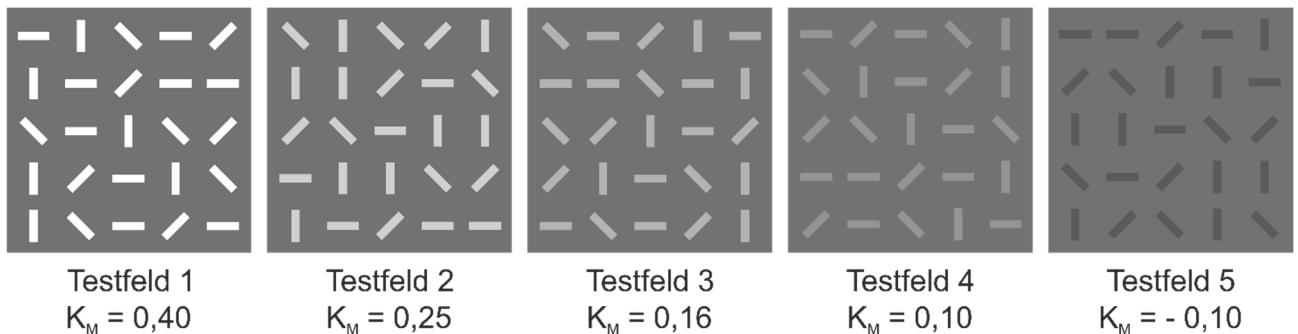


Abbildung 5: Testfelder mit verschiedenen Kontrasten K_M , die Sehzeichen sind entweder 1 cm oder 2 cm breit und 10 cm lang. Die Streifen sind randomisiert angeordnet.

3.3 Lichttechnische Kennzahlen

Entsprechend der nächtlichen Ausgangssituation werden als Untersuchungsleuchtdichten Werte der DIN EN 13201-2 verwendet [9]. Diese liegen in Stufen im Bereich zwischen $0,3$ und 2 cd/m^2 . Für die Untersuchungen wurden in gleichbleibender Stufung höhere Leuchtdichtewerte und niedrigere hinzugefügt (siehe Tabelle 1).

Als Ausgangssituation diente die Umgebungs-Leuchtdichte von $0,1\text{ cd/m}^2$, die im gesamten unteren Bereich („Umgebung“) der Kugel dargeboten wurde. Von einem Wert der Umgebungs-Leuchtdichte ab $0,3\text{ cd/m}^2$ erfolgten Leuchtdichteerhöhungen nur im Bereich des Testfeldes. Das entspricht in der Praxis der Beleuchtung eines Weges mit der Straßenleuchte, während sich die Leuchtdichte der Umgebung nicht erhöht. Für die Situation mit Blendquelle wurde

diese an eine Situation nach DIN EN 13201-2 angepasst, dass bei $0,3 \text{ cd/m}^2$ diese einen TI-Wert von 20 % erreicht wurde (Blendwinkel 40° , als Umfeld-Leuchtdichte für die Dimensionierung des TI-Wertes nach Formel (5) wurde die Testfeld-Leuchtdichte verwendet). In Vorversuchen wurde festgestellt, dass eine nicht unerhebliche Anzahl von Testpersonen bereits bei Umgebungs-Leuchtdichten von $0,3 \text{ cd/m}^2$ auch niedrige Kontraste sicher erkennen kann. Daher wurde die Leuchtdichteskala in zwei Schritten bis zu einem Wert von $0,1 \text{ cd/m}^2$ nach unten erweitert. Der TI-Wert für diese beiden zusätzlichen Situationen wurde auf der Basis einer Umgebungs-Leuchtdichte von $0,3 \text{ cd/m}^2$ belassen und beträgt für die niedrigeren Werte dann 30 % bzw. 50 % (Einstellung 1 und 2 in Tabelle 1). Diese Situationen entsprechen in der Praxis dem Identifizieren von Sehobjekten außerhalb beleuchteter Bereiche.

Tabelle 1: Leuchtdichtewerte der verschiedenen Bereiche innerhalb des Rhombenkuboktaeders.

Einstellung	L_Umgebung in cd/m^2	L_Testfeld in cd/m^2	L_Himmel in cd/m^2	E_Auge (Blendquelle) in lx	TI (Blendquelle) in %
1	0,1	0,1	0,05	18,8	50
2	0,18	0,18	0,09	18,8	30
3	0,3	0,3	0,15	18,8	20
4	0,3	0,5	0,15	28,3	20
5	0,3	0,75	0,15	39,1	20
6	0,3	1	0,15	49,2	20
7	0,3	1,5	0,15	68,1	20
8	0,3	2	0,15	85,7	20
9	0,3	2,7	0,15	109	20
10	0,3	4	0,15	150	20
11	0,3	5,6	0,15	206	20
12	0,3	8	0,15	299	20
13	0,3	11,2	0,15	426	20
14	0,3	15,9	0,15	615	20
15	0,3	22,3	0,15	780	20

3.4 Physiologische Blendung

Physiologische Blendung führt im Allgemeinen zur Verschlechterung des Sehvermögens, da das Streulicht, das eine Blendquelle im Beobachteraue verursacht, zu einer Erhöhung des Schwellenkontrastes bzw. der Unterschiedsschwelle ΔL führt [10]. Diese Schwellenerhöhung dient in der Außenbeleuchtung als Kennzahl für die Stärke der Blendung einer Beleuchtungsanlage und ist auf 10 bis 20% begrenzt [11].

Der TI-Wert geht von einer fovealen Betrachtung des Sehobjektes aus. Die auf der Netzhaut durch die Blendung entstehende Schleierleuchtdichte L_V führt zu einer Änderung der Unterschiedsschwelle. Die Schleierleuchtdichte ist dabei anhängig vom Alter der Person, von

der Blendbeleuchtungsstärke am Auge E_{Auge} sowie vom Blendwinkel Θ zwischen Blendrichtung und Blickrichtung (siehe Abbildung 6).

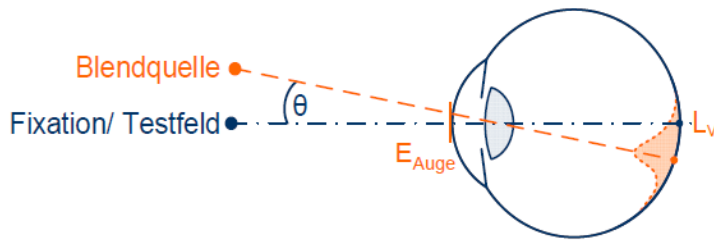


Abbildung 6: Definition der Schleierleuchtdichte L_V nach Formel (2)

$$(2) \quad L_V = k \frac{E_{\text{Auge}}}{\Theta^2}$$

mit: L_V Schleierleuchtdichte in cd/m^2
 k altersabhängige Konstante
 E_{Auge} Beleuchtungsstärke am Auge in lx
 Θ Blendwinkel in $^\circ$ (Grad)

Die Konstante k wird für eine altersunabhängige Betrachtung der Blendsituation mit einem Wert von $k = 10$ festgelegt. Allerdings ist bekannt, dass im menschlichen Auge mit zunehmendem Alter bei Blendung mehr Streulicht auftritt. Der Faktor k kann in Formel (2) altersabhängig angegeben werden [12]:

$$(3) \quad k = 10 \left(1 + \left(\frac{\text{Alter}}{70} \right)^4 \right)$$

Der TI-Wert als prozentuale Schwellenerhöhung ist nach Formel (4) definiert und kann näherungsweise nach Formel (5) berechnet werden.

$$(4) \quad \text{TI} = \left(\frac{\Delta L_{\text{BI}}}{\Delta L_{\text{oBI}}} - 1 \right) \cdot 100 \%$$

mit: TI Threshold Increase (Schwellenerhöhung) in %
 ΔL_{BI} Unterschiedsschwelle mit Blendung
 ΔL_{oBI} Unterschiedsschwelle ohne Blendung

$$(5) \quad \text{TI} = 65 \frac{L_V}{L_U}$$

mit: TI Threshold Increase (Schwellenerhöhung) in %
 L_V Schleierleuchtdichte in cd/m^2
 L_U Umfeldleuchtdichte in cd/m^2
 Gültigkeit der Näherungsformel (5) für $L_U = 0,05 \text{ cd}/\text{m}^2 \dots 5 \text{ cd}/\text{m}^2$

3.5 Messung vom Sehschärfe, Kontrastempfindlichkeit und Blendempfindlichkeit

Der Visus und die Kontrastempfindlichkeit wurden mit dem computer-gestützten Freiburger Visual Acuity and Contrast Test (FrACT) erhoben. [13] Die Präsentation des FrACT erfolgte über einen selbstkalibrierenden 24" Monitor (Monitor EIZO CG247, Fa. EIZO Europe GmbH) mit den Maßen 325 mm x 518 mm und einer Bildschirmdiagonale von 610 mm. Das Verfahren entspricht der Norm für Sehschärfentests (EN ISO 8596) und kann auch bei Menschen mit schwerer Sehbehinderung (Visus $\leq 0,02$ bzw. $\geq 1,7 \text{ logMAR}$) verlässlich eingesetzt werden. [14] FrACT präsentiert auf dem Monitor Optotypen (Visus: Landolt-Ringe, Kontrast:

Streifenmuster) dessen Orientierung durch die Probanden über einen modifizierten, separaten, numerische Tastaturblock non verbal eingegeben werden. Die Schwellenwerte werden anhand der modifizierten "Best PEST"-Strategie (parameter estimation by sequential testing) und das „Forced-Choice“ Verfahren ermittelt [15]. Dadurch weist der Test mit einer Varianz von $\pm 0,52$ Visusstufen eine etwa 4x höhere Reproduzierbarkeit für die Ermittlung des Visus im Vergleich zu herkömmlichen Methoden (auf Grundlage der psychometrischen Funktion) auf [16]. FrACT wird daher weltweit von Optometristen und Ophthalmologen in klinischen Studien eingesetzt und wurde von unabhängigen Laboren verifiziert [14, 17, 18]. Zur Klassifizierung der Blendempfindlichkeit der Probanden wurde ein Glare-Test in Anlehnung nach JUNGnickel angefertigt [19]. Für den Test wurde der Monitor um eine Blende, in die 8 radiär angeordneten LEDs eingearbeitet sind, ergänzt (siehe Abbildung 7). Die Intensität der Leuchtdioden konnte über eine Steuereinheit reproduzierbar eingestellt werden. Zur Klassifizierung der Blendempfindlichkeit der Probanden wurde ein Glare-Test durchgeführt. Dafür wird die mesopische Kontrastschwelle mit Blendung bestimmt und die Schwellenerhöhung gegenüber dem blendfreien Fall ermittelt. Die Beleuchtungsstärke am Auge wird für jede Testperson (altersabhängig) so dimensioniert ist, dass nach Formel (5) in Verbindung mit den Formeln (2) und (3) eine Schwellenerhöhung von $T_I = 20\%$ zu erwarten ist (das entspricht etwa 0,1 log-Stufe Kontrasterhöhung). Liegt der damit gemessene Schwellenkontrast 0,2 log-Stufen höher als ohne Blendung, wird die Testperson der Gruppe „blendempfindlich“ zugeordnet. Das entspricht einer prozentualen Schwellenerhöhung (T_I) von mehr als 58%.

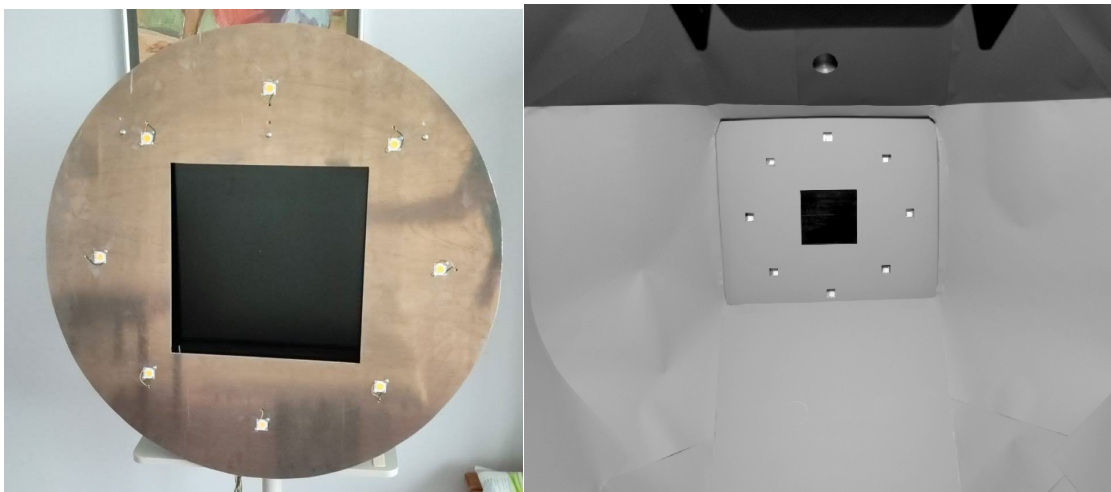


Abbildung 7: Links: Blende mit radiär angeordneten Leuchtdioden um einen Monitor angeordnet. Rechts: Blick auf den Ausschnitt eines Monitors zum Bestimmen der Kontrastschwelle.

3.6 Testszenario

Das Testszenario ist bestand aus mehreren Modulen.

- a. Prüfung der Erkennbarkeit von Sehobjekten mit einem Kontrastwert $K_M = 0,40$ unter mesopischen Lichtbedingungen
Eine Testtafel mit fünf Testobjekten (Streifen) unterschiedlicher Orientierung und einem konstanten Kontrastwert von $K_M = 0,40$ wird unter einer Umgebungsleuchtdichte $L = 0,1 \text{ cd/m}^2$ (Farbtemperatur: 4500 K) präsentiert. Es wird geprüft, bei welcher Umfeldleuchtdichte der Proband mindestens 4 von 6 Sehobjekt korrekt erkennen kann.
- b. Abhängigkeit der Identifizierung diskreter Kontraste von der Umfeldleuchtdichte unter mesopischen Lichtbedingungen
Eine Testtafel mit fünf Testobjekten (Streifen) unterschiedlicher Orientierung und einem konstanten Kontrastwert von $K_M = 0,40$ wird unter einer Umgebungsleuchtdichte $L =$

0,1 cd/m² (Farbtemperatur: 4500 K) präsentiert. Wird die Kontraststufe nicht erkannt, wird die Umgebungsleuchtdichte in Anlehnung an Werten aus DIN EN 13201 „Straßenbeleuchtung“ in 0,15-log-Schritten (Mittelwert der Erhöhung aus der DIN EN 13201) erhöht. Die Erhöhung erfolgt, bis die Orientierung von 4 von 6 präsentierten Streifen richtig erkannt werden. Danach wird die Umfeldleuchtdichte weiter erhöht, bis zur Identifizierung von 6 von 6 Sehzeichen. Anschließend wird derselbe Kontrast bei geringerer Streifenbreite (1 cm) dargeboten und die erforderliche Umfeldleuchtdichte bis zum Erkennen ermittelt. Nach einer kurzen Adaptationsphase auf ein geringeres Umfeldleuchtdichteniveau wird der Kontrast auf die nächst-niedrigere Kontraststufen reduziert und die Messung wiederholt bis die Umgebungsleuchtdichte für die Erkennung des Kontrastwertes von $K_M = -0,10$ ermittelt wurden.

c. Einfluss der Blendung auf die Erkennbarkeit von diskreten Kontrastwerten unter mesopischen Lichtbedingungen

Die benötigte Umfeldleuchtdichte (Farbtemperatur: 4500 K) für die Erkennung (4 von 6 und 6 von 6) der Kontrasttafel wird zusätzlich unter Blendung mit einem TI-Wert von 20 % bei einem 2 cm breitem Streifen ermittelt. Für die Umfeldleuchtdichten von 0,1 cd/m² und 0,18 cd/m² im Versuchsablauf beträgt der TI-Wert 50 % bzw. 30 %. Der TI-Wert ist ausgelegt für die Umfeldleuchtdichten der DIN EN 13201 „Straßenbeleuchtung“ beginnend bei 0,3 cd/m². In Situationen, in denen von diesen Vorgaben abgewichen wird, ergeben sich geringere Umfeldleuchtdichten und der TI-Wert steigt.

3.7 Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung wird die Software IBM SPSS in der Version 21 verwendet. In Hinblick auf den zentralen Grenzwertsatz ($n > 30$) ist es geplant, für diesen Fall parametrische Test zu Verwenden. Für Auswertungen mit $11 < n < 31$ wurden zusätzlich Bootstrapping-Verfahren mit 10.000 Stichproben und „Bias corrected and accelerated“-Methode verwendet. Ein Signifikanzniveau von 5 % wurde für alle Auswertungen definiert. Angegeben werden die Ergebnisse durch Mittelwerte, Standardabweichung und 95%-Konfidenzintervall

Der Vergleich der Interventionsgruppe mit Kontrollgruppe 1 und Kontrollgruppe 2 sowie der Subgruppen „blendempfindlich“ und „nicht blendempfindlich“ innerhalb der Interventionsgruppe erfolgte jeweils durch den t-Test für unverbundene Stichproben. Weitere Auswertungen innerhalb der Interventionsgruppe bezogen sich auf den Vergleich der Umfeldleuchtdichten bei unterschiedlicher Streifenbreite, unterschiedlicher Anzahl der erkannten Streifen sowie ohne und mit Blendung für die geprüften Kontraststufen. Die statistische Prüfung erfolgte hier mittels t-Test für verbundene Stichproben.

Die Erhebung der Umfeldleuchtdichte erfolgte in logarithmischer Abstufung (0,15-log Stufen). Um die Werte vergleichbar und geeignet für die gewählten statistischen Methoden zu machen, wurden die Umfeldleuchtdichten logarithmiert. Für die graphische Darstellung der Daten wurden Mittelwerte und Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls zur besseren Verständlichkeit delogarithmiert. Die Diagramme wurden mit Microsoft Excel erstellt. Die Ergebnisse der t-Teste beziehen sich auf die logarithmierte Umfeldleuchtdichte ($\log[\text{cd/m}^2]$). Hierbei bezieht sich die mittlere Differenz auf die log-Stufen zwischen den Gruppen. So entspricht eine mittlere Differenz von bspw. 0,3 $\log(\text{cd/m}^2)$ einer Verdopplung der Umfeldleuchtdichte.

Weiterhin werden die Daten als relative kumulierte Häufigkeiten der erforderlichen Umfeldleuchtdichten für die jeweiligen Kontraststufen dargestellt, ab wann 4 von 6 bzw. 6 von 6 der Teststreifen erkannt wurden. Dadurch soll veranschaulicht werden, wieviel Prozent der Probanden den Kontrast für die geprüften Umfeldleuchtdichten erkannten.

4 Beschreibung der Studiengruppen

Die DIN 32975 bezieht sich auf einen Visus von 0,1, da Sehbehinderte mit dieser Sehschärfe „sich noch ohne Hilfsmittel orientieren können“. Um dem Kontext der visuellen Barrierefreiheit gerecht zu werden wurden die Grenzen der Sehschärfe erweitert. Für die Interventionsgruppe sollte bei den Probanden eine mittelschwere bis schwere Sehbeeinträchtigung nach WHO vorliegen. Weitere Einschlusskriterien sind im Folgenden aufgelistet:

Interventionsgruppe (sehbehindert):

- männliche und weibliche Personen, mindestens 18 Jahre alt
- binokularer Visus mit Korrektur zwischen 0,32 und 0,05 (0,5 logMAR und 1,3 logMAR)
- Einwilligungsfähigkeit des Patienten

Kontrollgruppe 1 (augengesund, jung):

- männliche und weibliche Personen, zwischen 18 und 45 Jahren
- binokularer Visus mit Korrektur größer 0,8 (0,1 logMAR)
- Einwilligungsfähigkeit des Patienten

Kontrollgruppe 2 (augengesund, alt):

- männliche und weibliche Personen, mindestens 60 Jahre alt
- binokularer Visus mit Korrektur größer 0,5 (0,3 logMAR)
- Einwilligungsfähigkeit des Patienten

Für die Studie konnten die 124 Probanden akquiriert werden.

Die Interventionsgruppe umfasste 50 Probanden, davon 22 männlich und 28 weiblich. Das mittlere Alter beträgt bei $54,1 \pm 10,9$ Jahre (Range von 25 Jahre bis 70 Jahre). In dieser Gruppe finden sich insgesamt 32 verschiedene okuläre Diagnosen. Mit jeweils fünf Fällen sind die Diagnosen „Retinopathia pigmentosa“ und „primäres Weitwinkelglaukom“ am häufigsten vertreten, gefolgt von der Diagnose „Optikusatrophie“ mit vier Fällen und der „altersbedingten Makuladegeneration“ mit drei Fällen. In der Kontrollgruppe 1 beträgt das mittlere Alter der 37 Probanden $29,9 \pm 6,3$ Jahre (Range von 18 Jahre bis 44 Jahre). Es wurden 24 weibliche und 13 männliche Personen eingeschlossen. Die Kontrollgruppe 2 umfasst 37 Probanden mit einem mittleren Alter von $70,7 \pm 6,2$ Jahre (Range von 61 Jahre bis 83 Jahre).

Die augengesunden jungen Probanden erreichte die höchste Sehschärfe, gefolgt von den augengesunden älteren Probanden. Im Vergleich dazu zeigten die Probanden mit einer Sehbehinderung (Interventionsgruppe) eine um mehrere log-Stufen reduzierte Sehschärfe (siehe Abbildung 8).

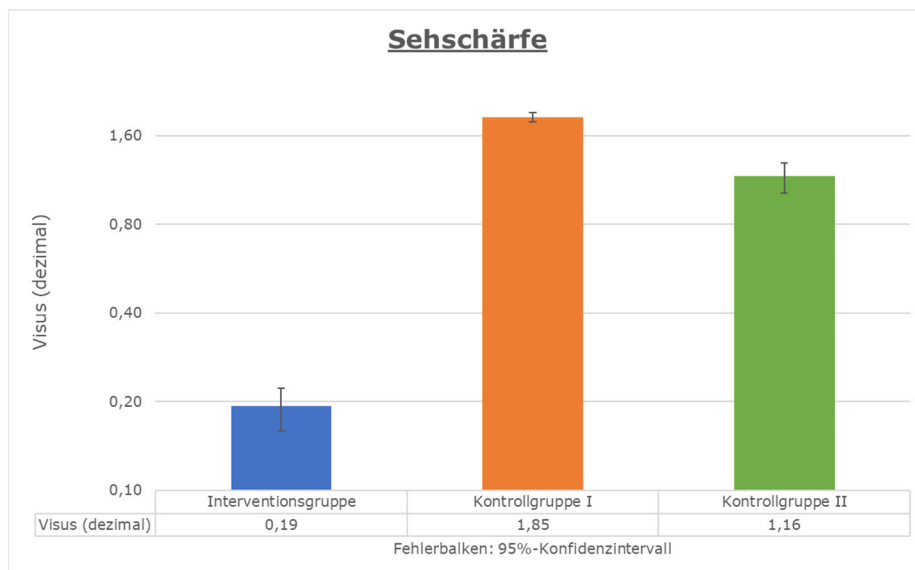


Abbildung 8: Mittlere Sehschärfe der Studiengruppen (Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle).

Die Interventionsgruppe weist eine reduzierte mesopische Kontrastschwelle auf. Im Vergleich dazu erzielten die Kontrollgruppen I und II höhere Kontrastschwelle bei einer Umfeldleuchtdichte von 0,3 cd/m².

Im Glare-Test fällt die Kontrastempfindlichkeit durch eine altersangepasste Blendung in allen drei Studiengruppen ab (siehe Abbildung 9).

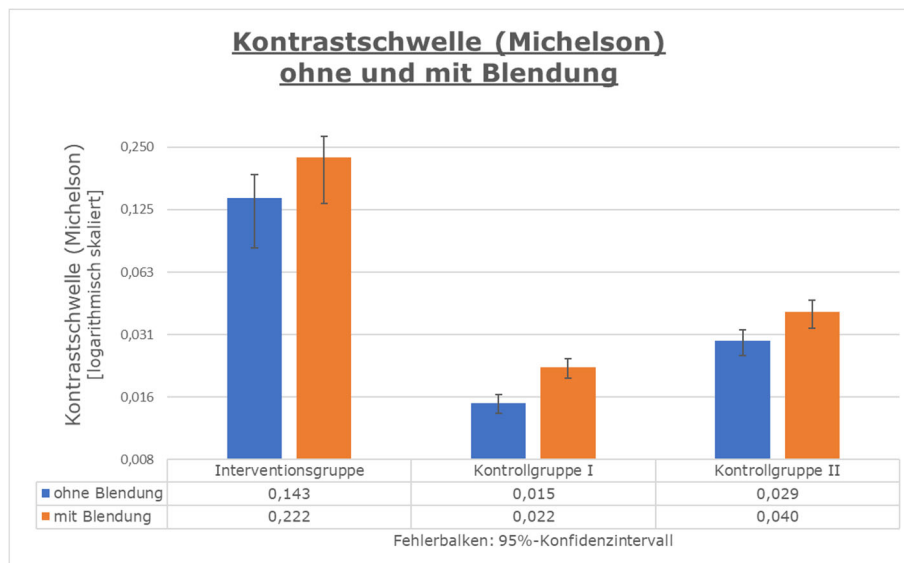


Abbildung 9: Mittlere Kontrastempfindlichkeit der Studiengruppen ohne und mit Blendung. (Mittelwert und 95%-Konfidenzintervalle)

5 Ergebnisse

Die augengesunden, jungen Probanden konnten alle dargebotenen Kontrasttafeln ohne und mit Blendung bei einer Umfeldleuchtdichte von 0,1 cd/m² erkennen.

In der Kontrollgruppe II der augengesunden, älteren Probanden wurden von $K_M = 0,40$ bis $K_M = 0,10$ die Streifen bei 0,1 cd/m² richtig benannt. Bei $K_M = -0,10$ war für 1 cm Streifenbreite eine Erhöhung auf 0,18 cd/m² erforderlich. Unter Blendung war für die niedrigen Kontraststufen ($K_M = 0,10$ und $K_M = -0,10$) eine Erhöhung auf 0,5 cd/m², damit alle Probanden die Orientierung bei 6 von 6 Streifen angeben konnten.

Die Gruppe der sehbehinderten Probanden benötigte generell eine höhere Umfeldleuchtdichte zum Erkennen der Kontraste als die beiden Kontrollgruppen. Des Weiteren führte eine Erhöhung der Umfeldleuchtdichte auf den Testtafeln zu einer Erkennbarkeit der dargebotenen Kontraststufen $K_M < 0,40$. Der aktuell in der DIN 32975 geforderte Mindestkontrast von $K_M = 0,40$ konnte bei einer Umfeldleuchtdichte von 8 cd/m^2 von allen Sehbehinderten bei einer Streifenbreite von 2 cm mit 4 von 6 und 6 von 6 Angaben richtig benannt werden (siehe Abbildung 10). Bei geringeren Kontrasten und kleineren Streifenbreite war es nicht möglich, dass alle Sehbehinderten auch bei maximal einstellbarer Umfeldleuchtdichte ausreichend Streifenorientierungen richtig angeben konnten (siehe Abbildung 11).

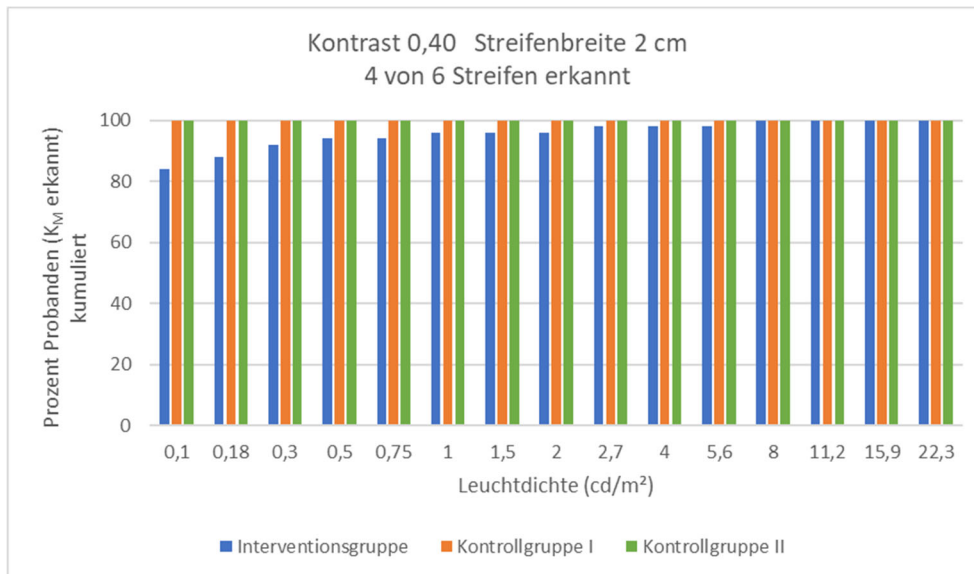


Abbildung 10: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für $K_M = 0,40$ bei 2 cm Streifenbreite mit 4 von 6 Orientierungen erkannt.

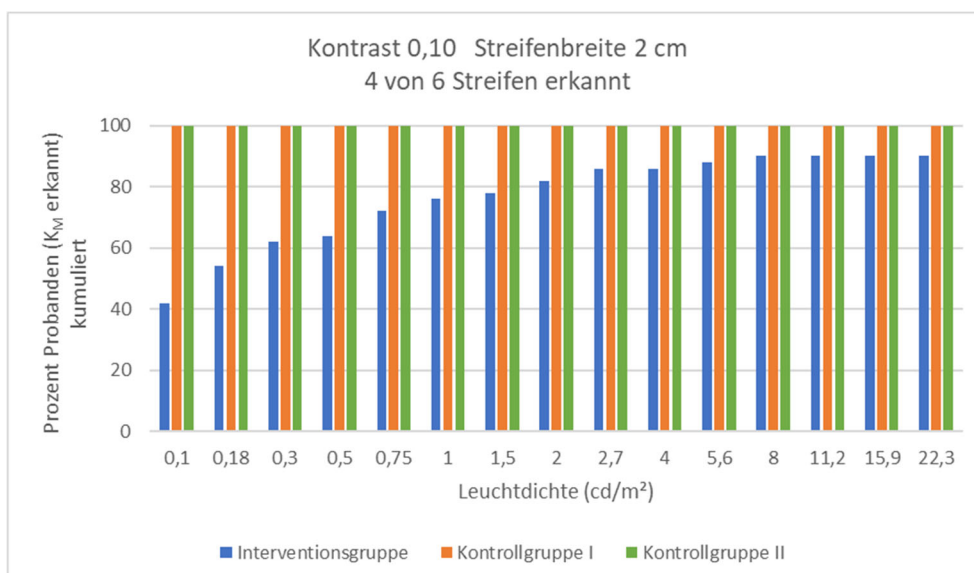


Abbildung 11: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für $K_M = 0,10$ bei 2 cm Streifenbreite mit 4 von 6 Orientierungen erkannt.

Der Negativkontrast ($K_M = -0,10$) benötigte zum Erkennen eine höhere Umfeldleuchtdichte als der Positivkontrast ($K_M = 0,10$) in der Interventionsgruppe (siehe Abbildung 12).

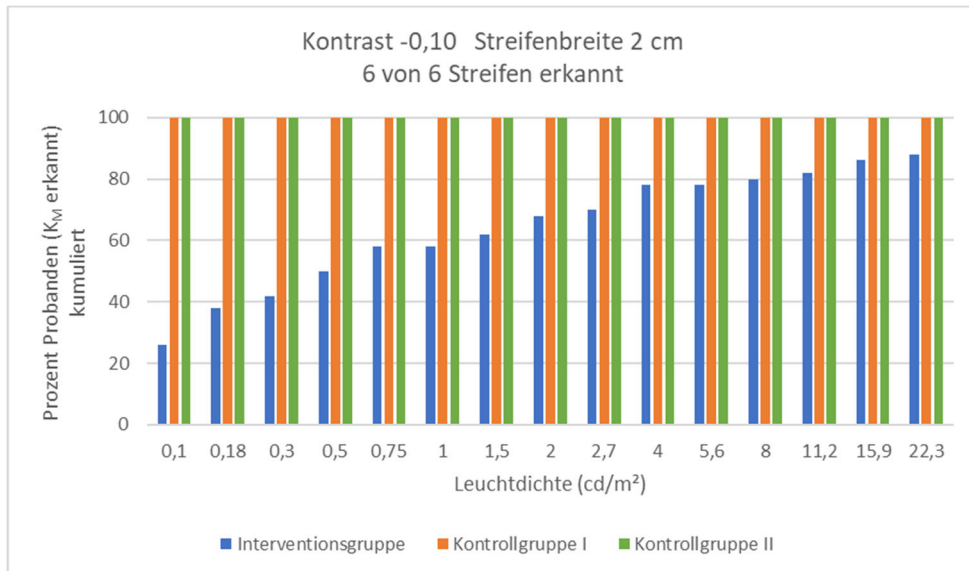


Abbildung 12: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für $K_M = -0,10$ bei 2 cm Streifenbreite mit 6 von 6 Orientierungen erkannt.

Unter Blendung erkannten weniger der Probanden in der Interventionsgruppe die dargebotenen Kontraststufen. Den Kontrast $K_M = 0,40$ konnte maximal von 90 % der Testpersonen benannt werden (siehe Abbildung 13). Bis zur letzten Testtafel ($K_M = -0,10$ Glare mit 6 von 6) viel der Anteil auf 74 % ab.

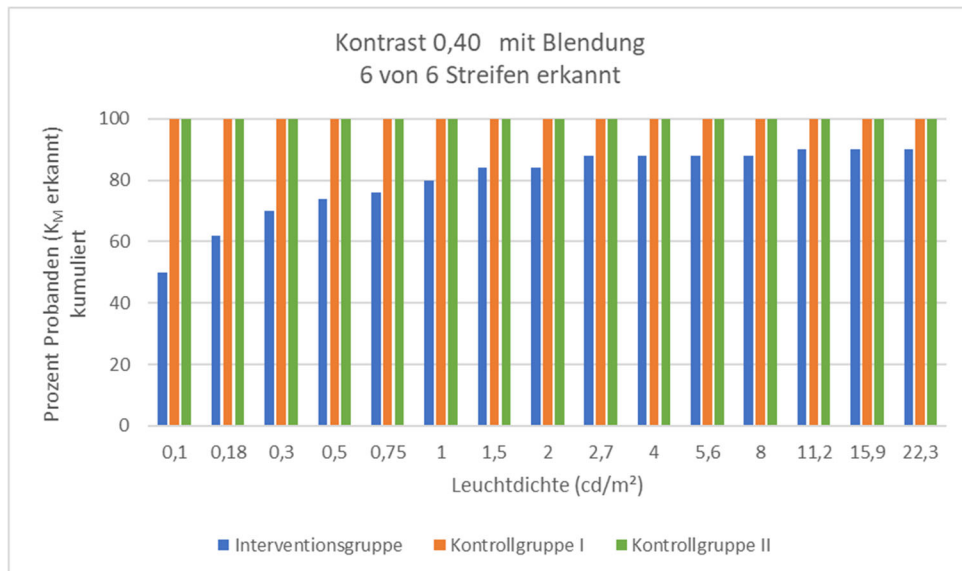


Abbildung 13: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für $K_M = 0,40$ bei Blendung mit 6 von 6 Orientierungen erkannt.

Absolut konnten 37 der 50 sehbehinderten Probanden bis zur letzten Messung von einer Erhöhung der Umfeldleuchtdichte profitieren. Bei 13 Sehbehinderten führte im Verlauf der

Messung eine Erhöhung der Umfeldleuchtdichte nicht zu einer Steigerung der Erkennbarkeit der dargebotenen Kontraste von $K_M < 0,40$.

Die sehbehinderten Probanden benötigten für jede dargebotene Kontraststufe, Streifenbreite und Anzahl der Erkannten Orientierungen eine höhere mittlere Leuchtdichte als die Kontrollgruppen (siehe Abbildung 14). Bei $K_M = 0,40$ mit 2 cm Streifenbreite liegt zwischen der Interventionsgruppe und der Kontrollgruppe I eine signifikante mittlere Differenz der log-Leuchtdichte von $-0,13 \pm 0,05 \log(\text{cd}/\text{m}^2)$ (95% CI; $-0,24$ zu $-0,02$; $p = 0,018$) zum Erkennen der Kontraststufe vor. Mit abnehmendem Kontrast steigt die mittlere Differenz an bis auf $-0,87 \pm 0,12 \log(\text{cd}/\text{m}^2)$ (95% CI; $-1,11$ zu $-0,63$; $p < 0,001$) für einen Kontrast von $-0,10$ bei 1 cm Streifenbreite mit 6 von 6 richtig erkannten Orientierungen. Bis auf den Kontrast $-0,10$ bei 1 cm Streifenbreite mit 6 von 6 richtig erkannten Orientierungen sind die mittleren Differenzen zwischen Interventionsgruppe und Kontrollgruppe I identisch zu denen zwischen Interventionsgruppe und Kontrollgruppe II. Bei dem genannten Kontrast liegt ein signifikanter Unterschied von $-0,86 \pm 0,12 \log(\text{cd}/\text{m}^2)$ (95% CI; $-1,11$ zu $-0,62$; $p < 0,001$) vor.

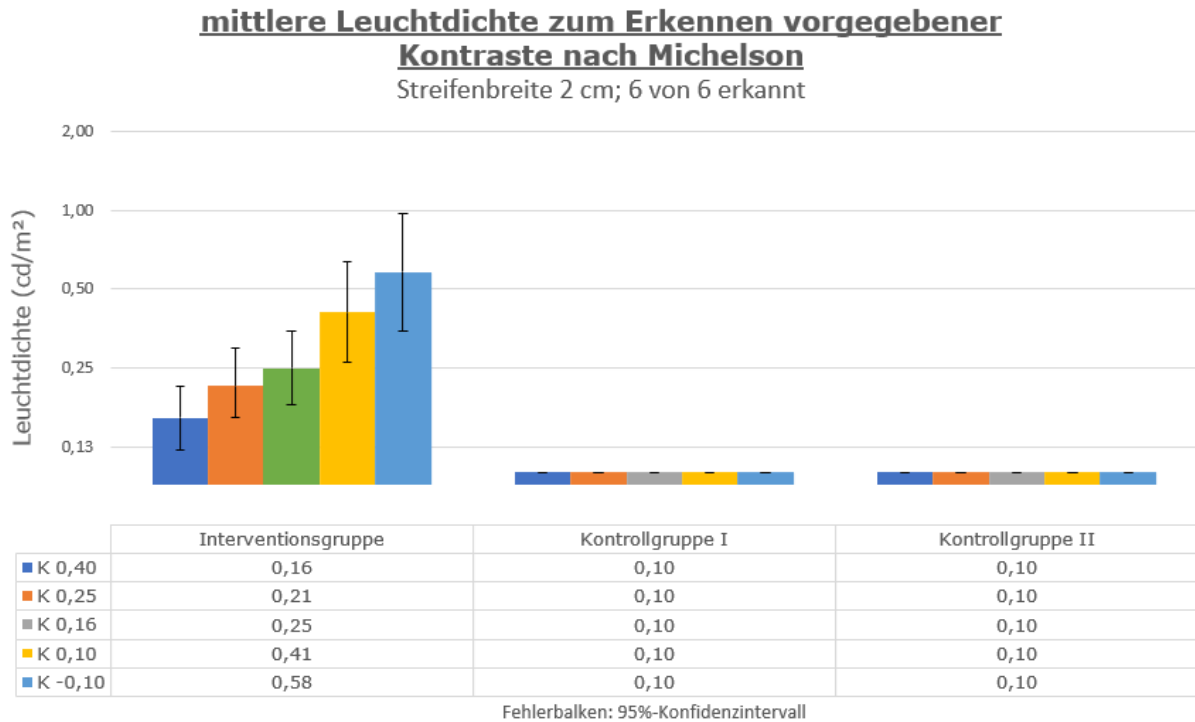


Abbildung 14: Mittlere Leuchtdichte zum Erkennen vorgegebener Kontraste nach Michelson bei einer Streifenbreite von 2 cm mit 6 von 6 richtigen Orientierungsangaben. Angegeben sind Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Die Skala der Leuchtdichte verläuft logarithmisch.

Unter Blendung benötigte die Interventionsgruppe eine signifikant höhere Umfeldleuchtdichte als die Kontrollgruppe I und Kontrollgruppe II. Bei dem aktuellen normativen Mindestkontrast liegt die mittlere Differenz bei $-0,26 \pm 0,07 \log(\text{cd}/\text{m}^2)$ (95% CI; $-0,40$ zu $-0,13$; $p < 0,001$) zum Erkennen von 4 von 6 Darbietungen. Die größte signifikante Differenz liegt zwischen der Interventionsgruppe und Kontrollgruppe I ($-0,91 \pm 0,12 \log(\text{cd}/\text{m}^2)$ [95% CI; $-1,14$ zu $-0,68$; $p < 0,001$]).

Unter Blendung war innerhalb der Interventionsgruppe jeweils eine höhere Umfeldleuchtdichte zum Erkennen der Streifenorientierungen der Kontraststufe erforderlich als ohne Blendung. Die mittleren Differenzen sind für jeden Kontrast statistisch signifikant (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den dargebotenen Kontraststufen ohne und mit Blendung mit 6 von 6 erkannten Streifenorientierungen innerhalb der Interventionsgruppe. Signifikante Werte sind gelb hervorgehoben.

<u>Ohne Blendung vs. mit Blendung</u> <u>6/6 erkannt</u>	
<u>Interventionsgruppe</u>	
<u>Kontrast nach Michelson</u>	<u>mittlere Differenz (log[cd/m²])</u> <u>MW ± SD (95% CI)</u>
0,40	-0,18 ± 0,27 (95% CI; -0,26 zu -0,10; p = 0,004); n = 45
0,25	-0,17 ± 0,32 (95% CI; -0,27 zu -0,07; p < 0,001); n = 44
0,16	-0,18 ± 0,27 (95% CI; -0,27 zu -0,10; p < 0,001); n = 43
0,10	-0,19 ± 0,21 (95% CI; -0,26 zu -0,12; p < 0,001); n = 41
-0,10	-0,30 ± 0,24 (95% CI; -0,38 zu -0,22; p < 0,001); n = 37

5.1 Untersuchung der Blendempfindlichkeit

Es konnten 20 Probanden der Subgruppe „blendempfindlich“ und 19 Probanden der Subgruppe „nicht blendempfindlich“ zugeteilt werden. In den Messungen der Kontraststufen benötigte die „nicht blendempfindliche“ Personengruppe eine höhere Umfeldleuchtdichte als die „blendempfindlichen“ Probanden, um die jeweilige Kontraststufe zu erkennen. Umgekehrt zeigten „blendempfindliche“ Probanden einen höheren Lichtbedarf unter Blendung um die dargebotenen Kontraste zu erkennen (siehe Abbildung 15).

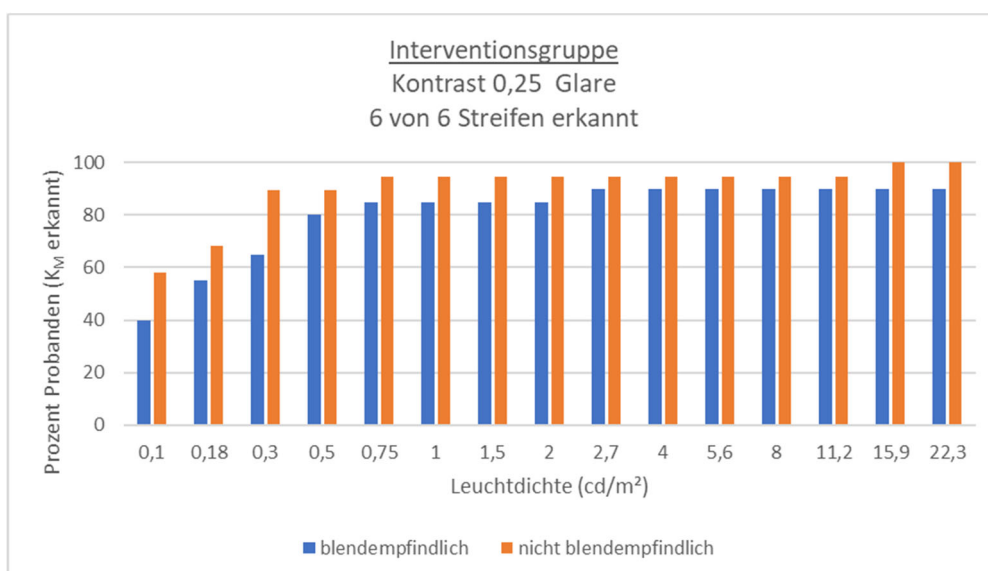


Abbildung 15: Prozentualer, kumulierter Anteil der Probanden in der Interventionsgruppe, die bei den geprüften Leuchtdichten den dargebotenen Kontrast erkannt haben. Darstellung für K_M = 0,25 unter Blendung mit 6 von 6 Orientierungen erkannt.

Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Subgruppen für die erforderliche Umfeldleuchtdichte zum Erkennen der dargebotenen Kontraste konnte sowohl ohne als auch mit Blendung nicht nachgewiesen werden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Subgruppen für die dargebotenen Kontraststufen unter Blendung mit 6 von 6 erkannten Streifenorientierungen.

„nicht blendempfindlich“ vs. „blendempfindlich“	
Glare; 6/6 erkannt	
	<u>Vergleich Subgruppen</u>
Kontrast nach Michelson	mittlere Differenz (log[cd/m²]) MW ± SD (95% CI)
0,40	0,08 ± 0,11 (95% CI; -0,18 zu 0,30; p = 0,535)
0,25	0,05 ± 0,16 (95% CI; -0,31 zu 0,36; p = 0,756)
0,16	0,07 ± 0,14 (95% CI; -0,21 zu 0,36; p = 0,625)
0,10	0,14 ± 0,21 (95% CI; -0,26 zu 0,57; p = 0,475)
-0,10	0,24 ± 0,22 (95% CI; -0,20 zu 0,69; p = 0,283)

Es zeigte sich dennoch ein Unterschied innerhalb der Gruppen für die benötigte Umfeldleuchtdichte bei den Kontraststufen ohne und mit Blendung (siehe Tabelle 4). So benötigten „blendempfindliche“ Probanden bereits ab $K_M = 0,25$ eine signifikant höhere Umfeldleuchtdichte unter Blendung, wohingegen die mittlere Differenz in der Subgruppe „nicht blendempfindlich“ erst bei $K_M = -0,10$ erst statistisch signifikant ist. Betragsmäßig liegen mehr log-Stufen zwischen den Umfeldleuchtdichte ohne und mit Blendung in der Gruppe „blendempfindlich“ als in der Gruppe „nicht blendempfindlich“.

Tabelle 4: Mittlere Differenzen der log-Leuchtdichte zwischen den Kontraststufen ohne und mit Blendung mit 4 von 6 erkannten Streifenorientierungen jeweils für die Subgruppen. Signifikante p-Werte sind gelb hervorgehoben.

<u>Ohne Blendung vs. mit Blendung, 4/6 erkannt</u>		
	„blendempfindlich“	„nicht blendempfindlich“
Kontrast nach Michelson	mittlere Differenz (log[cd/m ²]) MW ± SD (95% CI)	mittlere Differenz (log[cd/m ²]) MW ± SD (95% CI)
0,40	-0,14 ± 0,29 (95% CI; -0,31 zu -0,02; p = 0,111); n = 18	-0,09 ± 0,25 (95% CI; -0,20 zu -0,02; p = 0,116); n = 19
0,25	-0,18 ± 0,27 (95% CI; -0,34 zu -0,06; p = 0,046); n = 18	0,11 ± 0,32 (95% CI; -0,27 zu 0,00; p = 0,148); n = 19
0,16	-0,22 ± 0,28 (95% CI; -0,33 zu -0,11; p = 0,008); n = 18	-0,09 ± 0,17 (95% CI; -0,19 zu -0,02; p = 0,068); n = 18
0,10	-0,22 ± 0,25 (95% CI; -0,32 zu -0,13; p = 0,008); n = 17	-0,11 ± 0,22 (95% CI; -0,21 zu -0,03; p = 0,065); n = 18
-0,10	-0,32 ± 0,39 (95% CI; -0,46 zu -0,18; p < 0,001); n = 17	-0,18 ± 0,20 (95% CI; -0,25 zu -0,11; p = 0,003); n = 18

6 Kurvenanpassung für relative Häufigkeiten

Für die Interventionsgruppe erfolgte eine Kurvenanpassung, um Leuchtdichten an den Schwellen für vorgegebene Häufigkeiten zu berechnen. Die relativen Häufigkeiten wurden z-transformieren, wodurch linear Werte zu log-Leuchtdichte entstanden (siehe Anlage). Mittels linearer Regression konnten Steigung und Achsenabschnitt von "log(cd/m²) gegen z" bestimmt werden. Anschließend ließ sich mit Hilfe von Steigung und Achsenabschnitt mittels linearer Gleichung für die untersuchten Leuchtdichten der jeweilige z-Wert berechnen und abschließend wieder in Häufigkeiten transformieren. Für variable Häufigkeiten (z. B. 50%, 75%, 90%, 95%, 99%) können jetzt erforderlichen Leuchtdichten für die geprüften Kontraststufen ermittelt werden (siehe 16).

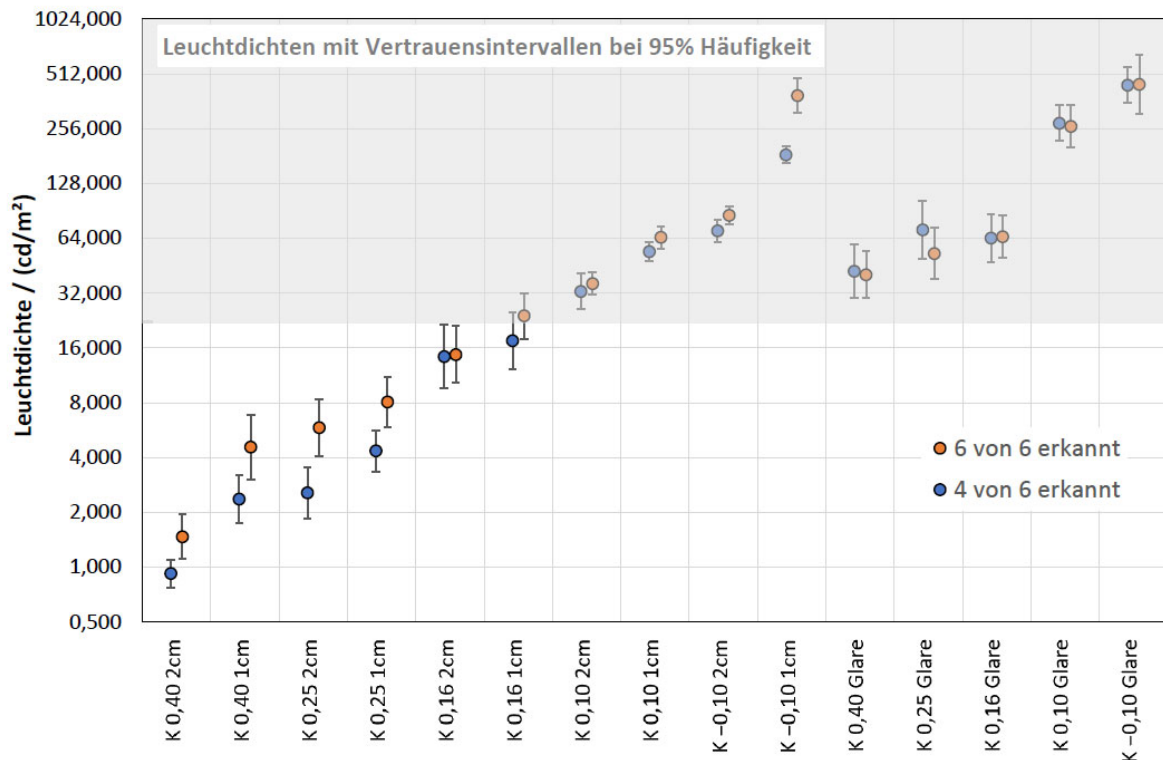


Abbildung 16: Leuchtdichten mit 95%-Konfidenzintervallen die erforderlich sind, damit z. B. 95 % der Sehbehinderten die angegebenen Kontraststufen erkennen. Der grau hinterlegte Bereich wurde nicht innerhalb der Studie geprüft.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Liegt eine Sehbehinderung vor, so steigt die erforderliche Umfeldleuchtdichte zur Erkennung von Kontrasten, abhängig von Kontrast und Detailhaltigkeit des Objektes. Personen mit einer Sehbehinderung benötigen eine höhere Umfeldleuchtdichte als augengesunde Personen. Insgesamt führte eine Erhöhung der Umfeldleuchtdichte zu einer verbesserten Wahrnehmung von Kontrasten. Dabei war es in diesem Projekt allerdings nicht möglich, dass von jedem Probanden der Interventionsgruppe besonders die geringen Kontraste ($K_M < 0,16$) erkannt werden konnten. Dazu sei gesagt, dass die maximal einstellbare Umfeldleuchtdichte nach oben hin begrenzt war. Möglicherweise hätte eine höhere Umfeldleuchtdichte zu einer Erkennung geführt. Über eine Kurvenanpassung aus den generierten relativen Häufigkeiten ist es möglich gewesen, Leuchtdichten für beliebige Häufigkeiten zu generieren, damit der gewünschte relative Anteil den verwendeten Kontrast erkennt. Eine fortführende Prüfung der so erhaltenen Leuchtdichte-Werte kann diese bestätigen oder optimieren. Blendung führte bei den sehbehinderten Testpersonen zu einer Erhöhung der benötigten Umfeldleuchtdichte von mindestens 0,2 log-Stufen ($\sim 60\%$). Dunklere Streifen als der Untergrund benötigten eine höhere Umfeldleuchtdichte als hellere Streifen. Visuelle Informationen zur z. B. Orientierung und Wegfindung im öffentlichen Raum sollten daher heller als der Untergrund gestaltet werden. Auch wenn kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Blendempfindlichkeit festgestellt werden konnte, brauchten „blendempfindliche“ Probanden unter Blendung eine höhere Umfeldleuchtdichte als ohne Blendung zur Erkennung der Kontraste. Anzumerken sei der geringe Stichprobenumfang in den Subgruppen. Weitere Untersuchungen mit größeren Stichproben sind erforderlich.

Die Veröffentlichung der detaillierten Ergebnisse erfolgt nach Abschluss des Projektes auf der Webseite des Forschungsförderers:

<https://www.zukunftbau.de/mediathek/forschungsberichte>

ZUKUNFTBAU

FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Die Forschung wurde mit Mitteln der Zukunft Bau Forschungsförderung des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung gefördert. (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-20.08)

8 Literatur

Literatur

- [1] Resnikoff S, Pascolini D, Etya'ale D et al. Global data on visual impairment in the year 2002. Bull World Health Organ 2004; 82: 844–851; DOI: 10.1590/S0042-96862004001100009
- [2] [Anonym] Gutenberg-Gesundheitsstudie | ghs » Informationen zur Studie (19.09.2021). Im Internet: <http://www.gutenberg-gesundheitsstudie.de/ghs/informationen-zur-studie.html>; Stand: 19.09.2021
- [3] Deutsches Institut für Normung. Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung: Deutsches Institut für Normung (2009-12); 2009
- [4] Methling D. Bestimmen von Sehhilfen. 3. Aufl. Stuttgart, New York, NY: Thieme; 2013
- [5] Hauck N. Entwicklung eines Kartentests zur Bewertung der Kontrastempfindlichkeit auf Basis der Punktsehschärfe [Diplomarbeit]. Jena: Ernst-Abbe-Hochschule; 2004
- [6] Hauck N. Barrierefreie Beleuchtungslösungen für sehbehinderte Menschen in Innenräumen sowie Entwicklung einer Kontrastbestimmungsmethode: Barrierefreie Beleuchtungslösungen für sehbehinderte Menschen in Innenräumen sowie Entwicklung einer Kontrastbestimmungsmethode: Wien
- [7] Lohaus I, Meyer S, Kreiser S, Schulze C, Rehberg K, Glasow N, Vorisková S. Visuelle Barrierefreiheit durch die Gestaltung von Kontrasten. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag; 2018
- [8] Deutsches Institut für Normung. Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen: Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude: Deutsches Institut für Normung (2010-10); 2010
- [9] Deutsches Institut für Normung. Straßenbeleuchtung- Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen. Berlin: Beuth Verlag GmbH (2021-09); 2021
- [10] Eichhoff L. Möglichkeiten zur quantitativen Erfassung der physiologischen Blendung. Lichttechnik 1970; 22: 185
- [11] DIN EN 13201. Strassenbeleuchtung (26.01.2022); Stand: 26.01.2022
- [12] CIE. Glare and uniformity in road lighting installations. Technical Report 31 1976
- [13] Bach M. The Freiburg Visual Acuity Test-variability unchanged by post-hoc re-analysis. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 2007; 245: 965–971; DOI: 10.1007/s00417-006-0474-4
- [14] Lange C, Feltgen N, Junker B et al. Resolving the clinical acuity categories "hand motion" and "counting fingers" using the Freiburg Visual Acuity Test (FrACT). Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 2009; 247: 137–142; DOI: 10.1007/s00417-008-0926-0
- [15] Lieberman HR, Pentland AP. Microcomputer-based estimation of psychophysical thresholds: The Best PEST. Behavior Research Methods & Instrumentation 1982; 14: 21–25; DOI: 10.3758/BF03202110
- [16] Wesemann W. Sehschärfebestimmung mit Freiburger Visustest, Bailey-Lovie-Tafel und Landoltring-Tafel. Klin Monbl Augenheilkd 2002; 219: 660–667; DOI: 10.1055/s-2002-35168

- [17] Bach M, Schäfer K. Visual Acuity Testing: Feedback Affects Neither Outcome nor Reproducibility, but Leaves Participants Happier. PLoS ONE 2016; 11: e0147803; DOI: 10.1371/journal.pone.0147803
- [18] Kollbaum PS, Jansen ME, Kollbaum EJ et al. Validation of an iPad test of letter contrast sensitivity. Optom Vis Sci 2014; 91: 291–296; DOI: 10.1097/OPX.000000000000158
- [19] Jungnickel H. Objektive und subjektive Bewertungsverfahren zur Wirkung von Aberrationen am Auge [Dissertation]. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau; 2015

Realisation of a hemispherical illuminance in an integrating sphere

Jan Schmidt, Maic Meyer, Robert Maass, Stefan Pendsa, Thorsten Gerloff
Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig

The integrating sphere

For the calibration of photometers, a hemispherical illuminance can be required in addition to the planar illuminance. To achieve this, an integrating sphere is used at PTB. An integrating sphere is a hollow sphere whose inside is often coated with barium sulphate. Pure Barium sulphate is a white, crystalline mineral with very low light absorption between wavelengths of 250nm and 2500nm and consequently high reflectivity in the visible wavelength range as well as in the near infrared (Figure 1). Multiple reflections of light within the sphere result in a very uniform luminance distribution on the inner surface of the sphere. The sphere used at PTB has a diameter of 1.65 metres and is coated with a mixture of barium sulphate and additives with an average spectral reflectance of about 80% in the visible spectral range (Figures 1 and 2). There are several closable openings in the wall of the sphere, which provides space for an internal lamp support rod, a light source or large-area components on the inside and outside.

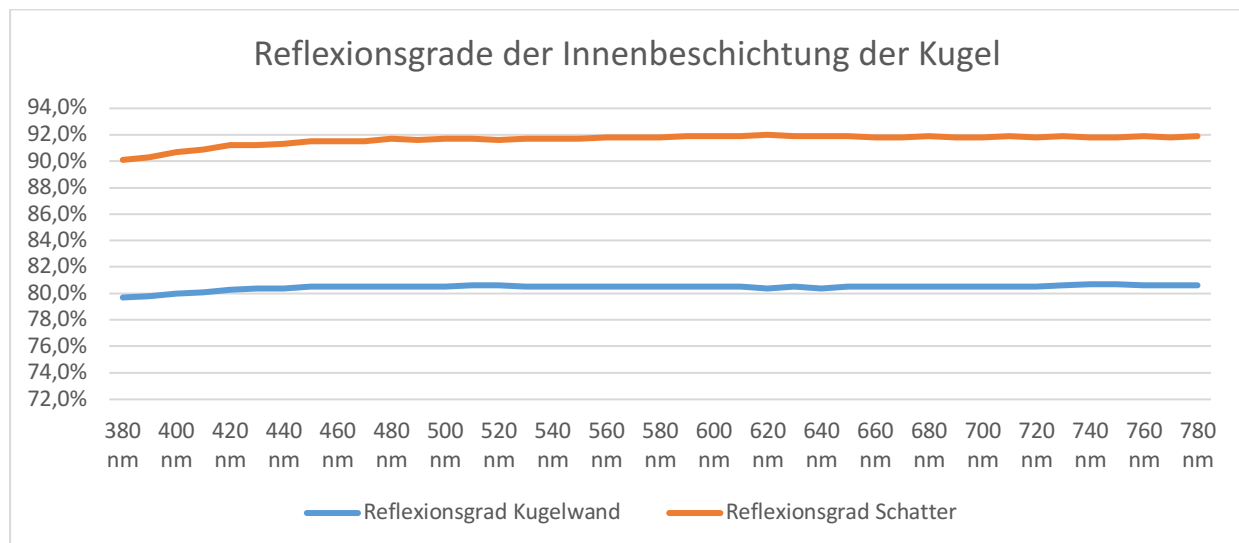


Figure 1: Reflectance of the inner coating of the sphere

To realise a hemispherical illuminance from a homogeneous spatial luminance distribution, the lamp support rod inside the sphere was removed and the light was introduced through a large-area opening in the wall of the sphere. Light sources are mounted in a ring on a round support plate, thus closing the sphere opening (Figure 3). In the centre of the plate is a hole in which various detectors can be mounted.

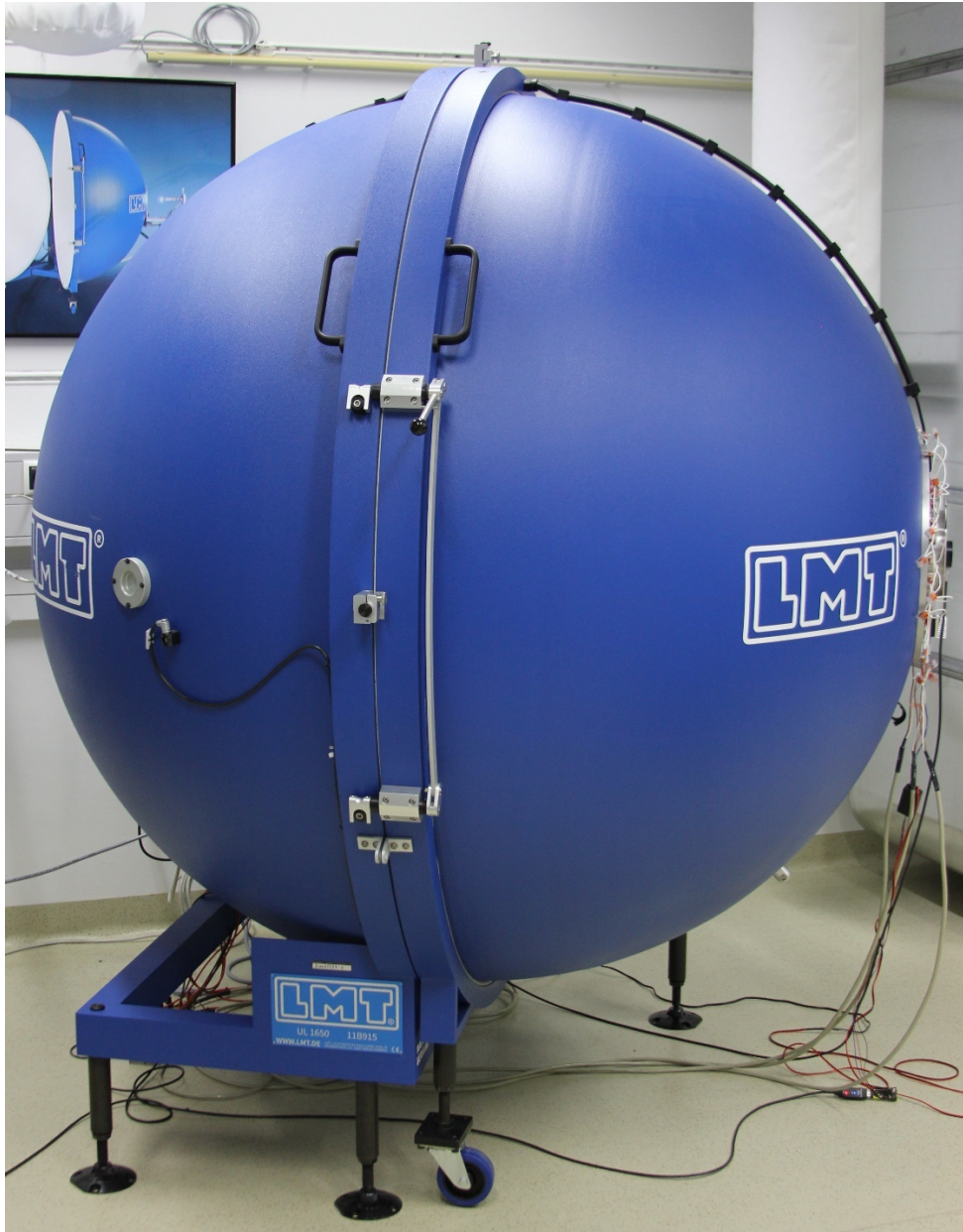


Figure 2: The integrating sphere with built-in incandescent lamp ring (right) from the outside.

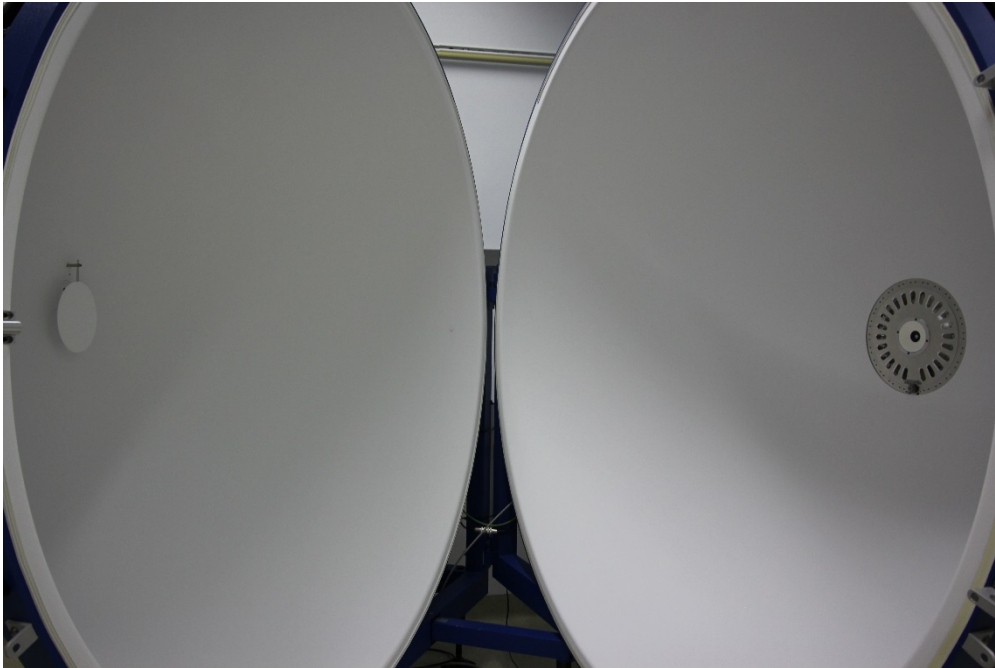


Figure 3: Interior of the sphere with shutter (left) and built-in incandescent lamp ring (right)

Light sources

We have manufactured two types of round support plates (hereafter referred to as the ring) with two different light sources: one with incandescent lamps and one with LEDs.

The incandescent lamp ring consists of two plates that are connected to each other in the middle via a cylindrical receptacle in the form of a tunnel piece. A detector can be installed in this. On the plate facing the inside of the sphere are the bases for the bulbs. These provide space for 21 lamps. Between the lamps and the inside of the sphere is a motor-driven shutter. This regulates the incidence of light into the interior of the sphere without changing the colour temperature of the lamps, which would be the case if the current were changed. The surface of the back plate reflects part of the light emitted outwards into the sphere, thus increasing the luminance on the inner wall of the sphere. To counteract the strong heat generation of the incandescent lamps, there is a heat sink on the outside of the ring (Figure 4 and 5 below). In operation, all 21 lamps are regulated via the lamp current to a uniform similar colour temperature of e.g. 2856 K (similar to standard illuminant A). Seven incandescent lamps each are connected in series to one of three separate circuits. In this way, the illuminance can be additionally regulated by operating one, two or three circuits without strongly affecting the uniform luminance distribution inside. In addition, the bases can be fitted with incandescent lamps of different wattages (e.g. 10W, 20W, 100W, 250W) and thus the hemispherical illuminance on the detector can be varied between 1 lux and 5000 lux.

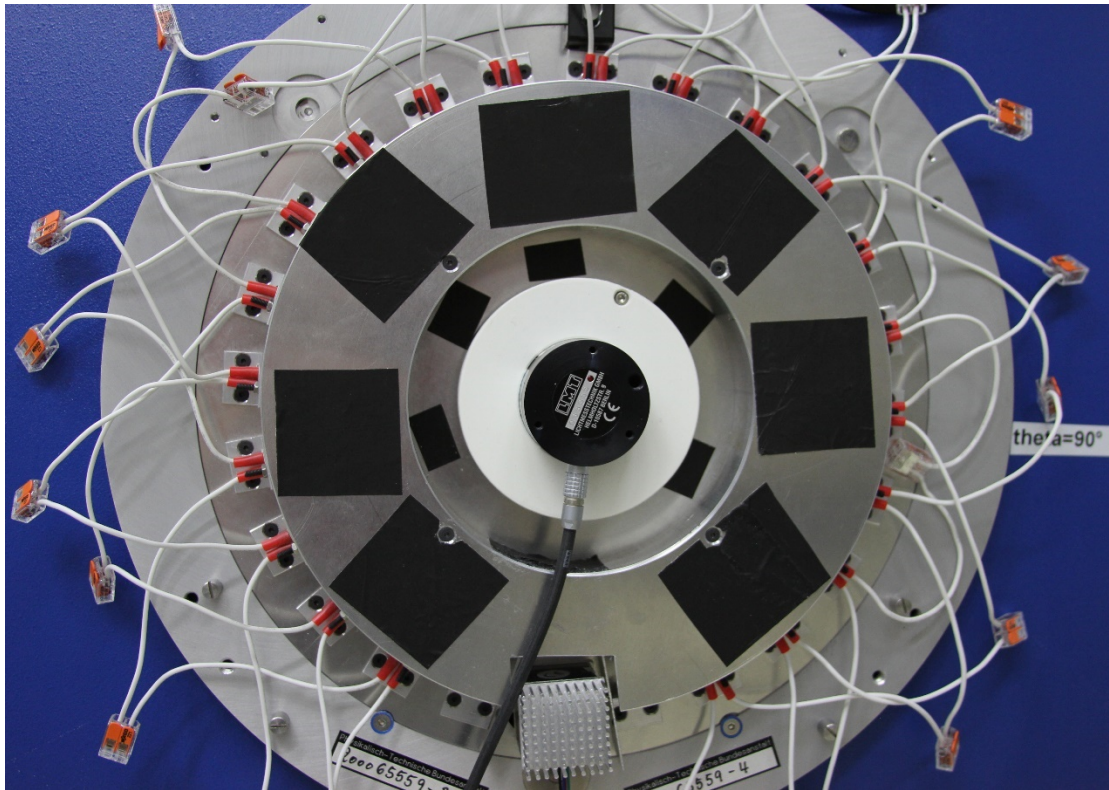


Figure 4: Back plate of the incandescent lamp ring with built-in photometer head

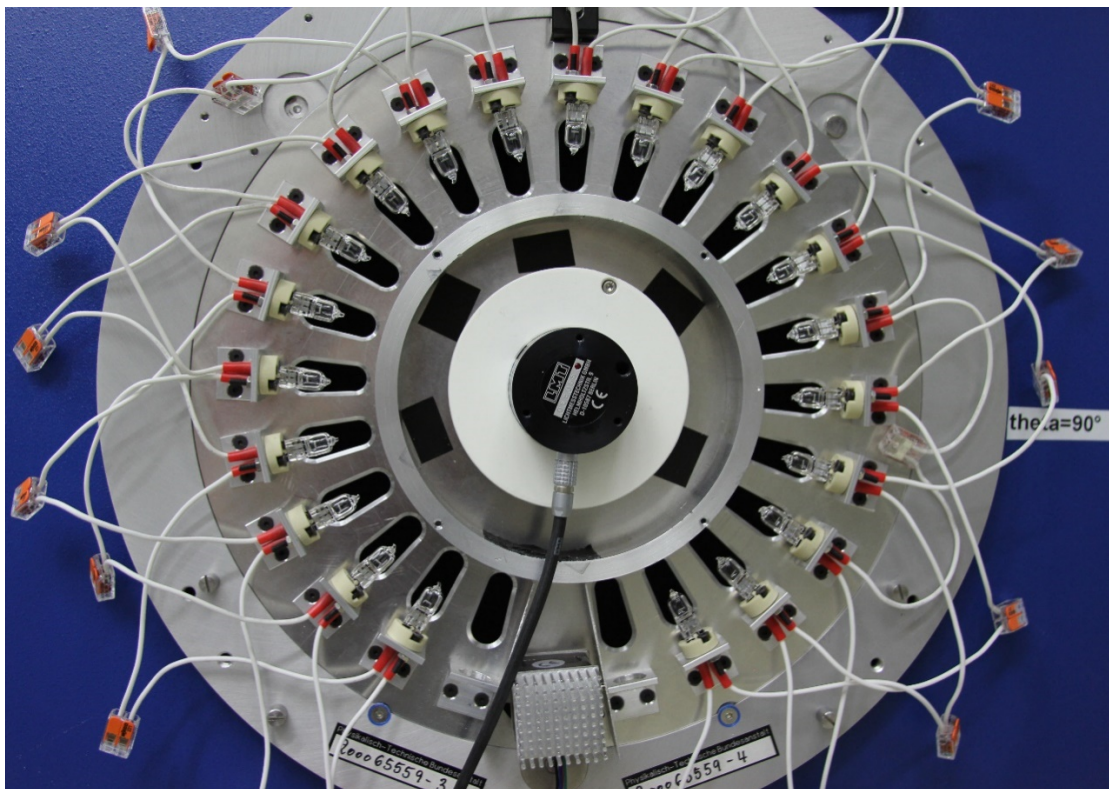


Figure 5: Incandescent lamp ring without back plate with open shutter, 21 incandescent lamps and built-in photometer head

The LED ring is a single circuit board that has been fitted with six different types of LEDs. Here, too, there is a cylindrical receptacle in the centre in which a detector can be installed. The different LEDs are arranged in rings according to their type and have different colours: cool white, warm white, blue, green, red and infrared. Each LED type has its own electrical circuit. This allows them to be controlled separately. Since the spectral distribution of the emitted light changes only very slightly when the operating current is changed, the use of a motorised shutter is not necessary and the amount of light falling into the sphere can be controlled directly via the LED current intensity. On the back of the ring is a cooling system consisting of heat sinks and fans.



Figure 6: The front of the LED ring

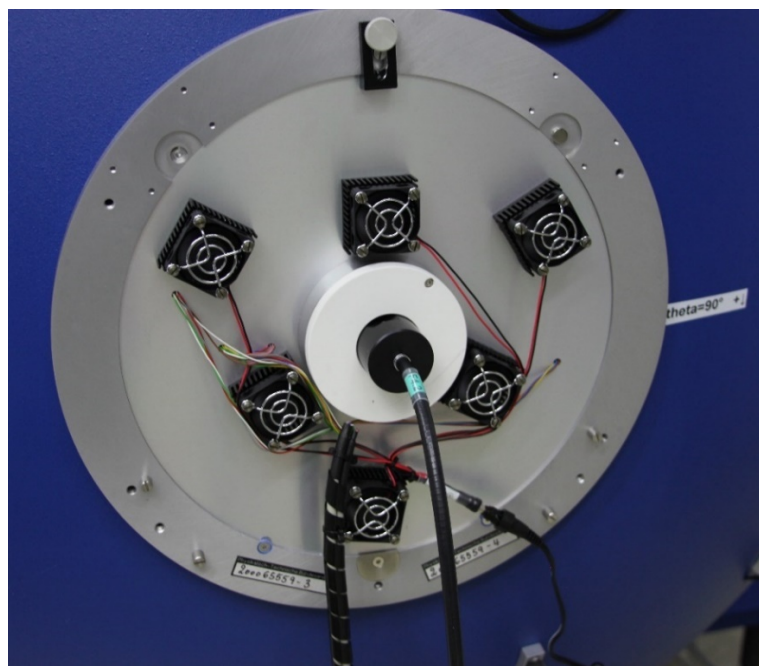


Figure 7: The back of the LED ring with coupling optics and optical waveguide of a spectroradiometer

Measurement procedure

To determine the homogeneity of the luminance distribution on the surface of the sphere, a luminance measuring camera is installed in place of the detector. With the help of a fisheye lens, the camera can capture the entire inner surface of the sphere. As can be seen in figure 8, the luminance distribution of the entire sphere varies in the range from 5500 cd/m² to 7000 cd/m². A striking feature is the elliptical shutter on the opposite half of the sphere, which lies about 10 cm in front of the inner wall of the sphere and whose function will be discussed in the following section. This shutter has a higher reflectance (Figure 1) and therefore reflects more light back to the camera than the inner wall of the sphere.

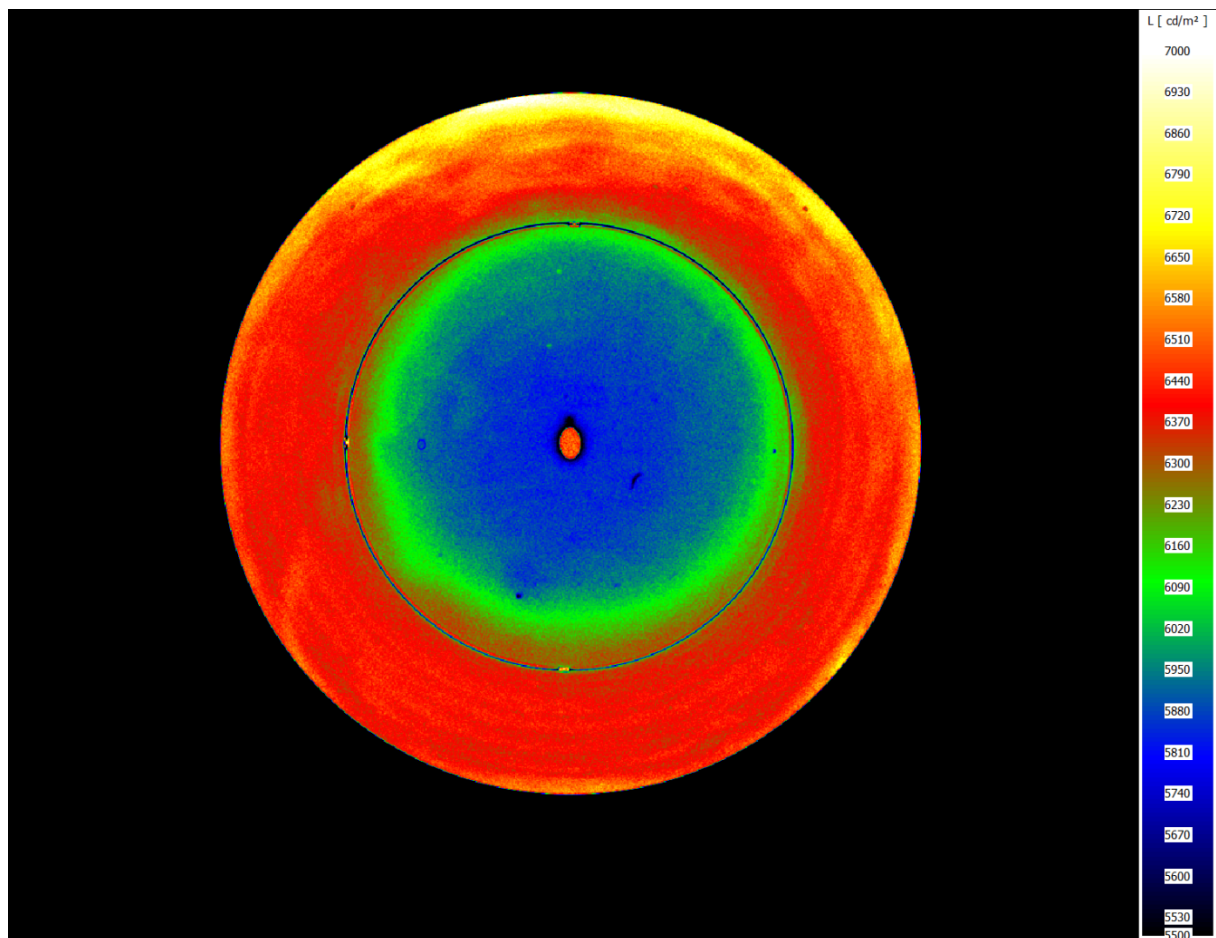


Figure 8: Luminance distribution in the sphere as a false colour image

To determine the hemispherical illuminance, a calibrated photometer head (reference detector) is installed in the ring. By varying the current intensity of the LED ring or the shutter opening of the incandescent lamp ring, a predefined illuminance level is set at the reference detector. An additional photometer head (monitor detector) is located behind the shutter in the spherical wall. The shutter prevents direct illumination of the monitor detector. The photocurrent of the monitor detector is measured at a known illuminance of the reference detector and the correlation is determined (Figure 9). Subsequently, the reference detector installed in the ring can be replaced by non-calibrated detectors (substitution method). With the help of the monitor detector, desired illuminances can be realised and the detectors calibrated.

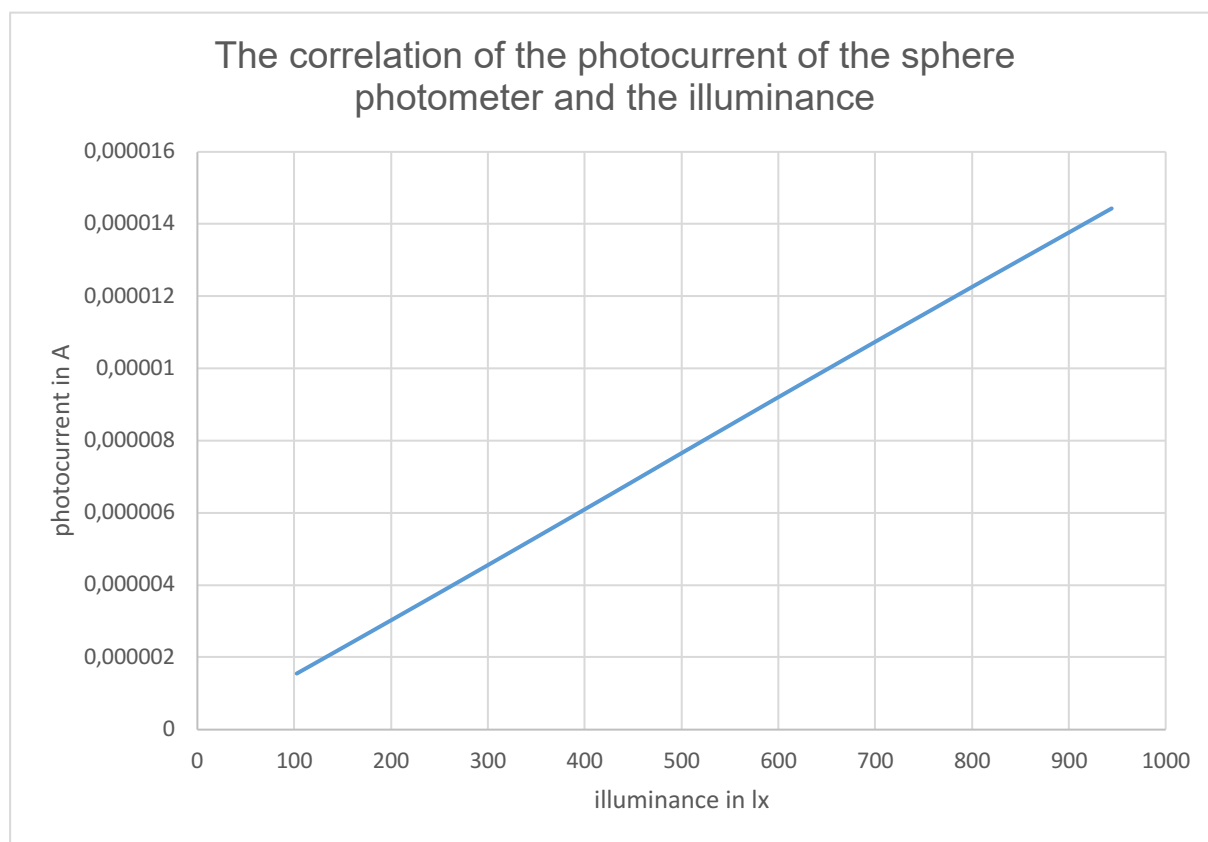


Figure 9: The correlation of the photocurrent of the sphere photometer and the illuminance

Summary

It was shown that a sufficiently good homogeneity of the luminance distribution can be achieved by the high reflectivity inside an integrating sphere. This can be used to realise a hemispherical illuminance.

Sources

<https://www.chemie.de/lexikon/Bariumsulfat.html>

Realisierung einer hemisphärischen Beleuchtungsstärke in einer Ulbricht-Kugel

Jan Schmidt, Maic Meyer, Robert Maass, Stefan Pendsa, Thorsten Gerloff
Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig

Die Ulbricht-Kugel

Zur Kalibrierung von Photometern kann neben der planaren auch eine hemisphärische Beleuchtungsstärke gefordert werden. Um dies zu erreichen, wird in der PTB eine Ulbricht-Kugel verwendet. Eine Ulbricht-Kugel ist eine hohle Kugel, deren Innenseite oftmals mit Bariumsulfat beschichtet ist. Reines Bariumsulfat ist ein weißes, kristallines Mineral mit sehr geringer Lichtabsorption zwischen Wellenlängen von 250nm und 2500nm und folglich hoher Reflektivität im sichtbaren Wellenlängenbereich sowie im nahen Infrarot. Durch Vielfachreflexionen des Lichts in der Kugel kommt eine sehr gleichmäßige Leuchtdichteverteilung auf der inneren Oberfläche der Kugel zustande. Die in der PTB verwendete Kugel hat einen Durchmesser von 1,65 Meter und die Beschichtung aus Bariumsulfat und Zusatzstoffen hat einen mittleren spektralen Reflexionsgrad von etwa 80% im sichtbaren Spektralbereich (Abbildungen 1 und 2). In der Kugelwand befinden sich mehrere verschließbare Öffnungen, welche Platz für eine interne Lampenhalterstange, eine Lichtquelle oder großflächige Bauteile an Innen- und Außenseite bietet.

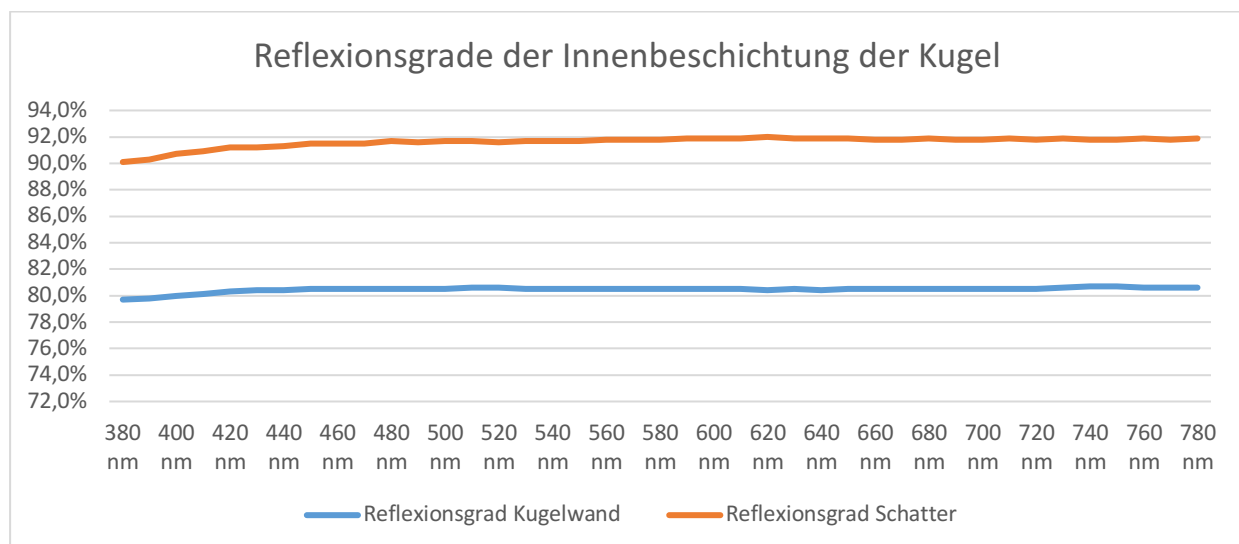


Abbildung 1: Reflexionsgrade der Innenbeschichtung der Kugel

Zur Realisierung einer hemisphärischen Beleuchtungsstärke aus einer homogenen räumlichen Leuchtdichteverteilung wurde die Lampenhalterstange im Inneren der Kugel entfernt und das Licht durch eine großflächige Öffnung in der Kugelwand eingebracht. Lichtquellen werden ringförmig auf einer runden Trägerplatte angebracht und damit die

Kugelöffnung verschlossen (Abbildung 3). In der Mitte der Platte befindet sich ein Loch, in dem verschiedene Detektoren angebracht werden können.

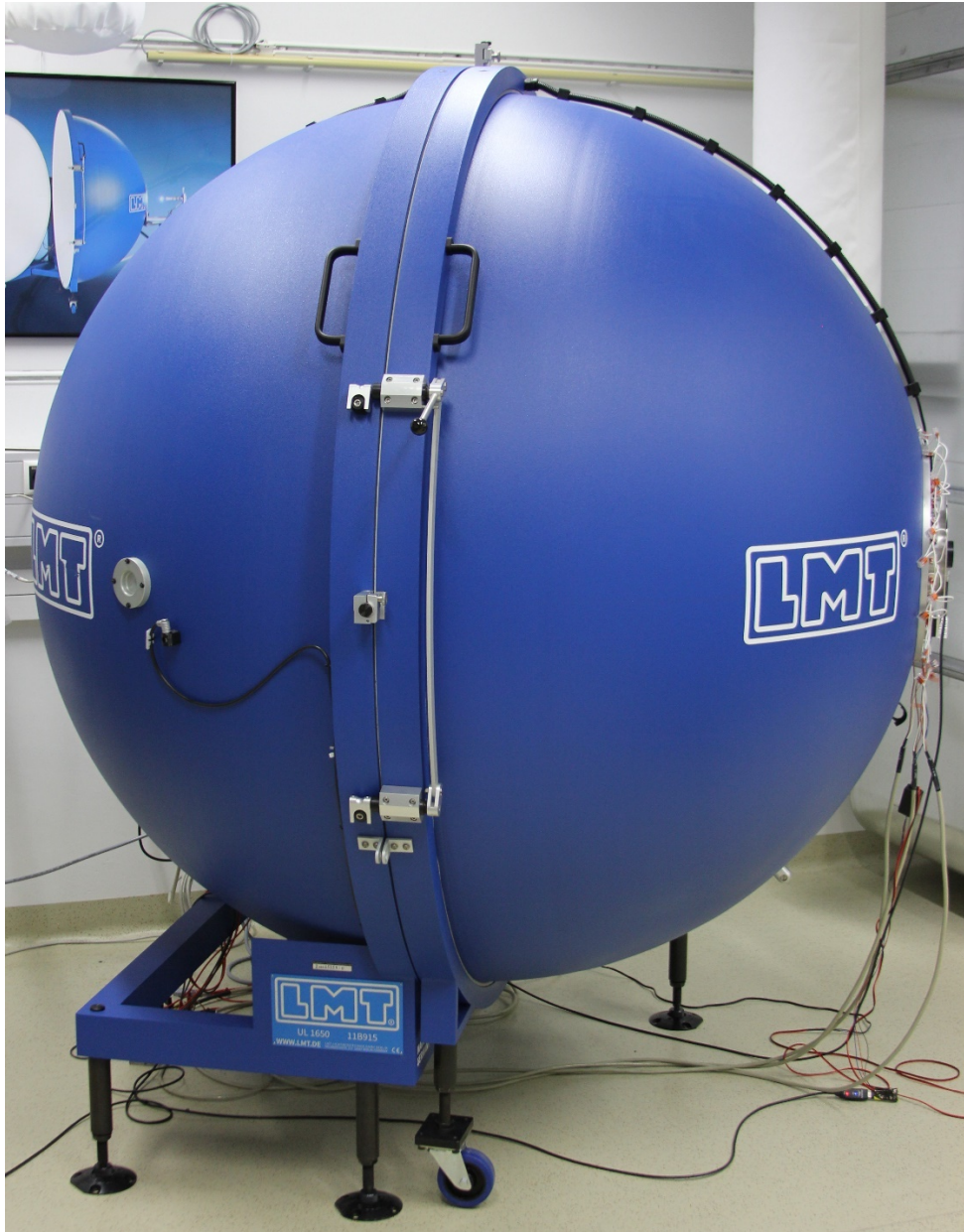


Abbildung 2: Die Ulbricht-Kugel mit eingebautem Glühlampenring (rechts) von außen

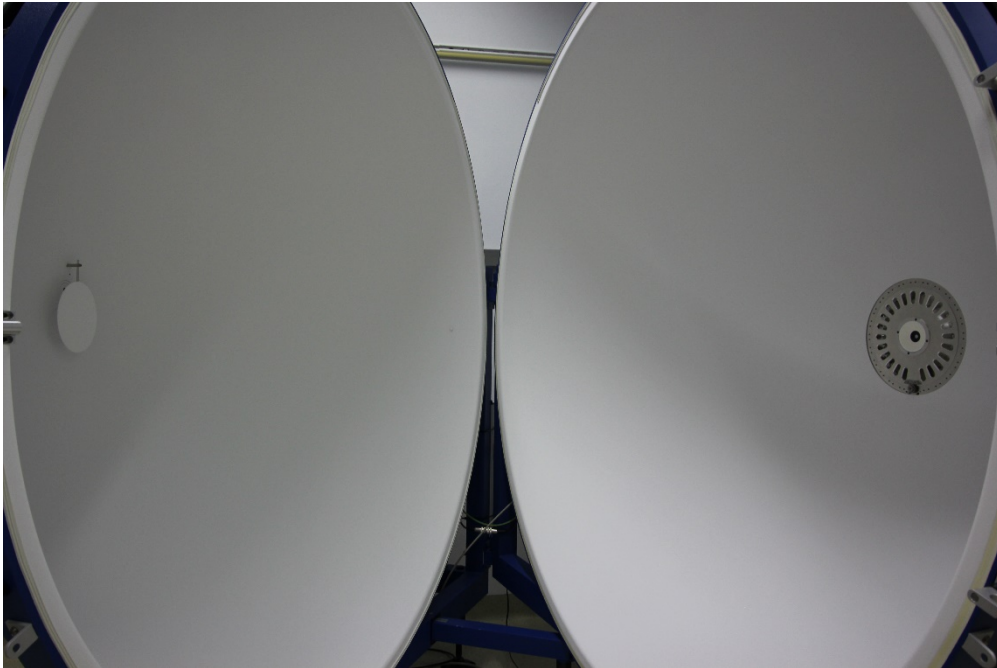


Abbildung 3: Innenraum der Kugel mit Schatter (links) und eingebautem Glühlampenring (rechts)

Lichtquellen

Die runden Trägerplatten (folgend als Ring bezeichnet) wurden separat mit zwei verschiedenen Lichtquellen bestückt: eine mit Glühlampen und eine mit LEDs.

Der Glühlampen-Ring besteht aus zwei Platten, die in der Mitte über eine zylindrische Aufnahmevorrichtung in Form eines Tunnelstücks miteinander verbunden sind. In dieser kann ein Detektor eingebaut werden. An der dem Kugelinneren zugewandten Platte befinden sich die Sockel für die Glühlampen. Diese bieten Platz für 21 Lampen. Zwischen den Lampen und dem Inneren der Kugel befindet sich ein motorbetriebener Schatter. Dieser reguliert den Lichteinfall in das Kugelinnere, ohne die Farbtemperatur der Lampen zu verändern, was bei einer Stromänderung der Fall wäre. Die Rückseitenplatte reflektiert an ihrer Oberfläche einen Teil des nach außen abgestrahlten Lichts in die Kugel und erhöht so die Leuchtdichte auf der Kugelinnenwand. Um der starken Wärmeentwicklung der Glühlampen entgegenzuwirken, befindet sich ein Kühlkörper an der Außenseite des Rings (Abbildung 4 und 5 unten). Im Betrieb werden alle 21 Lampen über den Lampenstrom auf eine einheitliche Ähnlichste Farbtemperatur von z.B. 2856 K (ähnlich Normlichtart A) geregelt. Jeweils sieben Glühlampen sind in Reihe geschaltet und an einem von drei separaten Stromkreisen angeschlossen. Auf diesem Wege kann die Beleuchtungsstärke durch Betrieb von ein, zwei oder drei Stromkreisen zusätzlich reguliert werden ohne die gleichmäßige Leuchtdichteverteilung im Inneren stark zu beeinträchtigen. Zusätzlich können die Sockel mit Glühlampen verschiedener Leistungen (z.B. 10W, 20W, 100W, 250W) bestückt werden und so die hemisphärische Beleuchtungsstärke auf dem Detektor zwischen 1 lux und 5000 lux variiert werden.

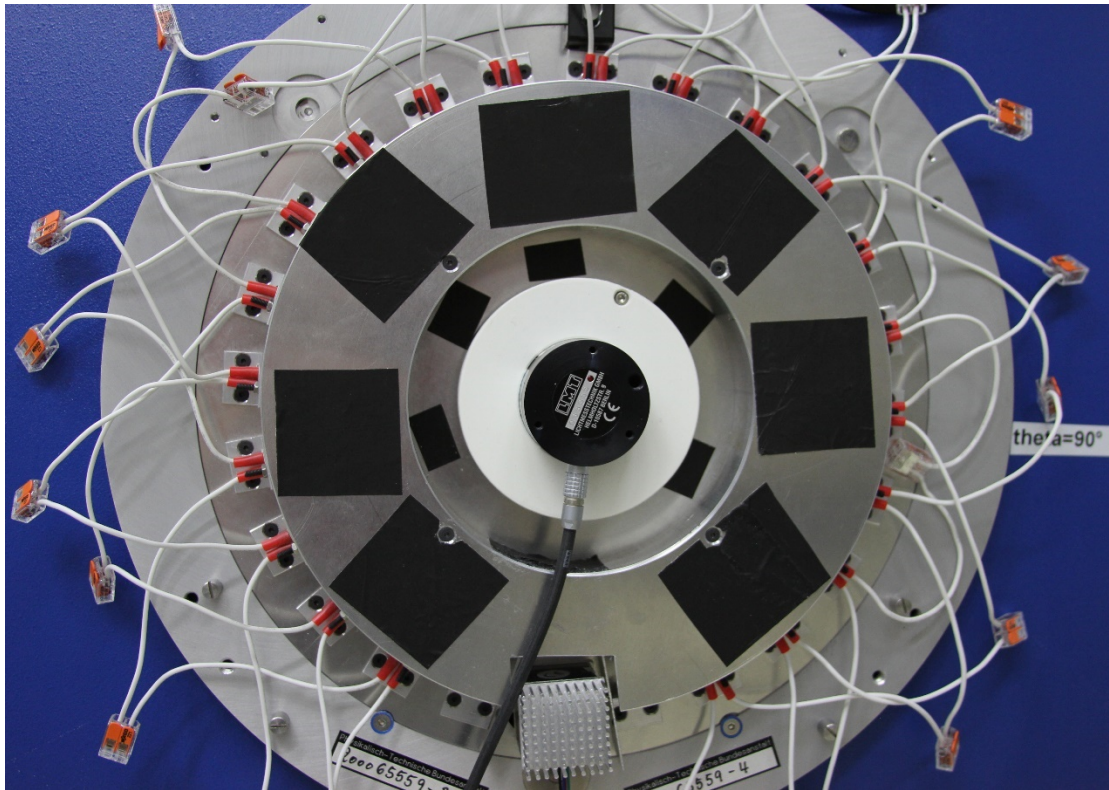


Abbildung 4: Rückseitenplatte des Glühlampenrings mit eingebautem Photometerkopf

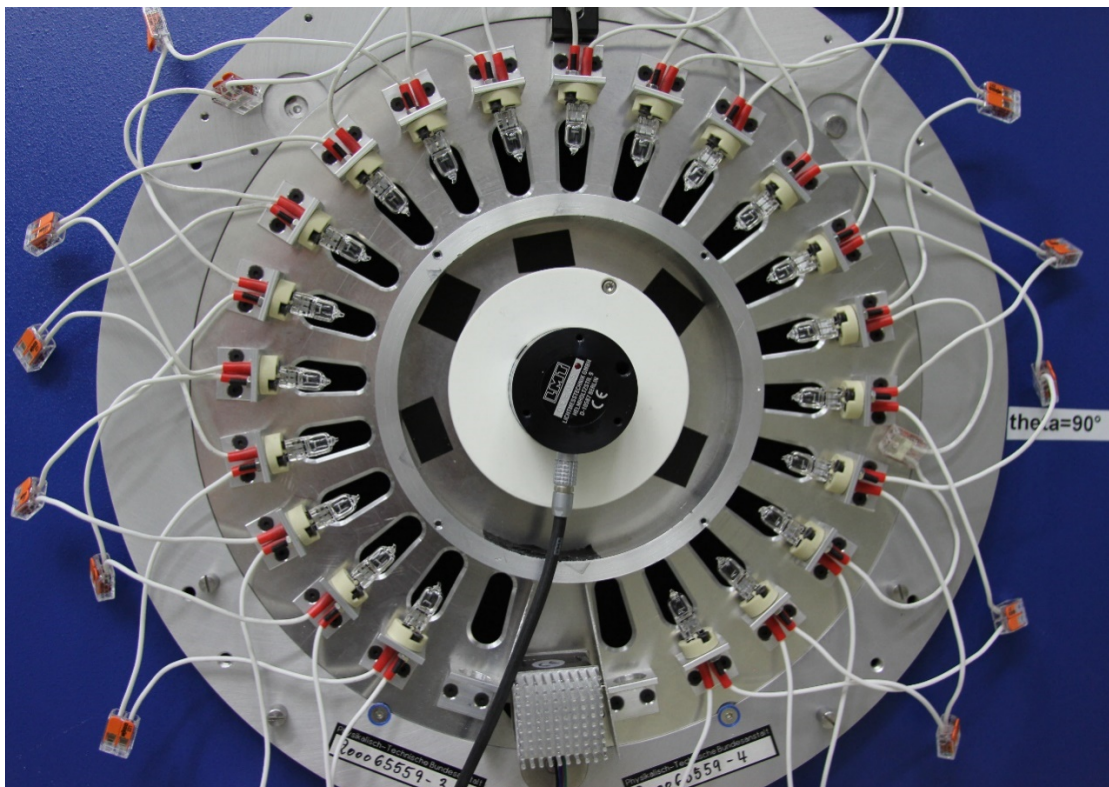


Abbildung 5: Glühlampenring ohne Rückseitenplatte mit offenem Schatter, 21 Glühlampen und eingebautem Photometerkopf

Der LED-Ring ist eine einzelne Platine, die mit sechs verschiedenen Typen von LEDs bestückt wurde. Auch hier befindet sich in der Mitte eine zylindrische Aufnahmevorrichtung, in dem ein Detektor eingebaut werden kann. Die verschiedenen LEDs sind nach ihrem Typ in Ringen angeordnet und haben verschiedene Farben: Kaltweiß, Warmweiß, Blau, Grün, Rot und Infrarot. Jeder LED-Typ besitzt einen eigenen Stromkreis und können getrennt angesteuert werden. Da sich die spektrale Verteilung des emittierten Lichts bei Änderung des Betriebsstroms nur sehr gering ändert, kann auf den Einsatz eines motorisierten Schatters verzichtet und der Lichteinfall in die Kugel direkt über die LED-Stromstärke geregelt werden. Auf der Rückseite des Ringes befindet sich ein Kühlsystem bestehend aus Kühlkörpern und Lüftern.



Abbildung 6: Die Vorderseite des LED-Rings

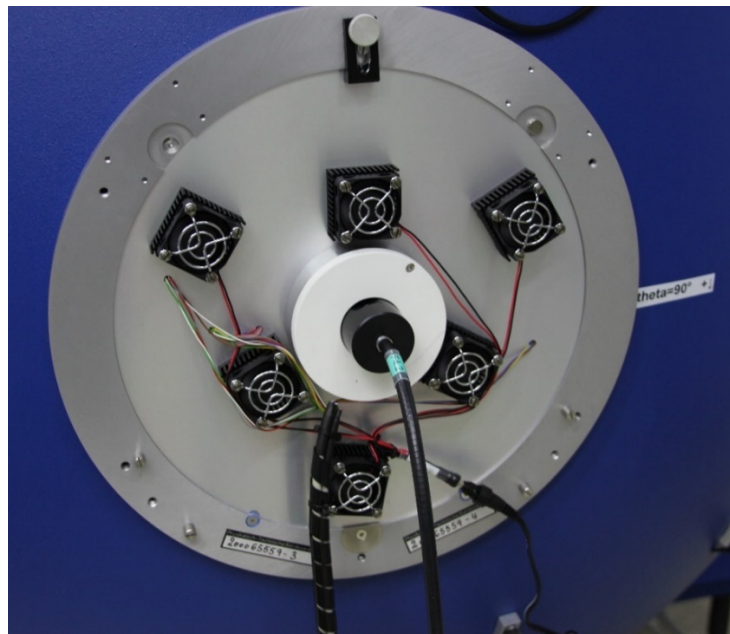


Abbildung 7: Die Rückseite des LED-Rings mit Einkoppeloptik und Lichtwellenleiter eines Spektroradiometers

Messverfahren

Um die Homogenität der Leuchtdichteverteilung auf der Kugeloberfläche zu bestimmen, wird eine Leuchtdichtemesskamera an Stelle des Detektors eingebaut. Mit Hilfe eines Fisheye-Objektivs kann die Kamera die gesamte Innenoberfläche der Kugel erfassen. Wie in Abbildung 8 zu sehen, variiert die Leuchtdichteverteilung der gesamten Kugel im Bereich von 5500 cd/m^2 bis 7000 cd/m^2 . Auffällig ist der ellipsenförmige Schatter auf der gegenüberliegenden Kugelhälfte, der etwa 10 cm vor der Kugelinnenwand liegt, auf dessen Funktion im folgenden Abschnitt eingegangen wird. Dieser Schatter hat einen höheren Reflexionsgrad (Abbildung 1) und reflektiert deshalb mehr Licht auf die Kamera zurück als die Kugelinnenwand.

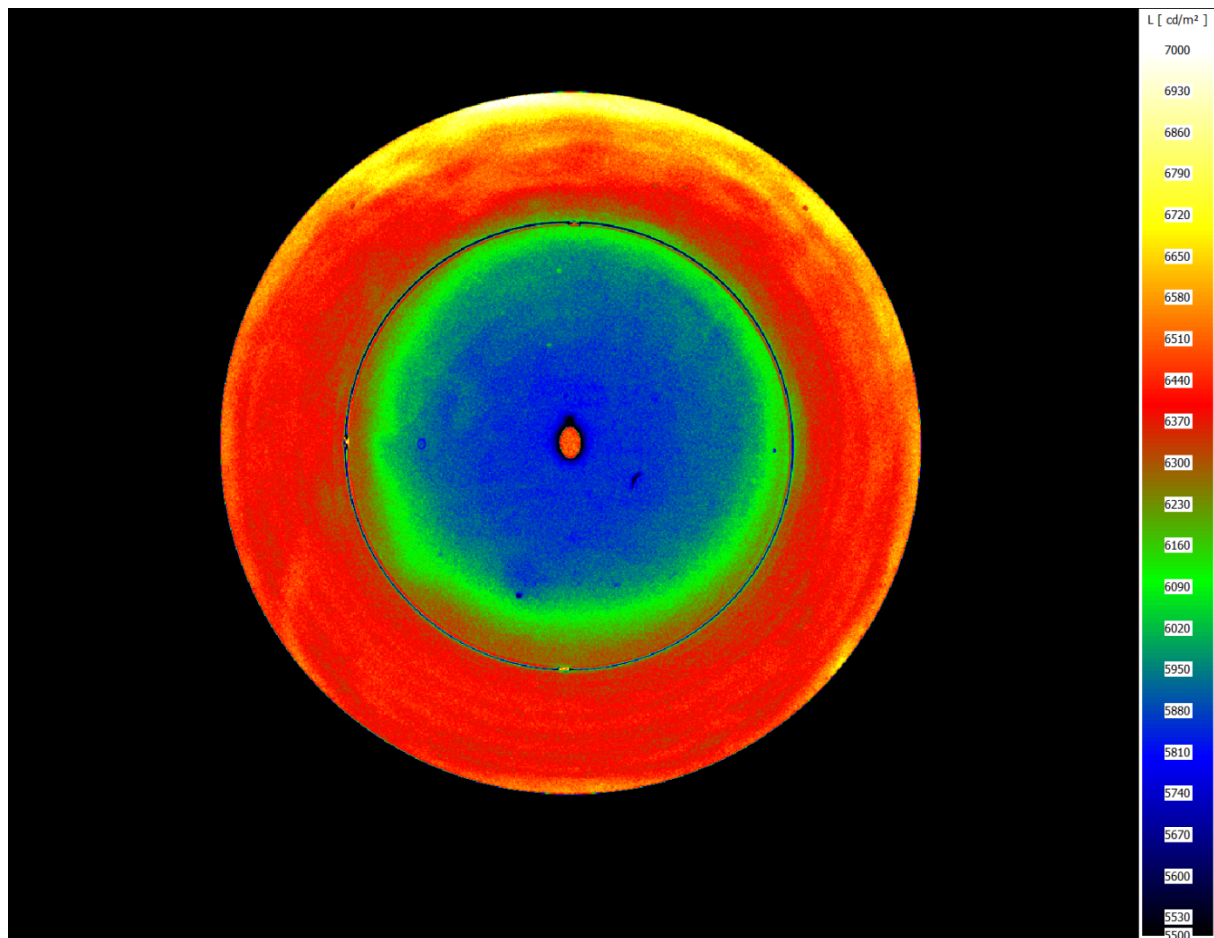


Abbildung 8: Leuchtdichteverteilung in der Kugel als Falschfarbenbild

Zur Bestimmung der hemisphärischen Beleuchtungsstärke, wird ein kalibrierter Photometerkopf (Referenzempfänger) im Ring eingebaut. Durch Variation der Stromstärke des LED-Rings bzw. der Schatteröffnung bei dem Glühlampenring wird eine vorgegebene Beleuchtungsstärke am Referenzempfänger eingestellt. Hinter dem Schatter befindet sich in der Kugelwand ein weiterer Photometerkopf (Monitorempfänger). Durch den Schatter wird die direkte Beleuchtung des Monitorempfängers verhindert. Der Photostrom des Monitorempfängers wird bei bekannter Beleuchtungsstärke des Referenzempfängers erfasst und der Zusammenhang bestimmt. (Abbildung 9). Im Anschluss kann der im Ring verbaute Referenzempfänger durch nicht kalibrierte Detektoren (Substitutionsmethode) ausgetauscht werden. Mit Hilfe des Monitorempfängers können gewünschte Beleuchtungsstärken realisiert und die Detektoren kalibriert werden.

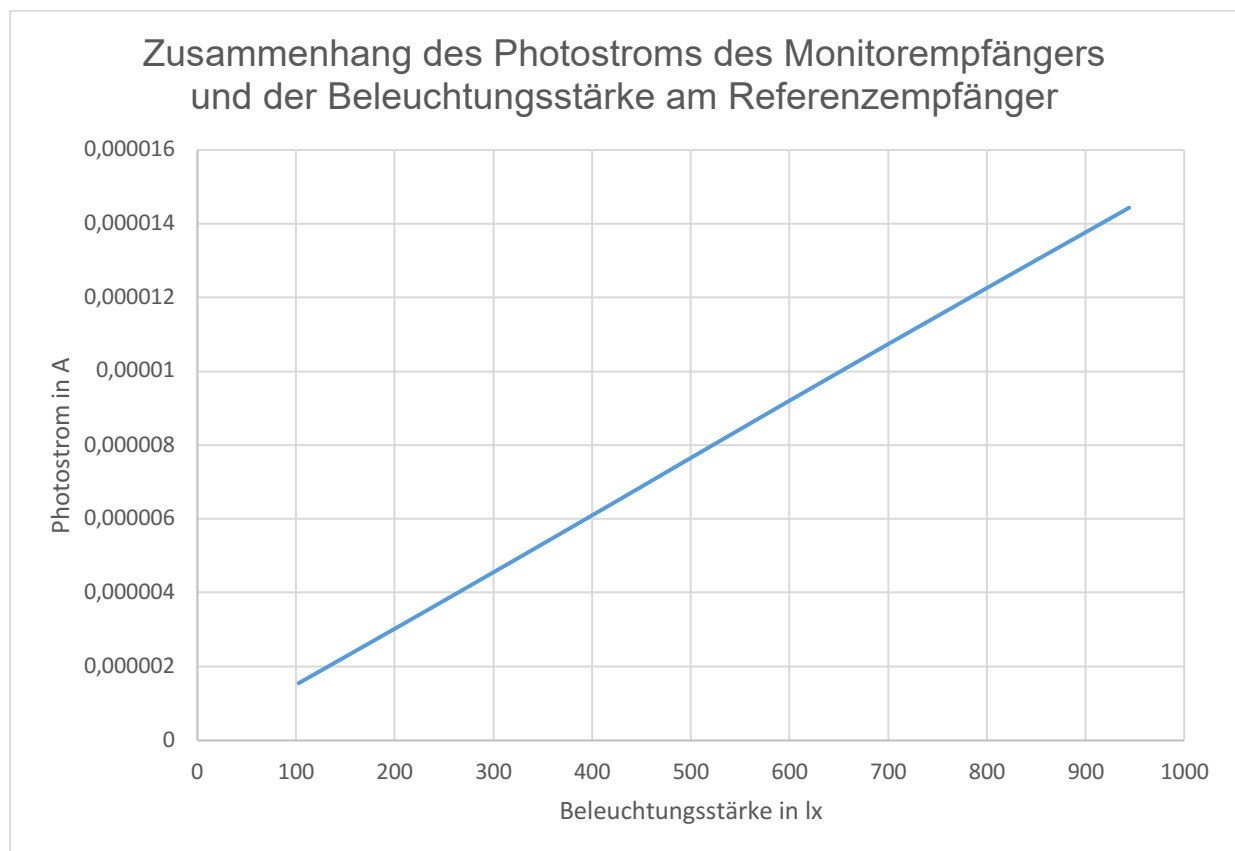


Abbildung 9: Der Zusammenhang des Photostroms des Kugelphotometers und der Beleuchtungsstärke

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass durch die hohe Reflektivität im Inneren einer Ulbricht-Kugel eine hinreichend gute Homogenität der Leuchtdichteverteilung erreicht werden kann. Diese kann zur Realisierung einer hemisphärischen Beleuchtungsstärke verwendet werden.

Quellen

<https://www.chemie.de/lexikon/Bariumsulfat.html>

Lichtquellen und deren Darstellung von niedrigen und hohen Beleuchtungsstärken für die Kalibrierung von Photometern

Till Schwarznecker, Maatje Hilmer, Johannes Ledig

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
till.schwarznecker@ptb.de

Abstract

Die Realisierung der SI-Basiseinheiten ist eine der Hauptaufgaben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB). Die Einheit der Lichtstärke wird dabei mit Normallampen dargestellt und bewahrt. Eine davon abgeleitete essenzielle Messgröße ist die photometrische Empfindlichkeit von Detektoren (Photometern). Diese wird für die Weitergabe der Lichtstärke mithilfe von Substitutionsverfahren benötigt.

Ein Photometerkopf besteht typischerweise aus einer Silizium-Photodiode, welche das auftreffende Licht erfasst und in einen elektrischen Strom umwandelt. Über einen integrierten $V(\lambda)$ -Filter, bestehend aus mehreren Schichten Farbglass, wird dabei die relative spektrale Empfindlichkeit des Detektors an die des menschlichen Auges (eines Normbeobachters) angepasst. Die Komponenten eines Photometers sind häufig thermostatisiert, da dadurch die Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur erheblich verringert wird.

Mithilfe eines Beleuchtungsstärke-Photometers lässt sich die Beleuchtungsstärke auf dessen Referenzebene bestimmen. Mit dem dazugehörigen Abstand zur Lichtquelle kann daraus über das photometrische Entfernungsgesetz die Lichtstärke ermittelt werden. Häufig haben Photometer ein zugehöriges Anzeigegerät, das den Photostrom in Ampere oder eine Beleuchtungsstärke in Lux anzeigt. Die Kalibrierung solcher Photometer ist eine der Aufgaben der Arbeitsgruppe 4.12 Lichtstärkeneinheit der PTB.

Um ein Photometerkopf zu kalibrieren, kann eine photometrische Empfindlichkeit in A/lx angegeben werden, die beschreibt, wie viel Photostromstärke pro Beleuchtungsstärke erzeugt wird. Alternativ können auch die Anzeigewerte bei bestimmten Beleuchtungsstärken im Kalibrierschein angegeben werden. Dabei wird meist eine große Spannweite an zu berichtenden Beleuchtungsstärken angefragt, damit in der Anwen-



derung zwischen diesen Werten interpoliert werden kann, um ebenfalls eine photometrische Empfindlichkeit in Skalenteile pro Beleuchtungsstärke für das Gerät zu bestimmen.

Das reguläre Leistungsangebot der PTB deckt dabei die Kalibrierung von Photometern bei Beleuchtungsstärken von 1 mlx bis 10 klx bezogen auf Glühlampenlicht ab. Die Erzeugung dieser unterschiedlichen Beleuchtungsstärken kann nur mit einer passenden Auswahl von Lichtquellen realisiert werden. Daneben gibt es weitere Aspekte, die bei den Lichtquellen zu beachten sind: Stabilität der Lichtquelle, Homogenität der räumlichen Lichtverteilung und die ausgestrahlte Lichtart (d.h. relative Spektralverteilung). In diesem Tagungsbeitrag werden unterschiedliche Typen und Arten von Glühlampen betrachtet und auf die genannten Eigenschaften untersucht.

In Zukunft soll in der PTB eine Lichtquelle basierend auf freistrahrenden Hochleistungs-LEDs eingesetzt werden, die für die Kalibrierung über einen großen Dynamikbereich mit Beleuchtungsstärken bis 10 klx oder höher verwendet werden kann. Dazu werden in diesem Beitrag erste Ansätze gezeigt, sowie Vorteile und Herausforderungen der Kalibrierverfahren bei Einsatz solcher LED erörtert.

1 Einleitung

Eine der Hauptaufgaben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) ist die Realisierung der SI-Basiseinheiten. Unter anderem die Länge, die Masse, Zeit und die Lichtstärke. Die Einheit der Lichtstärke wird von der Arbeitsgruppe 4.12 „Lichtstärkeinheit“ dargestellt und bewahrt. Eine davon abgeleitete essenzielle Messgröße ist die photometrische Empfindlichkeit von Detektoren (Photometern). Diese wird für die Weitergabe der Lichtstärke mithilfe von dem Substitutionsverfahren benötigt.

Mit einem Beleuchtungsstärke-Photometer lässt sich mit der photometrischen Empfindlichkeit die Beleuchtungsstärke auf dessen wirksamer Referenzebene bestimmen. Mit dem dazugehörigen Abstand zur Lichtquelle kann daraus über das photometrische Entfernungsgesetz die Lichtstärke ermittelt werden. Die Kalibrierung solcher Photometer ist ebenfalls eine der Aufgaben der Arbeitsgruppe 4.12.

Das reguläre Leistungsangebot der PTB deckt dabei die Kalibrierung von Photometern bei Beleuchtungsstärken von 1 mlx bis 10 klx bezogen auf Glühlampenlicht ab. Die Erzeugung dieser unterschiedlichen Beleuchtungsstärken kann nur mit einer passenden Auswahl von Lichtquellen realisiert werden. Bei einer geeigneten Lichtquelle muss dabei auf einige Aspekte geachtet werden: Stabilität der Lichtquelle, Homogenität der räumlichen Lichtverteilung und die ausgestrahlte Lichtart (d.h. relative Spektralverteilung). In diesem Tagungsbeitrag werden unterschiedliche Typen und Arten von Glühlampen betrachtet und auf die genannten Eigenschaften untersucht sowie ein alternativer Ansatz mittels einer farbigen LED vorgestellt.

2 Grundlagen

2.1 Photometerkopf

Ein Photometerkopf besteht typischerweise aus einer Silizium-Photodiode, welche das auftreffende Licht erfasst und in einen elektrischen Strom umwandelt. Über einen integrierten $V(\lambda)$ -Filter, bestehend aus mehreren Schichten Farbglass, wird dabei die relative spektrale Empfindlichkeit des Detektors an die des menschlichen Auges (eines Normbeobachters) angepasst. Bei manchen Detektoren ist vor dem Filterglas ein diffuses Element (z.B. mattes Glas) angebracht, welches die Winkelabhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit stark reduziert. Weiterhin unterscheiden sich Photometerköpfe mechanisch in der Art der Lichteintrittsöffnung, je nach Verwendung kann damit der mögliche Eintrittswinkel des Photometerkopf sowie die Winkelabhängigkeit der photometrischen Empfindlichkeit angepasst werden. In Abbildung 1 ist schematisch der Aufbau eines Photometerkopfes zu sehen.

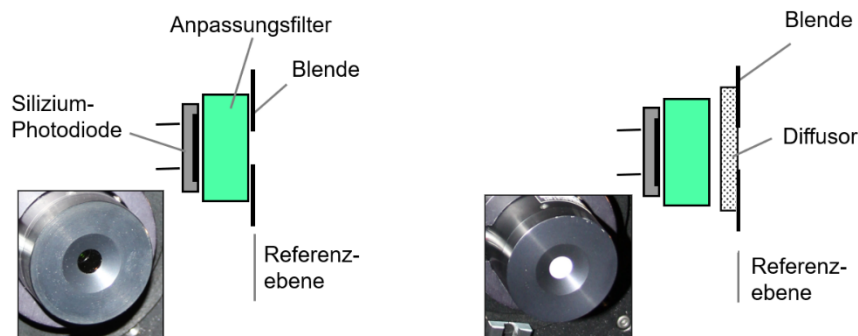


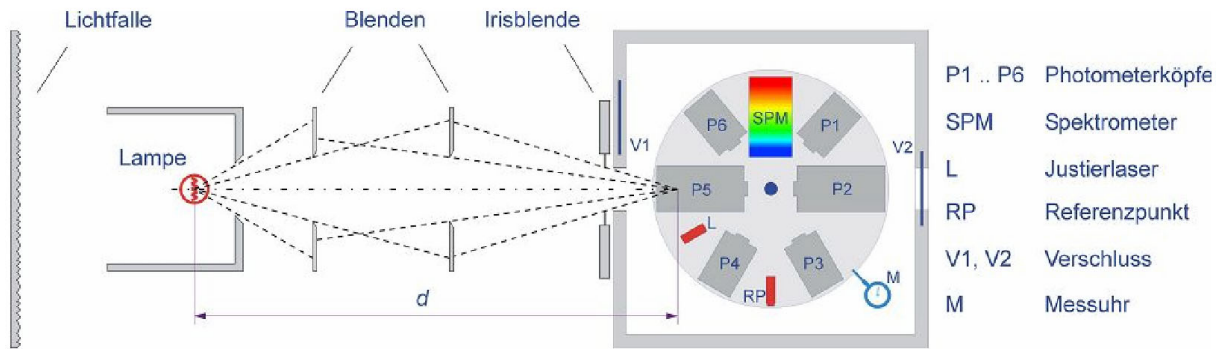
Abbildung 1: Aufbau Photometerkopf^[6]

Die Komponenten eines Photometers sind häufig thermostatisiert, da dadurch die Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur erheblich verringert wird.

2.2 Messaufbau- und verfahren der PTB

In der PTB werden Messungen und Kalibrierung von gerichteten photometrischen Größen am Messplatz Photometerbank durchgeführt. Diese besitzt eine definierte optische Achse, in der Photometer und Lichtquelle ausgerichtet werden können. Durch eine rotierende Platte auf der Empfängerseite können unterschiedliche Photometer nacheinander in diese optische Achse gefahren werden.

Ein wichtiger Aspekt der Photometerbank ist die Möglichkeit, den Abstand d zwischen Empfänger und Lichtquelle variieren zu können, um das Abstandquadratgesetz zwischen der Lichtstärke und der Beleuchtungsstärke zu überprüfen.

Abbildung 2: Messaufbau PTB – Einheit der Lichtstärke^[6]

2.3 Kalibrierung von Photometern

Bei einer Kalibrierung eines Photometers wird i.d.R. mittels Substitutionsverfahren gearbeitet. Dabei wird die wirksame Referenzebene des zu kalibrierenden Photometers und die des Referenzphotometers kurz nacheinander am selben Ort positioniert und der jeweilige Photostrom bzw. die jeweilige Anzeige aufgenommen. Das Referenzphotometer ist dabei auf das nationale Normal der Lichtstärke rückgeführt.

Als Ergebnis der Kalibrierung können unterschiedliche Werte berichtet werden. Es kann eine photometrische Empfindlichkeit in A/lx angegeben werden, die beschreibt, wie viel Photostromstärke pro Beleuchtungsstärke erzeugt wird. Alternativ können auch die Anzeigewerte bei bestimmten Beleuchtungsstärken im Kalibrierschein angegeben werden. Dabei wird meist eine große Spannweite an zu berichtenden Beleuchtungsstärken angefragt, damit in der Anwendung zwischen diesen Werten interpoliert werden kann, um ebenfalls eine photometrische Empfindlichkeit in Skalenteile pro Beleuchtungsstärke für das Gerät zu bestimmen.

Um diese große Spannweite an Beleuchtungsstärken zu erzeugen, werden unterschiedliche Lichtquellen benötigt. Im nächsten Abschnitt werden diese Lichtquellen vorgestellt, und darauf eingegangen, welche Eigenschaften sie haben.

3 Lichtquellen

3.1 Einleitung und Vorstellung der wichtigen Eigenschaften von Lichtquellen

Für die Kalibrierung von Photometern können nur Lichtquellen mit bestimmten Eigenschaften verwendet werden. Diese Eigenschaften werden in diesem Teil vorgestellt.

Die Homogenität der räumlichen Lichtverteilung der Lichtquelle ist eine dieser wichtigen Eigenschaften. Die Lichtquelle muss über eine hinreichend große Fläche, im Bereich von mehreren cm^2 , eine homogene Lichtverteilung ausstrahlen. Bei der Kalibrierung von Photometern gibt es meistens Unterschiede in der Bauform, den Vorsätzen (zur Anpassung der Winkelabhängigkeit) und der Größe der Eintrittsöffnung. Durch eine inhomogene Beleuchtung würden die Photometer mit unterschiedlichen

mittleren Beleuchtungsstärken bestrahlt werden, wodurch das oben genannte Substitutionsverfahren nur bei identischen Photometern anwendbar wäre.

Eine weitere Eigenschaft ist die Stabilität der Lichtquelle. Bei dem Substitutionsverfahren wird das Photometer und das Referenzphotometer nacheinander am selben Ort ausgerichtet und jeweils die Beleuchtungsstärke aufgenommen. Bei instabilen Lichtquellen würde durch diesen kleinen Zeitversatz zwischen den Messungen ein Unterschied im Messergebnis entstehen. Dadurch ist es vor allem wichtig, dass die Lichtquelle zumindest für die Dauer des Transfers eine hohe Stabilität aufweist.

In der Photometrie wird eine Kalibrierung der photometrischen Empfindlichkeit in der Regel auf die Normlichtart A referenziert, deren Spektralverteilung einer Verteilungstemperatur von 2856 K entspricht. Wenn die Verteilungstemperatur T nicht der Normlichtart A entspricht, wird über einen spektralen Korrekturfaktor $F(T) = \left(\frac{T}{T_A}\right)^m$ [7], welcher dem Photometer zugewiesen wird, das absolute Ergebnis korrigiert. Wenn der Lichtquelle keine Verteilungstemperatur zugeordnet werden kann, muss das Ergebnis durch Relativmessungen oder die spektralen Daten auf die Normlichtart A korrigiert werden. Dies ist nicht ohne höheren Aufwand und zusätzlichen Messungen möglich.

Weiterhin ist die Handhabung der Lichtquelle, sowie der benötigte Aufwand beim Betrieb der Lichtquelle ein wichtiger Aspekt. Zum Beispiel wird bei einem aufwändigen Aufbau der Lichtquellen mehr Zeit in Anspruch genommen, die dem Kunden in Rechnung gestellt werden muss.

3.2 Vorstellung der verwendeten Lichtquellen

Im Folgenden werden unterschiedliche Lichtquellen vorgestellt, deren Eckdaten betrachtet und auf die oben benannten Eigenschaften eingegangen. Im Normalfall werden die Lichtquellen mit Gleichstrom und einem konstanten Strom betrieben, die Ausnahme bildet hier der Scheinwerfer, welcher mit 220V Wechselspannung betrieben wird. Das LN3-Normal wird über das dazugehörige Versorgungsgerät betrieben.

3.3 LN3

- Lichtquelle: LN3 – Leuchtdichte-Normal
- Hersteller: LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin
- Verwendete Beleuchtungsstärke: bis ca. 10 lx

Lampen vom Typ LN3 dienen vorwiegend als Leuchtdichte-Normal. Dieses besteht aus einer Ulbricht-Kugel mit einem Durchmesser von ca. 25 cm und einer Streuscheibe als Lichtaustrittsfenster mit einem Durchmesser von etwa 70 mm sowie einer Quarzglas-Halogenglühlampe, die das Innere der Kugel beleuchtet. Über eine interne Regelung mittels der DC-Lampenstromstärke wird die Beleuch-

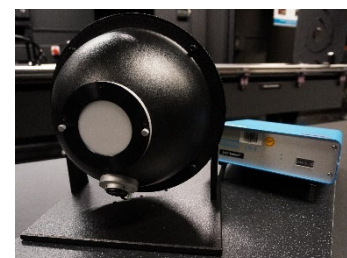


Abbildung 3:
LN3-Normal von LMT

tungsstärke auf der Kugelwand aktiv stabilisiert. Die Ausleuchtung ist durch die Vielfachreflexion in der Ulbrich-Kugel sehr homogen. Die Lampe ist durch die interne Regelung stabil und weist eine mittlere Leuchtdichte in der Größenordnung von 1000 cd/m^2 auf. Mit dem LN3-Leuchtdichtenormal kann an der Photometerbank durch Variation von Abstand sowie Größe (Raumwinkel) der leuchtenden Fläche eine Beleuchtungsstärke zwischen 3 mlx und 10 lx erzeugt werden.

3.4 WI41/G

- Lichtquelle: WI41/G – Lichtstärke-Normallampe
- Hersteller: OSRAM GmbH
- Verwendete Beleuchtungsstärke: bis ca. 50 lx
- Versorgung: etwa 6 A , 31 V ^[1]

Die Lampe vom Typ OSRAM WI41/G ist eine gasgefüllte Glühlampe für wissenschaftliche Zwecke und das meistverwendete Lichtstärke-Normal in der Arbeitsgruppe 4.12. Das Normal besteht aus einem konischen Glaskolben, der eine halbseitige, lichtundurchlässige Maske mit einem Fenster von etwa 8 cm^2 hat. Der Leuchtkörper besteht aus einem Filament das mäanderförmig in einer Ebene angeordnet ist.



Abbildung 4: WI41/G

Eine inhomogene räumliche Lichtverteilung könnte bei Lampen dieses Typen durch Reflexionen im Glaskolben auftreten. Durch das begrenzende Lampenfenster und die konische Form des Kolbens werden diese Reflexionen jedoch vermieden sowie der Einfluss des Lampenhintergrunds begrenzt. Die räumliche Lichtverteilung auf der benötigten Fläche zur Ausleuchtung der zu kalibrierenden Photometer ist homogen. Die Stabilität wird anhand der Lampenspannung überwacht sowie durch regelmäßige Zusatzmessung kontrolliert und ist bei den verwendeten Lampen gegeben. Die Lampen werden bei einer Verteilungstemperatur von 2856 K betrieben, diese Spektralverteilung entspricht näherungsweise der Normlichtart A. Mit der WI41/G kann an der Photometerbank eine Beleuchtungsstärke bis zu 50 lx erreicht werden.

3.5 FEL

- Lichtquelle: FEL – Quarzglas-Halogenglühlampe
- Hersteller: OSRAM GmbH
- Verwendete Beleuchtungsstärke: bis ca. 2000 lx
- Versorgung: etwa $8,5 \text{ A}$, 115 V ^[3]

Die FEL-Lampe ist eine Halogenglühlampe mit einem zylindrischen Quarzglaskolben, der Leuchtkörper besteht aus einer spiralförmig angeordneten Doppelwendel. In der Arbeitsgruppe 4.12 ist diese Lampe jeweils fest in einem Spezialsockel fixiert. Sie wird als Verteilungstemperatur-Normal verwendet sowie für die Erzeugung von Beleuchtungsstärken bis ca. 2000 lx . Die räumliche

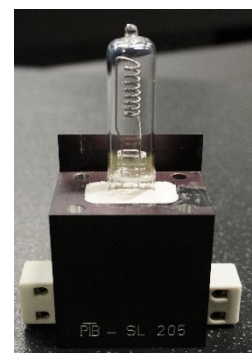


Abbildung 5:
FEL-Lampe mit
Spezialsockel

Lichtverteilung der Lampe ist homogen und die Lichtstärke bleibt für die Messdauer stabil und wird anhand der Lampenspannung und zusätzlichen Messungen überwacht. Für die Erzeugung von hohen Beleuchtungsstärken wird dieser Lampentyp bei einer Verteilungstemperatur von bis zu 3200 K betrieben. Die Ergebnisse können allerdings anhand des spektralen Korrektorexponenten m auf die Normlichtart A korrigiert werden.

3.6 20kW-Lampe

- Lichtquelle: Halogenglühlampe
- Hersteller: OSRAM GmbH
- Verwendete Beleuchtungsstärke: bis ca. 10 klx
- Nennleistung: 20 kW^[2]

Diese Halogenlampe besteht aus einem Glaskolben mit einer in einer Ebene angeordneten Wendel als Leuchtkörper und ist aktuell die in der Arbeitsgruppe 4.12 verwendete Lichtquelle, um Beleuchtungsstärken bis zu 10 klx zu erzeugen. Auch hier ist die räumliche Lichtverteilung in Ausstrahlrichtung homogen. Die Halogenlampe wird in einem aktiv gekühlten Lampenhaus betrieben, trotzdem steigt die Temperatur der Lampe bzw. deren Umgebung stetig. Aus diesem Grund verändert sich die Beleuchtungsstärke nach einiger Zeit im Betrieb. Für die Dauer zwischen Messung von Referenzphotometer und Kalibrierobjekt bleibt die Lampe ausreichend stabil. Für die Messung bei einer Beleuchtungsstärke von 10 klx wird die Lampe mit einer Verteilungstemperatur von ca. 3100 K betrieben, die Ergebnisse müssen somit ebenfalls auf die Normlichtart A korrigiert werden.



Abbildung 6:
20 kW-Lampe

3.7 Scheinwerfer

- Lichtquelle: Scheinwerfer mit Glühlampe
- Hersteller: Jupiterlicht
- Verwendete Beleuchtungsstärke: bis ca. 50 klx
- Versorgung: 220 V, 2000 W

Eine in der Arbeitsgruppe 4.12 eher selten betriebene Lichtquelle ist ein Scheinwerfer basierend auf einer Halogenglühlampe. Mit diesem können Beleuchtungsstärken bis zu 50 klx erzeugt werden.

Der Scheinwerfer hat vor seiner Glühlampe eine optische Stufenlinse, wodurch Photometer aus einem vergrößerten Raumwinkel und etwas inhomogen ausgeleuchtet werden. Der Scheinwerfer erhitzt sich während des Betriebs, wodurch Probleme bei der Stabilität entstehen können. Weiterhin hat der Scheinwerfer eine sehr große Öffnung, sodass man bei Messungen nur große Messabstände wählen kann. Das Leuchtmittel des Scheinwerfers ist eine Glühlampe, wodurch eine Verteilungstemperatur zugeordnet werden kann.



Abbildung 7:
Theater-Scheinwerfer

4 Hochleistungs-LED als Lichtquelle

4.1 Aufbau

In der Arbeitsgruppe 4.12 wird an einer neuen Lichtquelle gearbeitet. Dabei soll die Lichtquelle über eine Hochleistungs-LED vom Typ OSTAR® Projection Power von OSRAM Opto Semiconductors GmbH realisiert werden, welche in Abbildung 8 zu sehen ist. Das untersuchte LED-Modul LE CG P3AQ besteht aus 6 blauen LED Dies, deren Emission durch einen davor angeordneten Konverter-Leuchtstoff hocheffizient in grünes Licht umgewandelt wird. Die Spektralverteilung der Emission hat eine Halbwertsbreite von etwa 100 nm und ähnelt stark dem Verlauf der $V(\lambda)$ -Kurve. Die leuchtende Fläche von 13 mm² ist von einem weißen Rahmen von etwa 1 cm² umgeben^{[5][6]}.

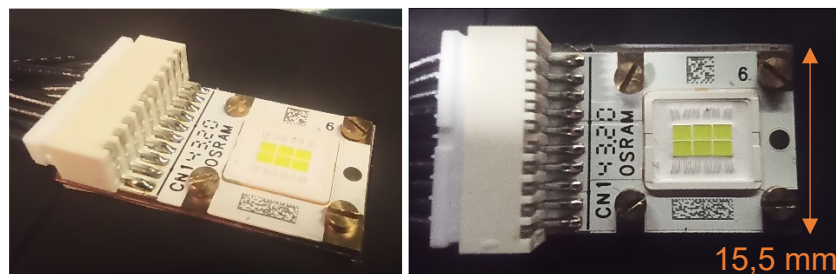


Abbildung 8: Foto der Hochleistungs-LED LE CG P3AQ

Es gibt zwei unterschiedliche Varianten des LED-Moduls. Bei der älteren Variante LE CG P3A 01 sind die Kathoden der einzelnen Dies elektrisch verbunden und die LEDs in zwei Strängen parallel verschaltet. Dabei kann der LED-Chip mit maximal 30 A durchflossen werden, wobei sich eine Betriebsspannung von etwa 3,35 V ergibt. Dieser Aufbau hat einige Nachteile: Die LEDs werden aufgrund der leicht unterschiedlichen Sensitivitäten gegenüber der Betriebstemperatur ggf. nicht mit derselben Stromstärke durchflossen, was zu unterschiedlichen Helligkeiten der LED führen könnte. Zusätzlich stellt die Versorgung ein Problem dar, weil ein Versorgungsgerät für 30 A benötigt wird.

Bei einer neueren Variante LE CG P3AQ sind die Dies in Reihe verschaltet. Dieses löst die benannten Schwierigkeiten. Mit einem Nennstrom von bis zu 10 A und einer Spannung von 21 V lässt sich dieser Typ deutlich einfacher betreiben und z.B. kann das für eine FEL-Lampe verwendete Versorgungsgeräte genutzt werden. Dabei werden alle LEDs mit derselben Stromstärke durchflossen. Aus diesen Gründen werden die weiteren Messungen und Überlegungen mit der neuen Variante durchgeführt.

Für die ersten Messungen wird die LED auf einem einfachen Kühlkörper mit einer aktiven Luftkühlung befestigt. Dieser wird benötigt, da durch die hohe in der LED umgesetzte elektrische Leistung Wärme entsteht und die Effizienz der LED erheblich von deren Temperatur abhängt. Der Kühlkörper wurde auf einem Lampenwagen montiert und die LED auf der Photometerbank ausgerichtet.

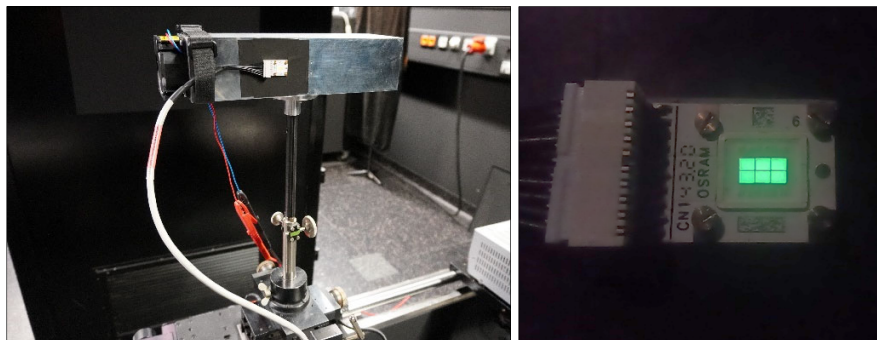


Abbildung 9: Foto von Aufbau und Halterung der Hochleistungs-LED LE CG P3AQ

4.2 Messungen mit der Hochleistungs-LED

Bei der ersten Messung wird schrittweise der Lampenstrom erhöht und die Beleuchtungsstärke betrachtet. Weiterhin wird die Temperatur mit einer Wärmebildkamera überprüft. Der Messabstand beträgt 1,5 m.

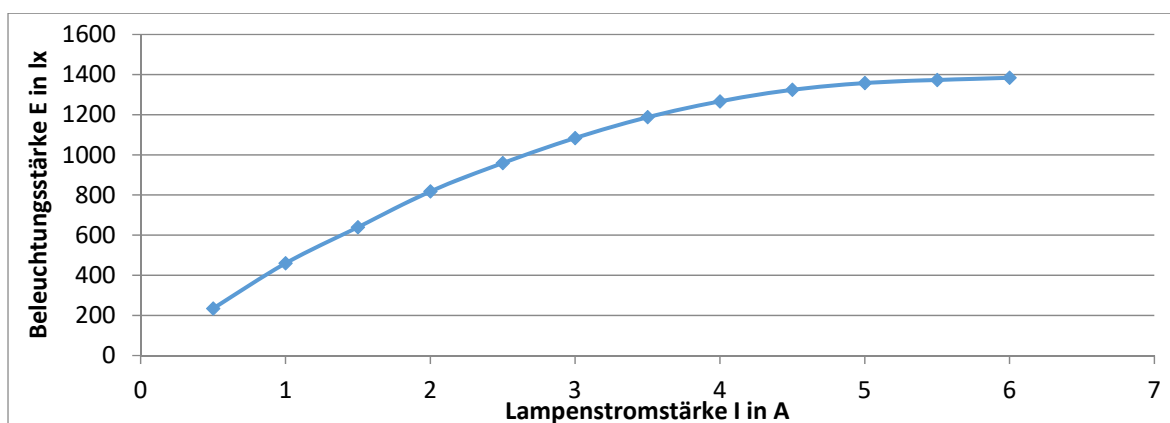


Abbildung 10: Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der Lampenstromstärke

Bei einem Lampenstrom von 6 A wird in einem Abstand von 1,5 m eine Beleuchtungsstärke von 1384,5 lx erreicht. Die Temperatur der LED wurde bei einem Lampenstrom über 6 A zu hoch, daher wurde die Stromstärke an dieser Stelle nicht weiter erhöht. Es ist allerdings zu erkennen, dass die Steigung abnimmt. Das heißt, dass bei einem höheren Lampenstrom die Beleuchtungsstärke nur leicht ansteigt und die Effizienz abnimmt. Bei einer Erhöhung des Lampenstroms von 5,5 A auf 6 A, wird z.B. eine nur um 11,6 lx höhere Beleuchtungsstärke gemessen. Dies kann vorrangig auf die Zunahme der Temperatur zurückgeführt werden welche den Bereich der einstellbaren Lichtstärke auf etwa eine Größenordnung beschränkt.

Bei der nächsten Messung werden die Stabilität und Wiederholbarkeit der Beleuchtungsstärke in einem Abstand von 1,5 m bestimmt. Dazu wird die LED einer Lampenstromstärke von 4,5 A betrieben und es werden mit einem zeitlichen Abstand von ca. 5 Minuten Messwerte aufgenommen. Zudem wird die LED zwischenzeitig zweimal

ausgeschaltet, um zu testen, ob bei einem erneuten Betrieb eine ähnliche Beleuchtungsstärke zu erwarten ist. Um eine stabile Betriebstemperatur zu erreichen, wird die LED vor der ersten Messung jeweils 10 Minuten betrieben.

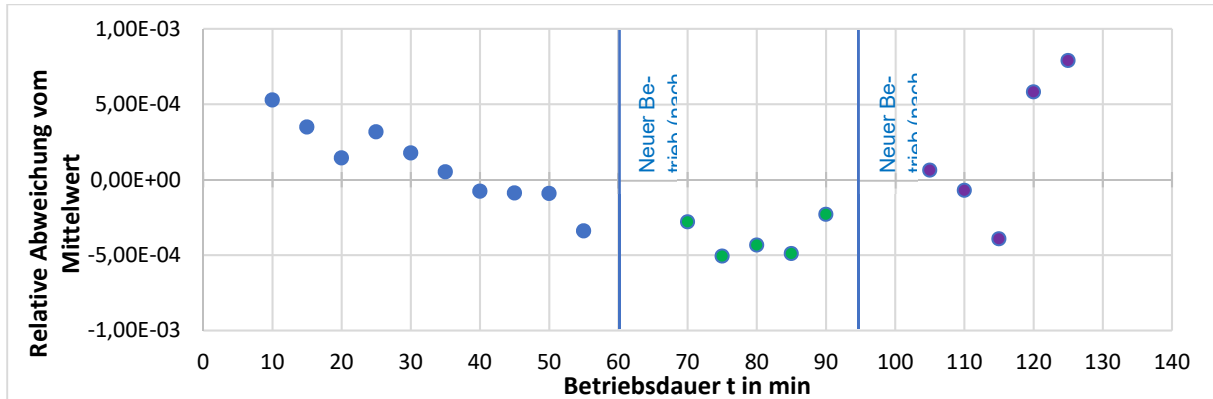


Abbildung 11: Stabilität und Wiederholbarkeit der LED über einen längeren Zeitraum

In Abbildung 11 ist die relative Abweichung zum Mittelwert der Messung zur Ermittlung der Stabilität und Wiederholbarkeit dargestellt. Die LED ist in einem Bereich von unter einem Promille über einen längeren Zeitraum sehr stabil. Selbst bei erneutem Betrieb der LED ergibt sich die Beleuchtungsstärke in einem Bereich eines Promilles. Es ist vorerst keine Alterung durch den Betrieb zu sehen. Über eine Alterung außerhalb des Betriebs kann zu diesem Zeitpunkt noch keine Aussage getroffen werden, dies wäre für den Einsatz im Substitutionsverfahren (statt als Normlampe) jedoch ohnehin kein signifikanter Aspekt. Als Nächstes wird die Beleuchtungsstärke bei unterschiedlichen Abständen gemessen und hinsichtlich dem photometrischen Entfernungsgesetz ausgewertet. Dabei wurde der Arbeitspunkt erneut bei einer Stromstärke von 4,5 A gewählt. Anhand der Betrachtung des Produkts aus Beleuchtungsstärke und Abstandsquadrat können systematische Fehler gegenüber dem photometrischen Entfernungsgesetz aufgezeigt werden.

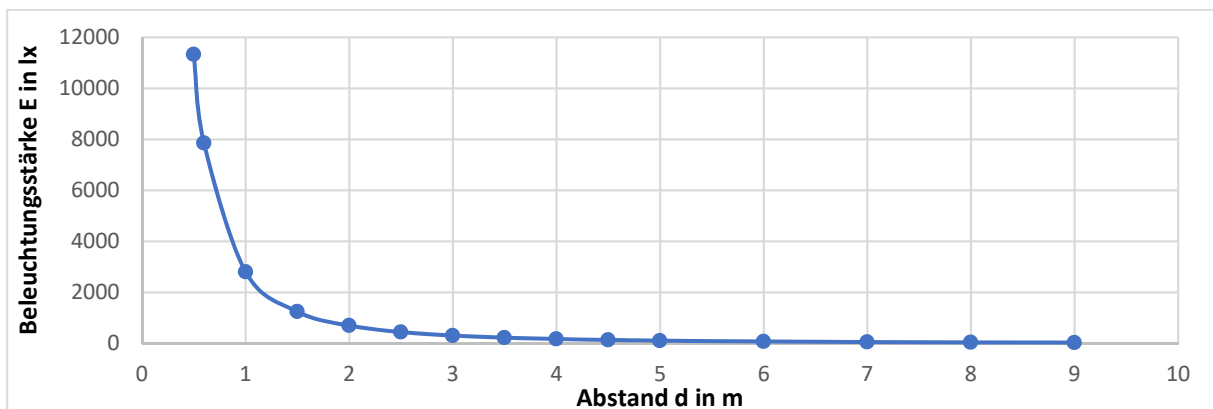


Abbildung 12: Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit vom Abstand

Abbildung 12 zeigt, dass eine Beleuchtungsstärke von über 10 klx bereits in einem Abstand von ca. 0,5 m erreicht werden kann.

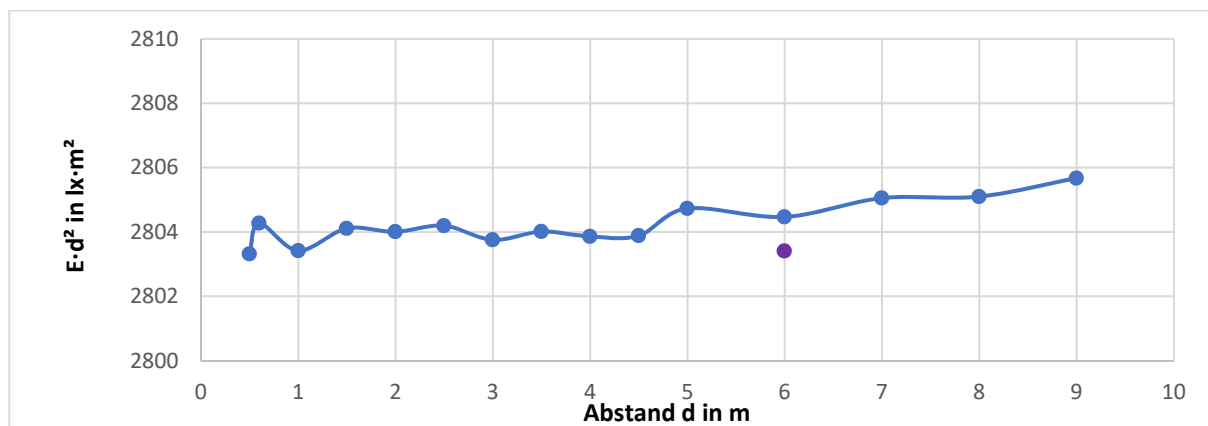


Abbildung 13: $E \cdot d^2$ Abhängigkeit vom Abstand

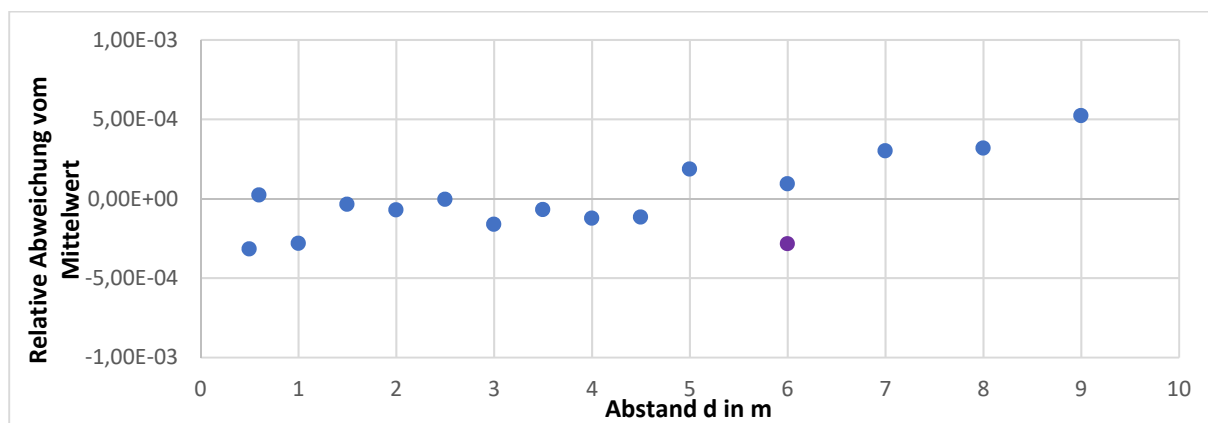


Abbildung 14 : $E \cdot d^2$ relative Abhängigkeit vom Abstand im Vergleich zum Mittelwert

In Abbildung 13 ist die Abhängigkeit des Produkts aus Beleuchtungsstärke und Abstandsquadrat der LED über den Abstand dargestellt. In Abbildung 15 sind die Werte aus Abbildung 14 als relative Abweichung zum Mittelwert über alle Messpunkte dargestellt. Die Werte sind optimal, wenn bei jedem Abstand das gleiche Ergebnis zu sehen ist. Die Abweichung zwischen den Werten liegt in einem Bereich von ca. einem Promille. Damit kann der Lichtquelle eine Lichtstärke-Eigenschaft zugeordnet werden.

Es ist allerdings ist Drift im zeitlichen Verlauf zu beobachten. Der Abstand wurde im Verlauf der Messreihe weiter reduziert, nach dem kleinsten Abstand wurde erneut bei 6 m gemessen (lila Punkt). Dies zeigt, dass die Stabilität die größte Einflussgröße ist, dominierend dafür ist in der gezeigten Messung die Temperaturstabilität, welche sich auch in der LED-Spannung zeigt.

Als letzten Punkt wird das Spektrum der LED betrachtet. In Abbildung 15 ist in blau das gemessene Spektrum der LED zu sehen, dabei wurde für die Messung ein Spektroradiometer BTS256-EF (Hersteller Gigahertz-Optik GmbH) verwendet. Die Messung entspricht dem für die LED spezifizierten Spektrum [5]. Zum Vergleich ist in orange die normierte $V(\lambda)$ -Kurve zu sehen.

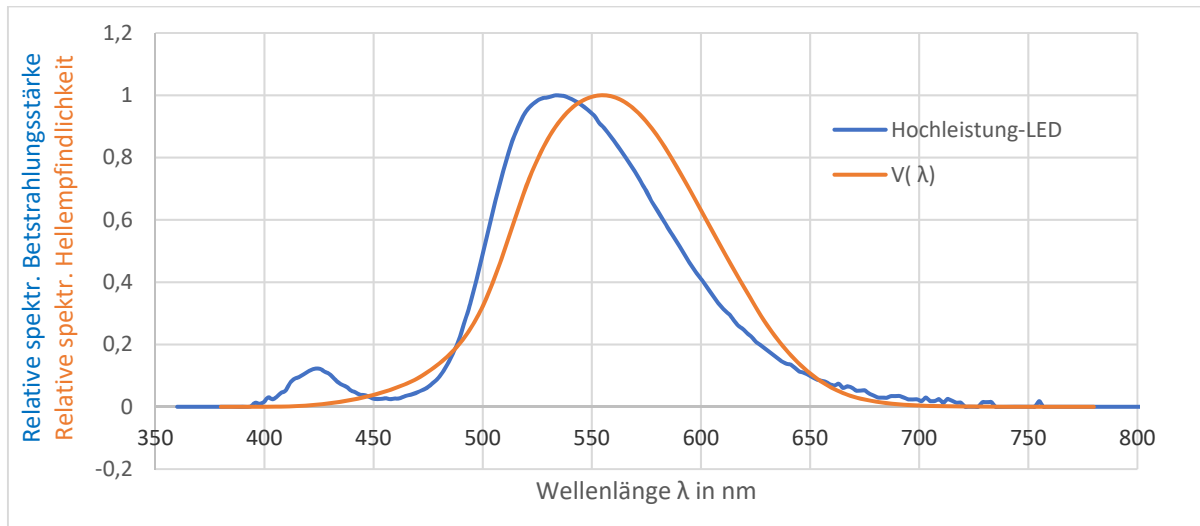


Abbildung 15: Spektrum der Hochleistungs-LED und $V(\lambda)$ -Kurve

Die Emission des grünen Lichtes der LED hat eine Halbwertsbreite von etwa 100 nm und entspricht aufgrund der Nähe zum Maximum der Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ einer hohen Lichtausbeute. Zudem ist die Messung der Beleuchtungsstärke gegenüber einer direkt grünen LED breiteren Spektralverteilung weniger anfällig für monochromatische Effekte oder Interferenzen, z.B. innerhalb des Photometers. Da keine Spektralverteilung entsprechend Normlichtart A oder anderen weißen Lichtarten vorliegt kann diese LED jedoch nur für Relativmessungen bzw. nicht ohne genauere Betrachtung der spektralen Fehlanpassung verwendet werden. Mithilfe von zusätzlichen Messungen und Umrechnungen kann die LED später ggf. dennoch einen entsprechenden Zweck erfüllen.

5 Fazit

In der Arbeitsgruppe 4.12 besteht die Möglichkeit, mit den unterschiedlichsten Lichtquellen einen gewissen Beleuchtungsstärkebereich darzustellen. Der Bereich bis 2000 lx ist durch glühlampenbasierte Normallampen mit allen gewünschten Eigenschaften gut abgedeckt. Bei der Erzeugung von hohen Beleuchtungsstärken treten allerdings vermehrt Herausforderungen auf, die z.B. durch die hohe Abwärme, die elektrische Versorgung beim Betrieb der Lampe oder zusätzliche Optiken entstehen. Um Beleuchtungsstärken bis 10 klx mit weniger Aufwand bereitzustellen oder das

Leistungsangebot für die Kalibrierung von Photometern nach oben zu erweitern, werden alternativen Lichtquellen erprobt. Beispielhaft wurde dafür eine Hochleistungs-LED auf Stabilität, Wiederholbarkeit, Spektrum sowie dem photometrischen Entfernungsgesetz untersucht

Bei der LED-Alternative sind noch Fragen offen und weitere Anpassungen möglich. Zum einen gibt es noch Grenzen bei der Höhe der Beleuchtungsstärke. Die Lichtstärke der Hochleistungs-LED ist zu gering, um bei großen Abständen hohe Beleuchtungsstärken zu erreichen, jedoch werden Unsicherheiten des Abstands (z.B. die Lage der wirksamen Referenzebenen der beiden Photometer) bei kleinen Abständen signifikant und es treten ggf. anderen Schwierigkeiten, wie Streulicht und Rückreflexionen, auf. Die Lichtstärke der Lampe könnte durch eine leistungsfähigere Kühlung, die einen Betrieb bei höheren Stromstärken ermöglicht, sowie durch Vorsatz einer Linse erheblich erhöht werden.

Zudem müssen auch hinsichtlich der relativen Spektralverteilung der grünkonvertierten LED weitere Überlegungen und Messungen erfolgen. Das Substitutionsverfahren ermöglicht in Verbindung mit parallelen Messungen von Glühlampen ein Referenzieren auf Normlichtart A. Bei Verwendung von Abstandsänderungen zur Abdeckung eines großen Bereichs von Beleuchtungsstärken ist dabei allerdings auch die Winkelabhängigkeit berücksichtigten. Ebenso sind mögliche Unterschiede der Nichtlinearität gegenüber der Normlichtart A zu evaluieren, z.B. aufgrund Erwärmung von Komponenten des Photometers.

6 Referenzen

- [1] OSRAM GmbH, Produktdatenblatt WI WI 41/G, 2021
- [2] OSRAM GmbH, Produktdatenblatt 64818 20000 W 230 V, 2023
- [3] OSRAM GmbH, Produktdatenblatt 64743 1000 W 120 V, 19.06.2023
- [4] OSRAM Opto Semiconductors GmbH, OSRAM OSTAR® Projection Power, LE CG P3A 01, 30.06.2020
- [5] OSRAM Opto Semiconductors GmbH, OSRAM OSTAR® Projection Power, LE CG P3AQ, 15.07.2021
- [6] D. Lindner, A. Sperling, Photometer als Transfer-Normale zur Messung von sehr kleinen bis hin zu sehr hohen Beleuchtungsstärken, 2010, Lux Junior, Ilmenau
- [7] CIE 198-SP1.2:2011, Determination of measurement uncertainties in photometry, CIE - Commission internationale de l'Eclairage, Wien/Österreich

Modelling of Lighting in Urban Parks for Investigation of Environmental Impacts

Author Name: Damian Seliga

Author Affiliation: Dionyz Gasparovsky, Roman Dubnicka, Jana Raditschova

Abstract

The urban parks are representing the nature in urban space. Residents visit these parks for the purpose of relaxation, recreation, or free time activities. Urban parks help them with enjoying this time with their content like trees or bushes that provide shade, grass areas, flowers or small animals which take place in these parks. At night, these parks are illuminated and often the lighting can not only illuminate benches or sidewalks, but also the whole trees and other parts of park. Does this light have an environmental impact on the urban park? By modelling the lighting in urban parks, we can simulate situations in which we illuminate directly content of a park, like trees. By creating multiple simulations, we can choose which kind of lights and their light sources, and which kind of overall light system, have a greater or lesser impact on the urban park.

Index Terms: urban parks, obtrusive light, environmental impacts, modelling, simulations

1 Introduction

Obtrusive light, a problem that almost everyone has encountered, even if they haven't directly perceived it. Obtrusive light refers to light that is scattered around without a specific purpose, and its characteristics such as quantity, direction, or spectral composition cause irritation, discomfort, distraction, or impairment of the ability to perceive essential information [1].

To improving and protecting the nighttime environment, it is necessary to limit obtrusive light as it can have physiological and ecological consequences for the surrounding environment, people, and nature [2].

Obtrusive light includes the portion of light that is not used for its intended purpose. Specifically, it refers to light that inappropriately falls outside the illuminated area, light scattered in the vicinity of the lighting fixture, and the brightening of the night sky caused by direct and indirect reflection of radiation scattered by atmospheric



components in the direction of observation. The undesirable effects of disruptive light can be categorized as glare, sky glow, or improperly scattered light.

In nature, disruptive light can cause problems in the nighttime environment and threaten plants and animals. Urban parks, which represent a part of nature within the city, can be influenced by the effects of obtrusive light. The areas of these parks are more affected by obtrusive light than nature outside the city. The brightness of the sky above the city is higher, making it rare to find animals that rely on the starry sky for orientation in urban areas [3].

The habitats of urban parks are not typically rich in species; they tend to be more homogeneous in nature. The majority of the habitat consists of lawns, various types of flowers, and trees. However, several species of birds, insects, and smaller nocturnal animals can nest in parks [4], [5].

Several indicators are used today to assess the effects of obtrusive light. However, in non-expert public discourse, a common argument is often made that lighting should not be directed towards the upper space. It is not always possible to meet this requirement, as it is often necessary to illuminate the surroundings of the object being lit, rather than just the object itself. In urban parks, the focus is primarily on illuminating the pathways that cross the park. However, in some urban parks, we may come across situations where parts of trees are illuminated or even entire tree canopies. In the following chapters, specific situations in the urban park "Medická záhrada" in Bratislava will be presented, including the current state of lighting, simulation of the object under investigation, and potential ways to improve the situation.

2 Lights in „Medicka zahrada“

In Medická záhrada, lights can be considered as historical pieces. The park contains fixtures with globe-shaped diffusers that emit a significant portion of the light flux into the upper space. The examined fixtures are dirty, some parts of the diffusers are damaged, and even selected fixtures lack diffusers altogether. This condition reflects the situation in urban parks in our area. Municipalities and companies responsible for park lighting often only perform maintenance at the level of replacing non-functional light sources. The mentioned used fixtures in Medická záhrada can be observed in Figure 1.



Figure 1 Lights in the medical garden during day and night [6]

In Figure 1, it is also possible to see the mentioned fixture in the nighttime environment. From this image, it is evident that not only the pathways but also parts of the tree canopies are illuminated in the park, indicating that the used fixture emits a significant portion of the light flux into the upper space.

2.1 Impacts of obtrusive light

External artificial lighting is not the only aspect that impacts human life, nor is it the most important one. Other influences such as noise or smog harm humans to a much greater extent, but attention is directed towards obtrusive light due to its visibility. Neglecting disruptive light as a problem is not correct. In a nighttime environment, disruptive light can affect humans, fauna, and flora. With its long-term effects, it can cause certain health issues [7].

2.2 Impact on the nature of the urban parks

Animals in nature, as well as in urban parks, are guided by the alternation of day and night. This characteristic is disrupted by lighting. Certain bird species migrate at night. It happens that under artificial lighting, they circle around buildings at night or alter their life rhythms, singing at night, continuing to feed, or nesting at the wrong time. However, the most affected species is insects. During nighttime hours, insects are attracted to artificial lighting. Around the light source, insects search for food, mates, or places to lay eggs. Due to artificial lighting, insects become easy prey, as they become tired from circling around the light and eventually perish [8], [9].

3 Measurement of obtrusive light

Unintentional scattered light, which becomes obtrusive for humans, can also be observed in the premises of „Medicka zahrada“. *Note: In the following text, only as a medical garden.* In Figure 2, the situation can be observed where the lighting of windows on a building located outside the park boundaries is visible. However, the

measurement of illumination values was only measured on the grounds of the park, so we cannot definitively state the specific illumination values involved [7].



Figure 2 Lights illuminating the windows of an adjacent building [6]

Photometric measurements were conducted in the medical garden on May 10, 2022, after sunset, under clear sky conditions with a nearly full moon, starting at 9:20 PM.

During the measurement, the lighting system was in a steady state, and no changes in intensity or color of the illumination were observed.

The measurements in both locations were conducted at specific points according to the proposed measurement grid. The layout of these measurement grids can be seen in Figure 3 and Figure 4. The red points indicate locations where horizontal illuminance measurements were taken, while the green points represent the positions for vertical illuminance measurements. The points where both measurements were conducted are marked with a combination of green and red colors.



Figure 3 Measured location No. 2, [6]



Figure 4 Measured location No. 1, [6]

In the first location, with a single standalone luminaire, the measurement was conducted at 15 points arranged in the same lines. The first row of measurements was 3 meters away from the luminaire's axis, the second row was aligned with the luminaire's axis, and the third row was also 3 meters away from the luminaire's axis but on the opposite side. Vertical illuminance was measured in the same lines as the horizontal measurements but at distances of 2, 4, and 10 meters from the luminaire's axis towards the adjacent grassy area, at heights of 1 and 2 meters from the ground.

In the second location with four luminaires, the measurement was conducted at 18 points. Within the enclosed area delimited by the luminaires, 9 points were evenly distributed, and horizontal illuminance was measured at these points. In the remaining nine points, also located 2, 4, and 10 meters away from the playground as in the previous case, both horizontal and vertical illuminance were measured.

The necessary quantities were determined through subsequent calculations based on the measured values. The first quantity of interest is the average maintained overall illuminance E_m over the measurement grid area, which was determined using the equation (1).

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (1)$$

Where: E_m - maintained average illuminance, E_i - illuminance at the point, n - number of points

3.1 Measurement results

In Table 1, you can find the results of the measurement of horizontal illuminance in both locations.

Location	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	U_o [-]
1	0,457	0,1	2,2	0,219
2a	3,286	0,56	13,98	0,17
2b	0,884	0,12	3,1	0,136

Table 1 Results of horizontal illuminance measurement

Where: E_m - maintained average illuminance, E_{min} – minimum illuminance at the point, E_{max} – maximum illuminance at the point, U_o – overall uniformity

The obtained values of horizontal illuminance are sufficiently low. When illuminating the children's playground, the average illuminance is higher due to the increased number of luminaires.

If we compare the values of the average sidewalk illumination with a single light fixture to the intensity value during a full moon, which is approximately 0.1 lux, it can be concluded that there is only roughly a fourfold higher intensity with the standalone light fixture.

The maximum illuminance value at the children's playground is interesting. It represents a relatively high value in the urban park area.

Location	E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	U_o [-]
1 - 2 m	1,272	0,18	5,4	0,142
1 - 4 m	0,751	0,15	2,4	0,2
1 - 10 m	0,293	0,2	0,47	0,683
2 - 2 m	4,752	0,43	13,67	0,09
2 - 8 m	1,543	0,48	2,27	0,311
2 - 10 m	0,552	0,37	0,84	0,671

Table 2 Results of vertical illuminance measurement

In the Table 2, it is possible to see the resulting values of vertical illuminances. A rapidly decreasing illuminance value with distance can be observed. Worth mentioning is the measured value at the children's playground, two meters away from the light fixture. The maximum value of 13.67 lux may cause disturbing effects for humans.

4 Modelling of urban park

The urban park, Medical garden, was subsequently simulated in the lighting simulation program Dialux after a successful measurement. The park was created in the software at a scale of 1:1.

The construction of Medická záhrada was based on satellite images, aerial shots, cadastral records, as well as on-site measurements and personal photographic documentation of the park.

The simulated model includes selected light fixtures, trees, selected plants, buildings, and roads. In order to reduce the system load during calculations, certain details such as sidewalk curbs or specific types of flowers and plants are not included in the simulated model.

The following images show the final model of the park in Dialux software.

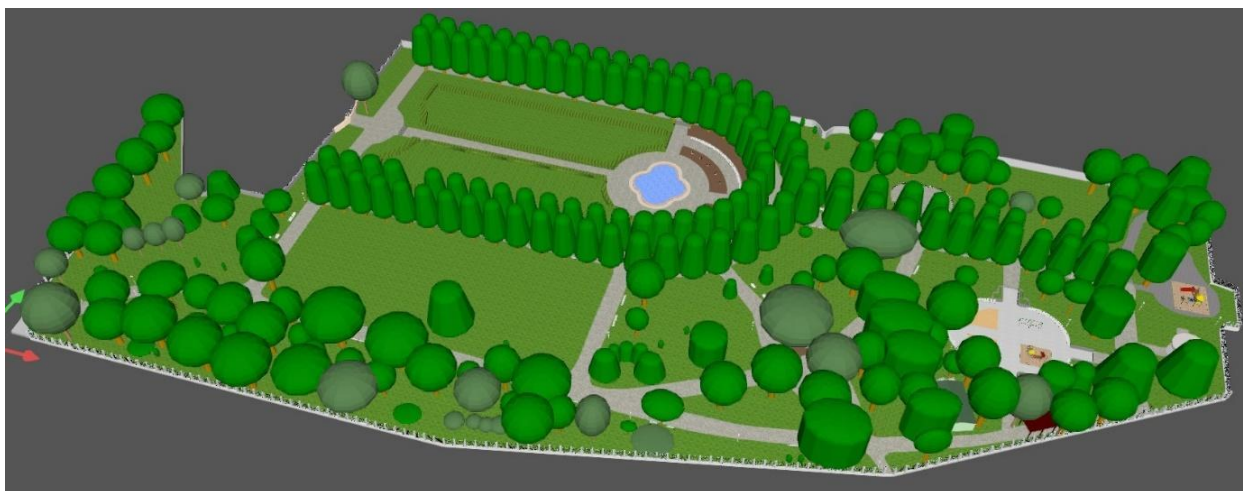


Figure 5 Model of the medical garden, view from the south



Figure 6 Model of the medical garden, view from the north

In the examined medical garden, there are 41 light fixtures installed on white poles. In the simulated model, the selected light fixtures are positioned in the same locations as in reality. The height of the light fixtures is chosen so that the light

source is at a height of 2.5 meters above the ground. Due to illuminating small areas of sidewalks in parks, the light fixtures do not require higher placement. Furthermore, above these sidewalks, tree canopies are often present, making it difficult and unnecessary to install light fixtures within them.

The proposed design of the medical garden includes four types of light fixtures, and the results of their illumination were compared. The selected light fixtures were:

- Schröder Altra with a compact fluorescent lamp, power of 36 W, and a luminous flux of 2900 lm.
- Schröder Zafír with a sodium discharge lamp, power of 50 W, and a luminous flux of 3600 lm.
- Schröder ZYLINDO 5103 with an LED light source, power of 25.8 W, and a luminous flux of 3439 lm.
- RZB Leuchten basic ball with an LED light source, power of 36.5 W, and a luminous flux of 3900 lm.

Examples of selected light sources and their construction, along with the luminous intensity curve, can be seen in the following images.



Figure 7 Schröder Altra

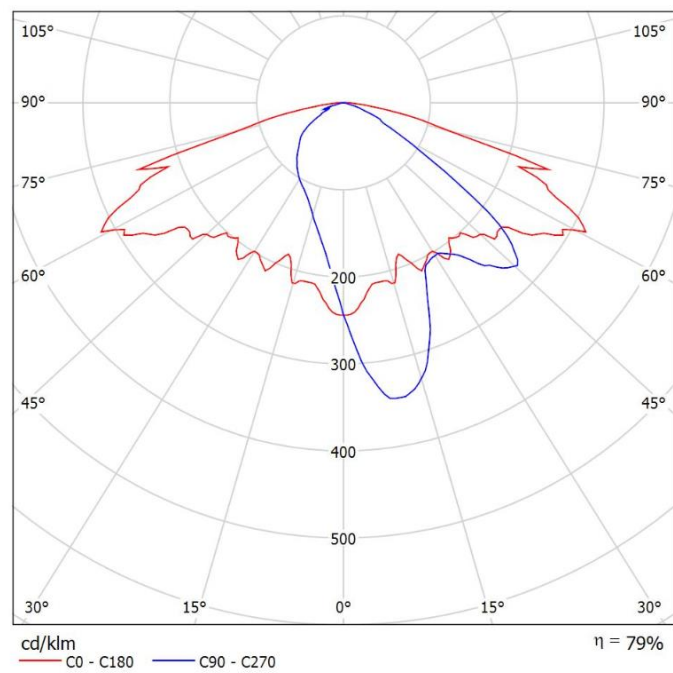


Figure 8 Luminous intensity curve of the Schröder Altra luminaire



Figure 9 Schröder Zafir

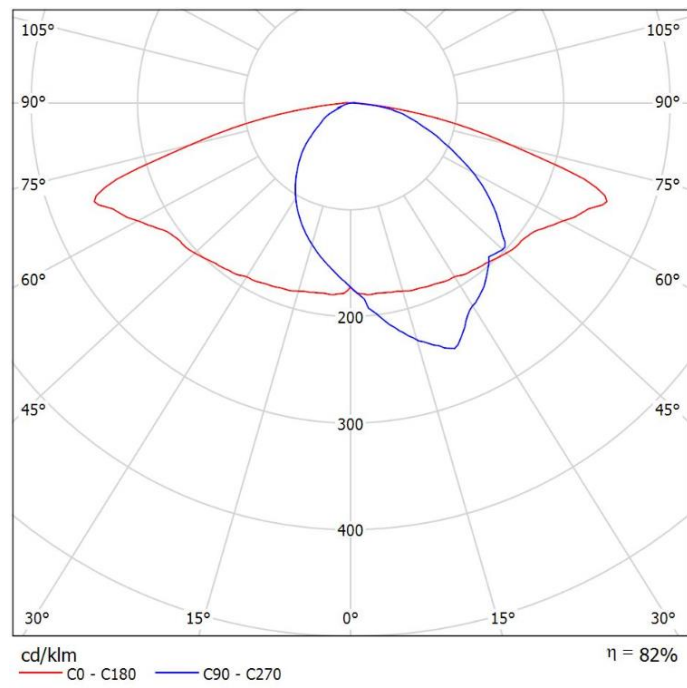


Figure 10 Luminous intensity curve of the Schröder Zafir luminaire



Figure 11 Schröder ZYLINDO

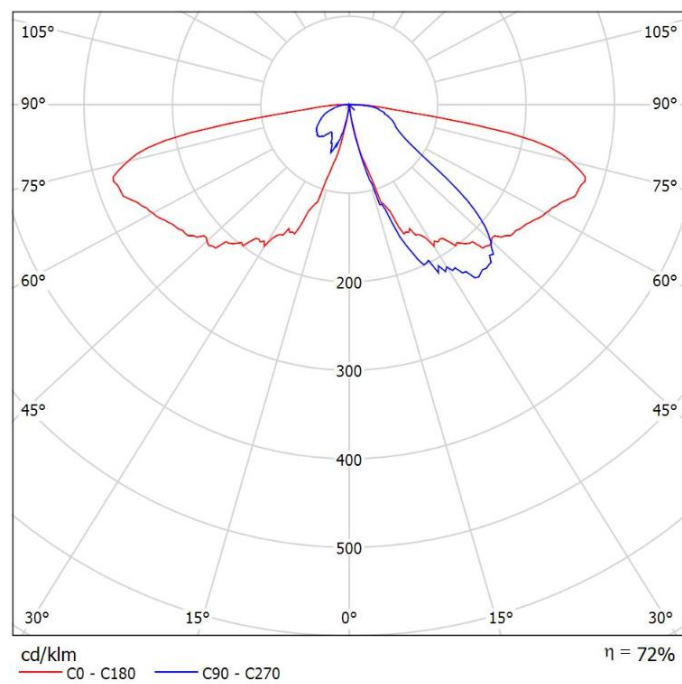


Figure 12 Luminous intensity curve of the Schröder ZYLINDO luminaire



Figure 13 RZB Leuchten basic ball

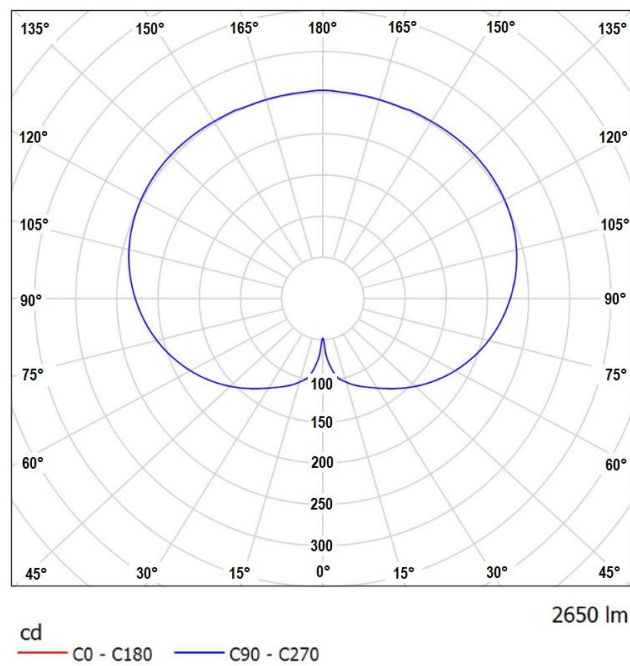


Figure 14 Luminous intensity curve of the RZB Leuchten basic ball luminaire

The light sources of the selected light fixtures are each of a different type to compare their suitability for placement in the urban park area. The last light fixture is equipped with a spherical diffuser, highlighting the generation of disruptive light at higher ULR (Unified Glare Rating).

4.1 Results of simulation

The resulting average illumination intensities obtained through simulation in the entire park can be found in Table 7. For better clarity, the values are presented in a concise table format rather than as program outputs from Dialux.

In addition to the overall illumination intensity, the areas used in physical measurements were also subject to simulation. Visualizations of the simulated areas can be seen in the following images.

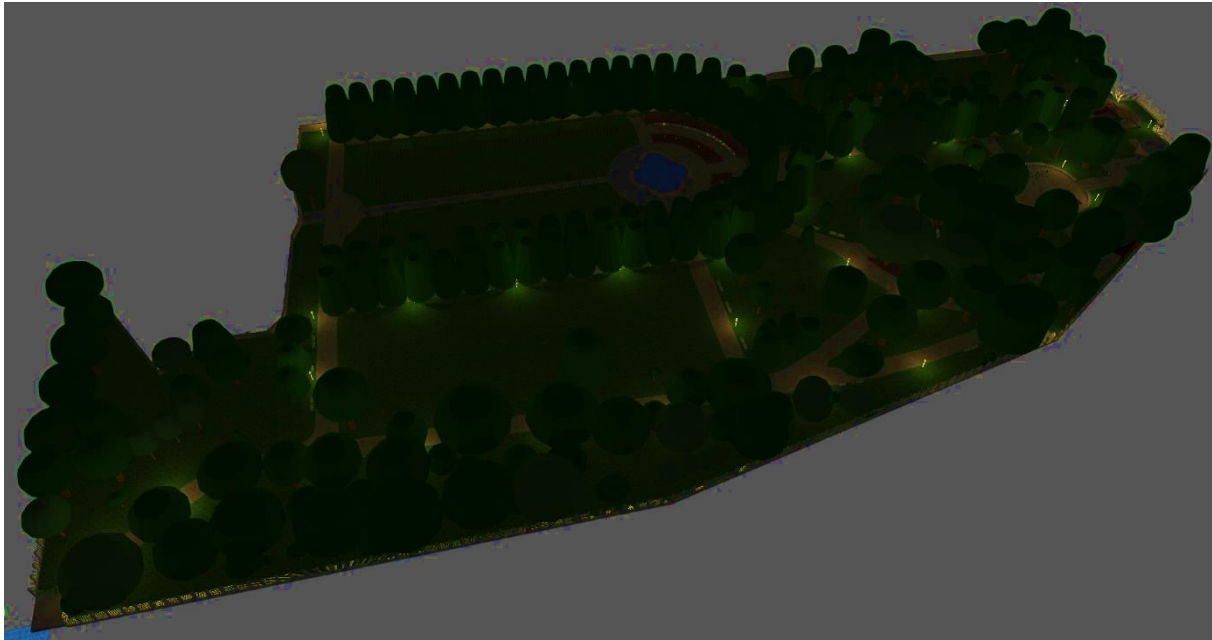


Figure 15 Model of the medical garden with spherical luminaires in the dark [6].



Figure 16 The first measured area displayed in the Dialux software, [6].



Figure 17 The second measured area displayed in the Dialux software [6].

The aim of this work is not to compare the current state but to determine which light fixtures would be suitable for replacing the existing ones in the medical garden. Therefore, the light fixtures with a spherical diffuser do not match the parameters of the light fixtures currently installed in the medical garden. The parameters of real light fixtures are subject to degradation due to environmental factors, pollution, and aging. The resulting values of horizontal illumination intensity for each simulated light fixture can be found in Table 3.

Location		Schröder Altra	Schröder Zafir	Schreder Zylindo	RZB Leuchten ball
1	E_m [lx]	10,5	23,7	7,06	5,2
	E_{max} [lx]	118	245	62,4	35,7
	U_o [-]	0,002	0,003	0,002	0,037
2a	E_m [lx]	5,87	13,7	7,06	3,65
	E_{max} [lx]	75,4	145	62,4	19,2
	U_o [-]	0,003	0,005	0,002	0,003
2b	E_m [lx]	1,78	5,76	3,04	1,77
	E_{max} [lx]	16,5	36,9	18,5	8,24
	U_o [-]	0,079	0,16	0,072	0,023

Table 3 Simulated values of horizontal illuminance for individual surfaces.

The resulting values of horizontal illuminance are lowest for the spherical light fixture, where the majority of the luminous flux is directed towards the upper hemisphere. Among the downward-oriented light fixtures, the lowest intensity is observed with the LED source. In clear Table 4, you can find the resulting values of average vertical illuminance for the simulated models at various distances from the light fixture axis.

Location	Schröder Altra	Schröder Zafir	Schröder Zylindo	RZB Leuchten ball
1 - 2 m	10,8	18,22	16,12	7,67
1 - 4 m	3,1	5,28	5,77	3,81
1 - 10 m	0,43	0,97	1,13	1,54
2 - 2 m	16,5	29,52	21,21	23,82
2 - 4 m	3,84	8,26	7,2	10,24
2 - 10 m	0,76	0,99	0,99	3,09

Table 4 Simulated values of vertical illuminance for individual surfaces.

When comparing the resulting vertical values, it is possible to observe a decrease in the level of illumination intensity with increasing distance from the light fixture. Among the three simulated light fixtures, the one with a compact fluorescent lamp appears to be the most suitable for use in the urban park. This is because it illuminates only a short distance, and its color distribution is suitable for nighttime environments. The selected light fixture with a sodium discharge lamp would be suitable for use in the urban park if it were placed at a higher height than 2.5 meters.

With the LED spherical light fixture, the values of vertical illuminance decrease at a slower rate with increasing distance from the fixture. Among all the simulated models, the spherical light fixture performs the worst in terms of vertical illuminance. While aesthetically suitable for an urban park, it is not an ideal light source in terms of light pollution in today's standards. The resulting values from all the simulations are several times higher compared to the actual state. This could be due to the aging and contamination of the real light fixtures, as well as the specific type of light fixture used in reality. In the park, there are light fixtures with a spherical diffuser, whose exact technical condition has not been determined, and the reflectivity values of surfaces have not been measured. The low mounting height of the light fixtures also contributes to the high values of illuminance.

5 Conclusion

The measured values of the used luminaires in the medical garden comply with legislative requirements. However, the measurements revealed that a significant portion of the luminous flux is directed towards the upper half-space, which can affect the habitat of the urban park and contribute to the creation of intrusive light. The simulation helps to find a suitable solution to replace the currently used spherical luminaires. The simulation results showed that luminaires with predominantly downward light distribution are suitable for illuminating the urban park if the goal is to minimize vertical illuminance. By using luminaires that predominantly direct the light downwards, we can avoid illuminating the crowns of trees or windows of adjacent buildings. The use of spherical luminaires was often common in the past, but

nowadays we have better and more suitable alternatives. However, the question arises regarding the future. Do we want to primarily illuminate only the pathways in parks or visually enhance the surrounding nighttime environment of the urban park? One thing is clear, we need and must have lighting.

6 References

- [1] “STN EN 12665 (360070), Svetlo a osvetlenie, Základné termíny a kritériá na stanovenie požiadaviek na osvetlenie”. 2021.
- [2] “STN EN 12464-2 (360074), Svetlo a osvetlenie, Osvetlenie pracovísk, Časť 2: Vonkajšie pracoviská”. 2015.
- [3] “NARIADENIE KOMISIE (ES) č. 245/2009 z 18. marca 2009, ktorým sa vykonáva smernica Európskeho parlamentu a Rady 2005/32/ES v súvislosti s požiadavkami na ekodizajn žiariviek bez zabudovaného predradníka, výbojok s vysokou svietivosťou a predradníkov a svietidiel, ktoré sú schopné ovládať takéto svetelné zdroje, a ktorým sa ruší smernica Európskeho parlamentu a Rady 2000/55/ES”. 2009.
- [4] R. Jambor, “Vtáky v meste”, 2018. <http://ornitolog.sk/blog/?id=9p3l7gz6>
- [5] Z. Lososová a J. Danihelka, “Proč je flóra velkoměst pestrá”, č. 6/2014, s. 278–281, 2014.
- [6] D. Šeliga, *Rušivé svetlo v mestskom prostredí, bachelor thesis*. 2022.
- [7] *CIE 150 - Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations*. 2017.
- [8] P. Rapavý a P. Begeni, “Monitoring Jasu nočnej oblohy”, *Tvorivý učiteľ fyziky V, Smolenice*, s. 15–18, 2012.
- [9] V. Sedlák a L. Mihoková, “Svetelné znečistenie v krajine”, *Životné prostredie*, s. 195–207, 2020.

Auswertung der zeitliche Lichtmodulation unter Verwendung von bildauflösenden Messgeräten

Annika Stein, Philipp Wiswesser, Johannes Ledig

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Zusammenfassung

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

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

1 Einleitung

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

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



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

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

2 Zeitliche Lichtmodulation und -artefakte

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

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

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

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

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

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

3 Metriken der TLM und TLA

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

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

Mit A = maximaler Wert

B = minimaler Wert

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

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

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

Mit A_1 = Fläche des Signals oberhalb des Mittelwerts

A_2 = Fläche des Signals unterhalb des Mittelwerts

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

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

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

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

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

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

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

T_i = Schwellenwert der Wahrnehmung

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

4 TLM Messungen mit bildauflösenden RGB Hochgeschwindigkeitskamera

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

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

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



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

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

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

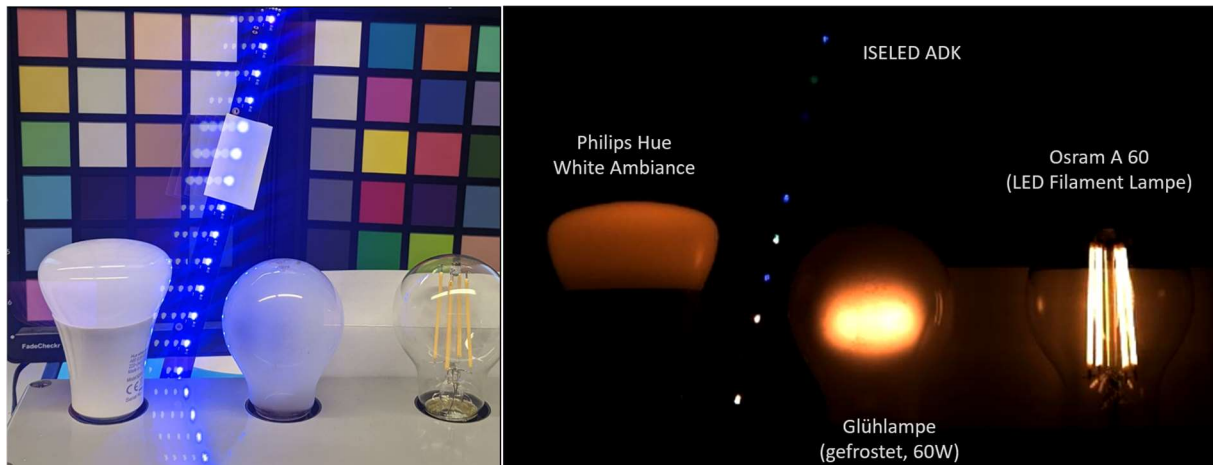


Abbildung 2: Foto der Szene , links mit eingeschalteter Raumbelichtung und Tageslichtanteil (E27-Lampen ausgeschaltet), rechts Bildausschnitt aus der mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Bildsequenz mit Beschriftung.

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

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

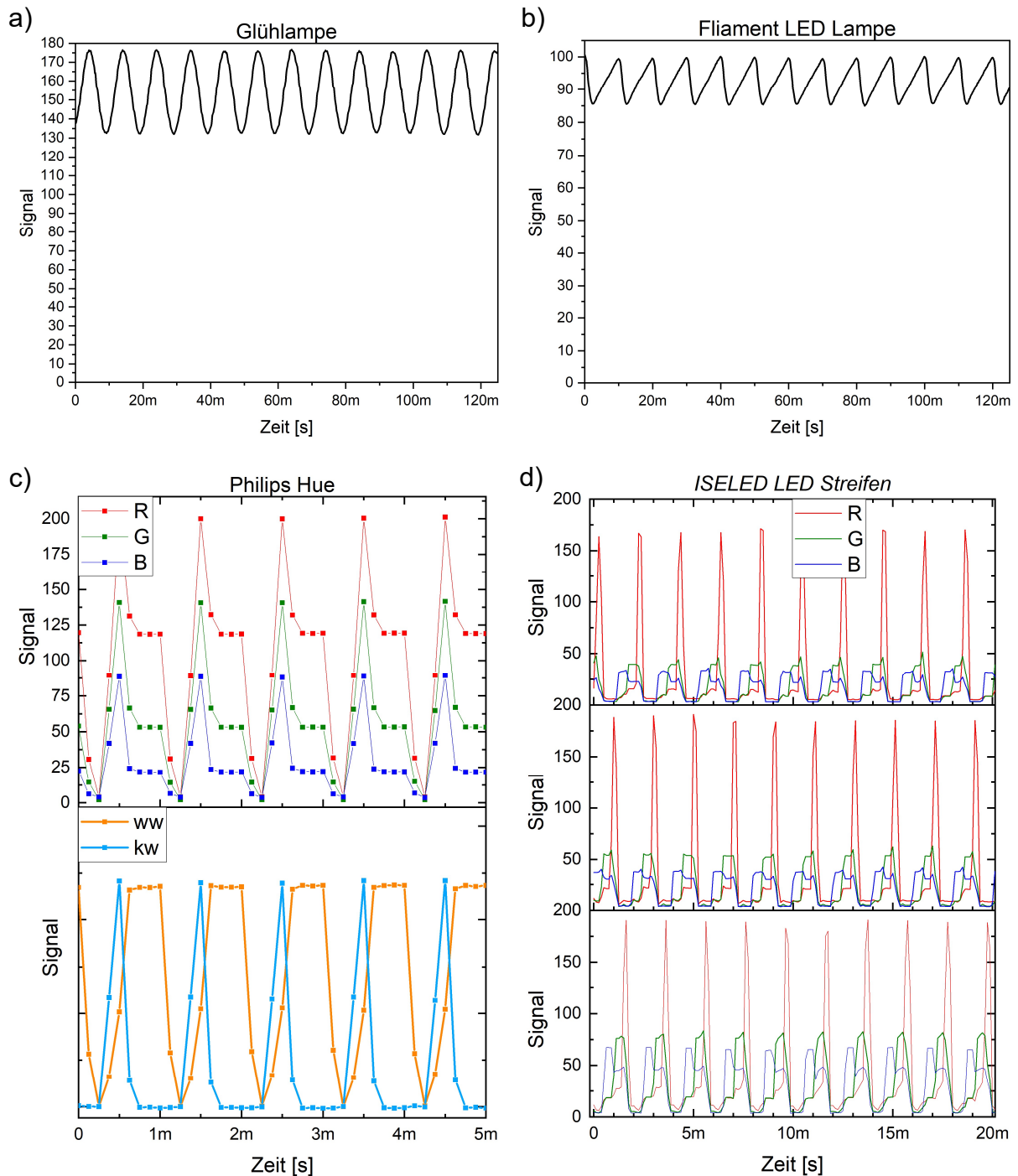


Abbildung 3: zeitlicher Verlauf der aus der Bildsequenz extrahierten Signalverläufe der Pixelwerte einer Auswerteregion entsprechend der Lichtmodulationen der verwendeten Lampen, a) Glühlampe, b) Filament Lampe, c) Philips Hue (oben Farbkanäle der Kamera sowie unten Zerlegung in Farbkanäle der Lampe),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

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

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

5 References

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

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

Evaluating colour Preference by using Multidimensional Approaches

Mark Suppelt, Julian Klages, Paul Myland, Prof. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Abstract

Colour preference is a key factor in the design and evaluation of lighting systems, particularly with the emergence of multichannel LED systems which allow for greater control over the spectrum of light emitted and therefore the colour appearance of the illuminated objects. To more accurately and objectively measure colour preference, there has been a growing interest in the development of multidimensional evaluation algorithms that consider multiple dimensions of colour rendering, such as chroma and hue shift. The purpose of this study was to compare and evaluate the performance of different multidimensional evaluation algorithms for colour preference in lighting applications. Using computer-generated images of a coloured object displayed on a computer monitor under a fixed white point, we simulated the colour shifts of the object under different light sources and test subjects evaluated the results using a range of multidimensional methods. Our analysis revealed that there are significant differences in the performance of these algorithms, with some providing more accurate and reliable measures of colour preference than others. Considering all relevant criteria, genetic algorithms seem to provide the most promising approach, as they lead to a result quickly and reliably. These findings have important implications for the selection and use of multidimensional algorithms for evaluating colour preference in lighting, particularly in the context of multichannel LED systems, and can inform future research in this area.

Index Terms: Lighting, Psychophysics, Colour preference

1 Introduction

Modern lighting systems - often referred to as 'smart lighting' - increasingly offer the ability to control several individually, addressable, coloured LED channels to mix white lighting. Consequently, this mixing of multiple LEDs leads to differences in white point and colour appearance of illuminated objects. However, many people lack the equipment or experience to quickly set the lighting scene to a preferred state. The main objective of this work is to determine the most optimal approach to achieve one's preference. For this reason, several psychophysical models will be tested and



compared against each other. These models should offer a quick and most importantly repeatable methodology to assess a lighting scene.

The focus lies in establishing ideal methods, which work with multiple parameters. To be more precise, an image will be modified to change its hue and chroma values. Hue refers to the degree in which the stimulus can be described by red, green, blue, or yellow and it is specified by an angle around the achromatic white point in a colour space. Chroma is closely related to the saturation of a colour. It is described by Mark D. Fairchild as the “colorfulness of a stimulus relative to the brightness of a stimulus that appears white under similar viewing conditions” [1]. While colours, which are less saturated, also appear darker, a change in chroma does not affect the perceived brightness of said colour. It is specified by a radius or distance to the achromatic white point in a colour space. Modifying the images digitally has the benefit that apart from being simpler and more consistent, it allows for much finer control. Four methods and one control method, which are able to alter these values, are tested. The methods will be referred to as *Staircase*, *1D-Gauss*, *2D-Gauss*, *Genetic* as well as *Reference* respectively and are thoroughly detailed in section 2.2.

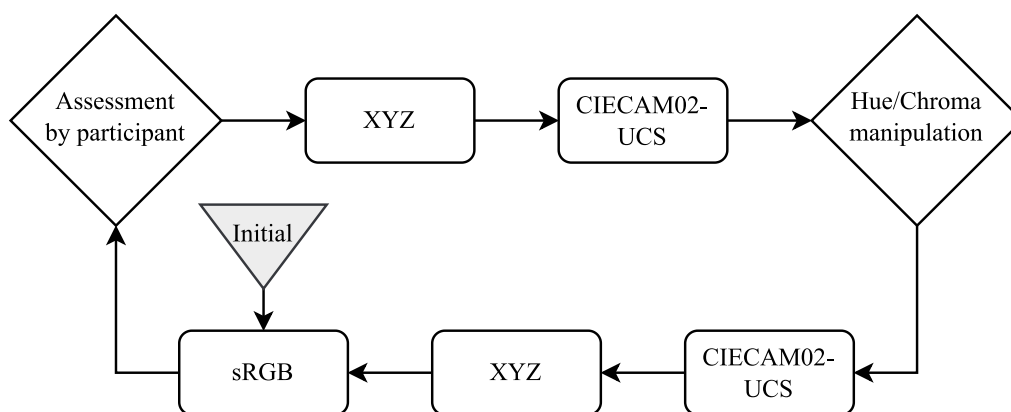


Figure 1-1 A typical workflow for the transformation and manipulation of the image

Most of the image manipulation is done using the python package ‘LuxPy’ [2]. A sRGB image, specifically of a red rose, is transformed into the CIECAM02-UCS format, where subsequently the Jab Coordinates for each pixel can be transformed to

$$Chroma = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$Hue = \arctan\left(\frac{b}{a}\right).$$

In the following sections the chroma and hue values of each pixel will be modified to change the appearance of the reference image. The Values are modified by either multiplication or addition/subtraction.

$$Chroma_{new} = Chroma \cdot Mod_{Chroma}$$

$$Hue_{new} = Hue + Mod_{Hue}$$

Mod_{Chroma} as well as Mod_{Hue} will be referred to as their corresponding modifiers. A typical workflow of the manipulation of images during the experiment can be seen in Figure 1-1. The image of a red rose (visible in Figure 2-1) has specifically been chosen since red is especially common in skin tones. For this reason, it has great influence on the appeal of a scene. [3]

1.1 Related work

Using human perception as a metric, mainly utilized in the field of psychophysics or psychometrics, allows for a range of methods to be used. Typical methods, like the method of limits, of constant stimuli or of adjustment, focus on detecting the thresholds of Perception. They are often used to detect the minimal auditory or visual thresholds but may suffer from anticipation bias and can be time consuming. For this reason usually adaptive psychophysical methods, most notably the Staircase method, are realized [4]. The Staircase method tries to approach a threshold value by incrementally stepping towards it and changing direction if it overshoots the threshold. Moreover, more complex methods like the PEST or Maximum-Likelihood-Methods do exist [5]. These improve the Staircase method by either adjusting the step size after each change in direction or carrying over information between trial runs. Additionally, H. Levitt suggests “Transformed Up-Down Methods” [6], which try to account for stimuli adaptation by e.g. requiring several negative responses before changing direction. However, most of these algorithms only optimize for one parameter at a time, while this study tries to find the ideal value and resulting combination for at least two parameters at the same time.

Another relevant method is scoring a selection of objects. In a study by Khanh *et al.* [7] a number of objects are compared with each other under different lighting scenarios. The participants are required to score them on a range of 0-100 for each different light source. This has the benefit of being able to directly compare different results or algorithms but suffers from effects like adaptation. One way to optimise the scene by using those scores is a genetic algorithm, which has already been comparably used by Newsham, G.R *et al.* [8]. The study tries to determine the preferred surface luminances in offices by creating randomized images and then optimising them similarly to an evolutionary process. A possible implementation is later discussed in section 2.2.3.

No forced-choice methods, described for example by Shelton, B. R. and Scarrow, I. [9], have been selected since this study's aim is to find a pre-emptive selection of useful algorithms for possible future studies. Forced-choice methods provide a selection of options and force the participant to pick one of them. Future studies are expected to be real-world applications of lighting scenes and not just virtual images. This would most likely rule out the possibility of showing a selection of scenes simultaneously and thus renders this type of algorithm inconsequential in this case.

2 Methods

A total of 28 participants have taken part in the experiment. All of which have been asked to provide general information like their age, sex, and if they have impaired vision, made apparent through the need for glasses or even colour blindness. Additionally, since a large pool of the participants have previous experience and technical ability in this field, they have been asked to disclose whether they consider themselves knowledgeable about this field. The results of these questions can be seen in Table 6-1. All the participants were required to find their preferred hue and chroma combination using several distinct methods, further detailed in section 2.2. Directly after the testing of each method, the participants have been asked to score the intuitiveness of said method in a range of 1–9 with 9 being the best possible score. Intuitiveness is meant to be a measure of ease of use or understandability.

2.1 Setup

The experiment takes place in an isolated room. The window as well as the entrance is covered by cloth to block any outside influences. The participant is placed in front of a monitor and has access to a controller. The monitor Color Edge CG277 (EIZO, Hakusan, Japan) has specifically been chosen for its colour accuracy and ability for self-calibration. The room is lit by two SkyPanel S60-C (ARRI, Munich, Germany) lights, placed behind the participant. Both have been modified to house an additional cyan channel for increased colour accuracy.



Figure 2-1 POV of the participant.

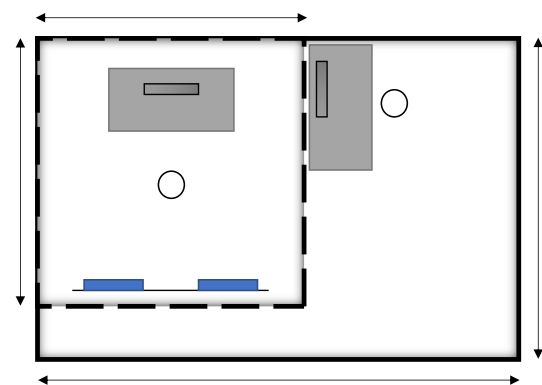


Figure 2-2 Schematic of the experimental setup.

All the surfaces in front of the participant as well as the monitor have been calibrated to be as close to the target visible in Table 6-3. Afterwards, the surfaces have also been measured by a spectroradiometer CS-2000 (Konica Minolta, Chiyoda, Japan) to validate them. The goal is to align the back- and foreground as much as possible to negate any other effects. The participants should ideally experience a homogeneous and reproducible state of adaptation. Special care has to be taken to reduce any outside influences since it could affect the models in a non-linear way [10]. A

representative point of view can be seen in Figure 2-1. The participant is able to provide input via an Xbox Series One controller modified with an added keyboard. A schematic of the test room can be seen in Figure 2-2. The participant is in a secluded and covered area of the room as not to disturb the experiment, while the researcher is placed outside to control the experiment and to provide guidance. To guarantee no bleeding effect of external light, all other light sources in the room are shut off. The researcher reads from a prewritten script as not to influence the participants needlessly but is allowed to answer questions if they arise.

2.2 Algorithms

Several different methods have been selected to be compared against each other. All these methods, apart from *Reference*, are evaluated in a random order for each individual participant to negate any influence in between them. Before starting the experiment, a selection of the entire range images could be modified by is shown as a baseline or anchoring point. Figure 2-3 shows the entire process each participant must absolve.

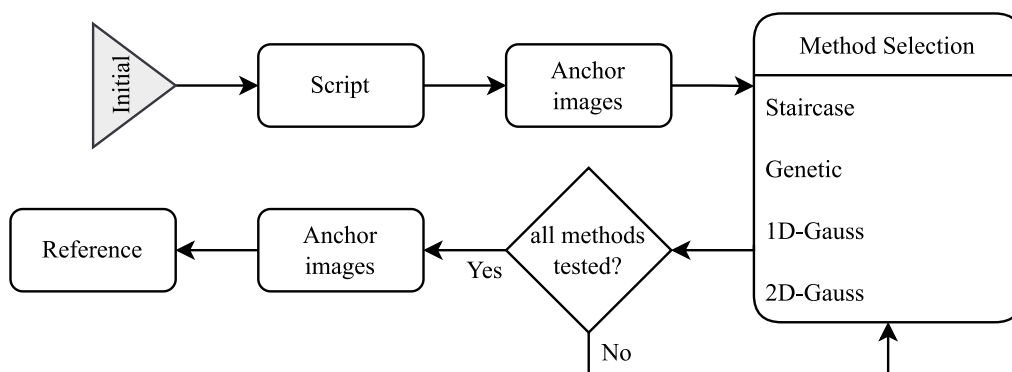


Figure 2-3 A flowchart of the procedure for each participant. Keep in mind that all methods apart from *Reference* are selected randomly.

2.2.1 Staircase

One of these methods is the so-called *Staircase* method. To be more precise the method closely resembles that of A. Pentland [11], which he calls “the best pest”, but it has been modified to allow for at least two parameters. The participant will be asked to compare a given image to the previous one. If it is better, the participant should press ‘1’, but if it is worse then ‘0’. The first image to be shown is the original image. Every time the participant approves of the new image the next one will have a modified hue or chroma value. The basic step size for Mod_{Chroma} and Mod_{Hue} are 8% and 4° respectively. However, each time the participants dislikes the new image the direction of change swaps and additionally, it halves in value i.e., instead of increasing the chroma value by 8% it is decreased 4% after the first direction change. This should limit the amount of overshooting the ideal value. After three direction changes the

parameter is swapped, hence both the hue and chroma values are modified in an alternating manner. In total, both parameters are measured three times each, so that influences between the two parameters can be negated. However, the base image after each parameter swap is adjusted by the mean value of the direction changes. Let us suppose the participant pressed '0' for the chroma modifiers 1.2, 1.1 and 1.5, leading to a new base image for the next hue measurement with its chroma multiplied by $\frac{1}{3}(1.2 + 1.1 + 1.15) = 1.15$. The hue modifier is similarly carried over into the next measurement.

2.2.2 1D/2D-Gauss

The next two methods, *1D-Gauss* and *2D-Gauss* are similar. Both try to find the ideal hue and chroma combination by scoring several, randomly generated sample images and later fitting the results to a Gaussian function. The theory is, that the peak of the Gaussian function symbolizes the ideal or preferred value for the observed parameter. This has already been comparably used by S. Babilon *et al.* [12]. At first, a random image is generated by either multiplying the original chroma values with a random value or adding/subtracting from the original hue values. Both of the random values are selected from a uniform distribution and afterwards scored by the participant. The chroma multipliers range from 0.8-1.6, while the Hue values are modified in a range of $\pm 13^\circ$. This procedure is used for two different methods. One fits to a one-dimensional

$$f(x) = f(y) = H + A \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2}\right)$$

and the other to a two-dimensional Gaussian function

$$f(x, y) = H + A \cdot \exp\left(-\left(\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)\right).$$

Please note that in case of more than two parameters, other, n-dimensional Gaussian functions also exist. One major difference between the two methods is that the two-dimensional function modifies the chroma (x) and hue (y) combination at the same time, whereas the one-dimensional function changes its modified parameter sequentially. After the image generation, the participant is then asked to score the image on a scale of 1-9, 9 being the best possible score. The score is used as an amplitude to which the Gaussian functions can be fitted to. The fitting is done via SciPy's [13] implementation of a Trust Region Reflective algorithm [14]. In total, the method for the one-dimensional Gauss takes two measurement series for both parameter with 20 samples each, while the two-dimensional Gauss takes 40 samples. This number was chosen to ensure a robust fit since, depending on the randomized samples or inconsistencies in scoring, the algorithm might not find an optimal solution if the sample size is too low. A possible fit for each algorithm can be seen in Figure 2-4 and Figure 2-5.

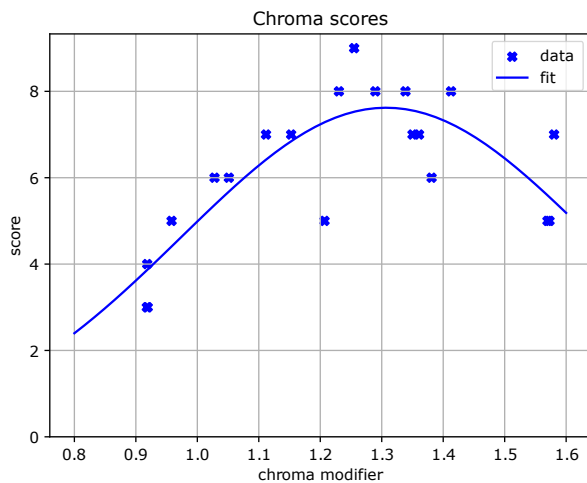


Figure 2-4 Sample fit of a 1D-Gauss for the chroma values. Fitting the hue values works likewise.

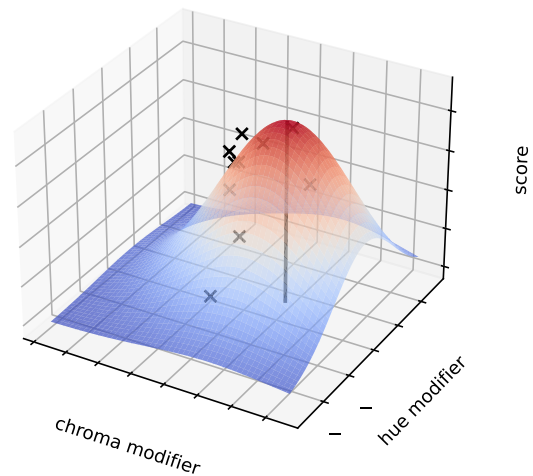


Figure 2-5 A sample fit for the 2D-algorithm. The ideal i.e., the maximum value is marked by the black line. For illustrative reasons only ten sample are visible.

2.2.3 Genetic

Another proposed method is a *Genetic* algorithm, which has already been comparably used by Ashdown to find optimal luminaires [15] as well as by the previously mentioned paper of Newsham, G.R *et al.* to find preferred surface luminances in offices [8]. This method works by creating randomized images and then tries to identify the ideal composition by an evolutionary process. Specifically, this method has been implemented via pymoo's "GA: Genetic Algorithm" [16]. The population starts out with five images, which each possess differently modified hue and chroma values in the same range as for the Gaussian methods. The participant is then asked to score them in a range of 1-9 with higher scored images being more likely to survive and subsequently, passing their modifiers on to the next generation. The next generation inherits the parent's traits, nonetheless a small amount of mutation is also permitted. This process is repeated for five generations to find the ideal hue and chroma combination.

2.2.4 Reference

The last method is used as a control method and will always be the last one used, not to influence any of the following methods. It is similar to the *Staircase* method, but the user is able to independently adjust the image to their liking. The participants are able to change the hue and chroma values as well as the step size independently for as long as they need. The resulting image is used as a reference to compare all the other methods. This is needed since all participants are likely to have an individual ideal

lighting scenario, which could conceal any differences made by the selected algorithm itself. Additionally, the anchoring image set, mentioned before, is shown right before this method as well to show the range of expected modification.

3 Results

For all the before mentioned methods, the generated hue and chroma combinations and if available the score, have been recorded. Additionally, after successfully concluding a method, the participants were asked to score it in a range of 1-9 on how intuitive they perceived said method. The results of which are displayed in Figure 3-1, while the individual scores of each participant can be seen in Table 6-1. Notably, the *Staircase* method not only presents the lowest average score, but also a significantly larger spread than the other methods. This indicates a polarizing nature of this method. Whereas all other methods are scored similarly positively. Next to it in Figure 3-2, the time needed to conclude each method is laid out. Again, the *Staircase* method is performing the worst, while the *Genetic* method is able to complete each run the most quickly.

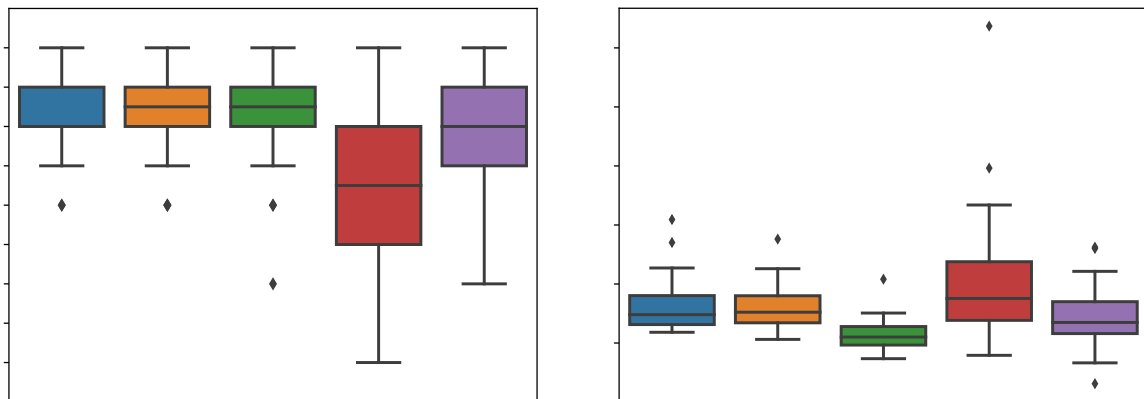


Figure 3-1 Scores in a range of 1-9 given by the participant on their perceived intuitiveness of the selected method. Figure 3-2 Time in minutes taken for the completion of each method.

Furthermore, the differences between the ideal hue and chroma values are of interest. For this reason, the *Reference* method is used as a control method. In theory, the participants should with limitless time and full control over the image, obtain their preferred scene. It is important to only use the relative modifiers.

$$\Delta Mod = Mod_{Method} - Mod_{Reference}$$

comparatively, since the preferred lighting scenes differ greatly between participants. For example, the preferred, absolute Mod_{Chroma} for *Reference* range from 0.83 to 1.97 (visible in Figure 6-1). However, *Reference* shows similarly to the other algorithms, that

most people prefer an increase in chroma by roughly 15-40%. Also, most participants favoured an almost negligible increase in hue for the red rose, which is equivalent to a slight orange tint.

The relative modifiers are visible in Figure 3-3 and Figure 3-4. The large outliers, mainly visible for the *2D-Gauss*, can be explained by non-ideal fits. Also of note is the slight upwards shift of the *Staircase*'s chroma values.

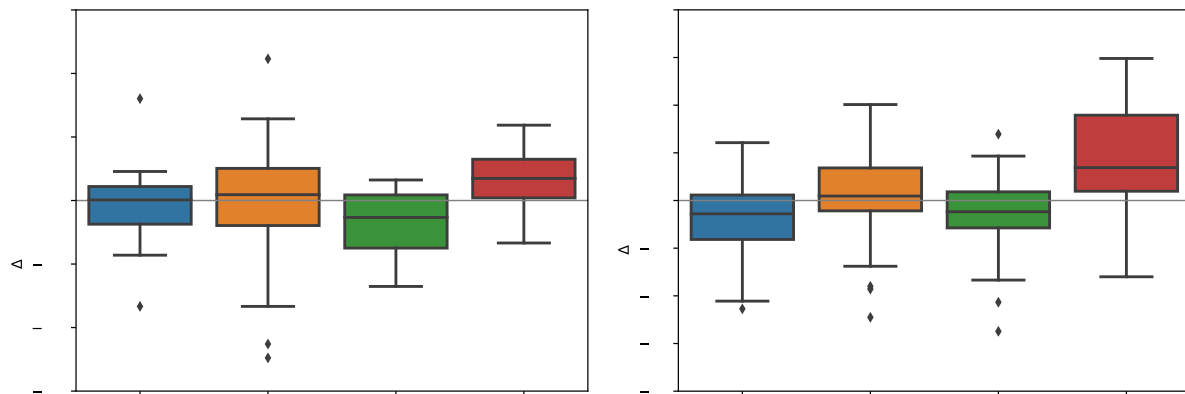


Figure 3-3 Difference of the chroma Figure 3-4 Difference of the hue modifier modifier between a method and between a method and Reference. Reference.

The visible differences in the modifier values of each method have to be examined by statistical analysis. To proceed, one must first examine the distribution of the underlying data. For this reason, at first a Shapiro–Wilk test is performed to determine whether the data is normally distributed. With a significance level of 5% only the following methods are normally distributed: *Reference* the hue values of *Staircase* as well as the chroma values of *Genetic*. Consequently, neither an ANOVA nor t-test can be performed since they require a normally distributed sample set. On account of this and since the multiple measurements of each participant are related to each other, a Wilcoxon signed-rank test has been chosen. The Wilcoxon test is the non-parametric version of the paired t-test and checks whether two distributions, in this case all methods individually compared to *Reference*, differ significantly. The test concludes that, again with a significance level of 5%, only the *Staircase* modifiers as well as the chroma modifiers of *Genetic* differ significantly from the ones of *Reference*. The reasons for which will be further discussed in section 4. The precise statistical results can be seen in Table 6-2. [17] [18]

4 Discussion

During the comparison of all the methods the *Staircase* method stands out. Not only was it generally perceived as less intuitive than all the other methods, but it was also a lot more polarizing to the participants with a larger spread of scores. Besides that, it takes longer to complete, while also differing significantly from the control method *Reference*. A number of participants complained that they found it challenging to detect changes in the parameters since they forgot the previous image. As mentioned before in section 2.2, while a forced-choice algorithm i.e., showing a selection of images simultaneously would alleviate this problem, these kinds of algorithms have been ruled out with future studies with real world lighting applications in mind. Additionally, the implementation of the method itself might have influenced the outcome of the modifiers. All participants started out with the original image and by default, started by increasing the chroma levels. The resulting calculated modifiers are visible in Figure 6-1. This fact as well as the difficulties in comparing the newly calculated images to the previous one, might have led participants to overshoot their preferred chroma level. The significant upwards shift in hue levels might also indicate the participants preference to approve the more recent images. To negate this effect, future studies should not only start at different points, but also switch the starting directions for each participant to limit any overshooting effects. In conclusion, while the *Staircase* method is quite popular and useful for many applications it might not be the best choice to optimise multiple parameters at once.

Additionally, looking closer at the participants themselves might reveal more information about the algorithms. For this reason, a correlation matrix (Figure 4-1) the information in Table 6-1 has been created. A Spearman correlation coefficient of 1 shows a strong monotonic relation whereas a Pearson coefficient displays a linear relationship. However, the information on the participants had to be normalized to be able to correlate it. In practise this means that 'yes' as well as 'm' have been converted to a one, while 'no' and 'f' have been converted to a zero. Participants with technical experience appear to dislike simpler methods like *1D-Gauss* and *2D-Gauss*, which require only minimal input by the user i.e., a rating. However, this effect seems to rescind with more complex methods like *Staircase* and *Reference*. Other factors such as age or sex might be skewed by the fact that most experienced participants i.e., PhD students have been largely male and slightly older in this study.

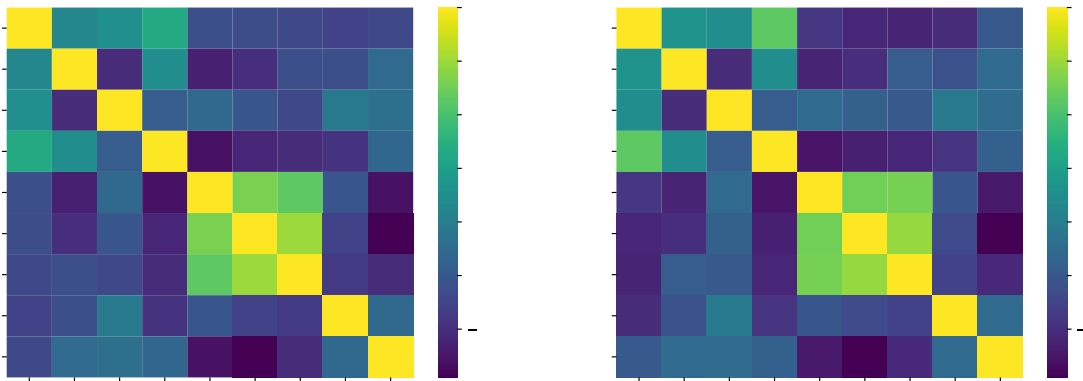


Figure 4-1 A heat map of the correlation coefficients on all of the collected data submitted by the participants. Some parameters like sex or experience had to be normalized likewise to the values of Table 6-1.

Another layer of examination should be the scalability of each method. While this study was conducted with only two parameters in mind, other use cases may require a multitude of parameters. It can be assumed that *1D-Gauss* scales in a linear manner. Meaning, for n parameters this method may require n times a base number of samples. Please note that the necessary sample size of a n -dimensional Gauss fit, already visible in the instability of *2D-Gauss*, would scale exponentially and is thus not practical for higher dimensionalities [19]. Additionally, the scoring of the participants had been less consistent than anticipated during testing. This inconsistent scoring might worsen with an increasing number of dimensions of the Gaussian fit since participants might get overwhelmed by the choices available. *Staircase* could scale significantly worse since multiple passes over all parameters might be required, because of possible influences in between them. A change in one parameter might require an adjustment in a previously set one. *Reference* might confuse inexperienced users especially if the number of possible options is too vast. This is possibly indicated by the slightly stronger correlation between experienced users and *Reference*. Only the *Genetic* method has the possibility to perform better than a linear relationship. However, the population and generation size were set rather arbitrarily, the only goal being a robust and consistent outcome. Additional experiments with genetic algorithms used in a psychometric as opposed to the more frequent machine learning environment, could clarify some rules of thumb when working with said algorithms. Machine learning algorithms often work with hundreds of generations and large starting populations, which is not feasible for human interaction [20]. It might also be of interest to study different genetic algorithms, which have been specifically designed with multi-objective optimization in mind. Of note is the NSGA-II algorithm and its derivatives [21].

4.1 Limitations

No study is without its limitations. For example, the participant pool is mainly consistent of young people, with the mean age being 27. This could affect the average natural ability, individual scene preferences as well as the rating given for every single method. The correlation coefficients (visible in Figure 4-1) are indicative of this behaviour, although this might be skewed by the fact that for this participant pool age highly correlates to experience ($r_p = 0.46, r_s = 0.66$).

Another relevant factor might be the loading time of each image. Especially the *Staircase* method has suffered from the fact, that each new image was calculated in real time, which in practice took somewhere between two to three seconds. Participants complained that they had found it difficult to remember the past images. One might negate this effect by either providing more raw processing power or by pre-calculating several images to shorten the time in between images. Although, this pre-calculation of all possible solutions might not be feasible, especially if the number of parameters increases. Additionally, for this method the chroma modifier was multiplied with each recent image, thus raising the absolute step-size for each subsequent image for the increasing direction and vice versa. The change in step size might have also influenced the outcome, but in practice led almost never to detectable changes. However, this could be easily avoided by calculating a fixed step size with the reference picture at the beginning.

Furthermore, all participants were unaware of the parameters that were being modified except for testing the control method. In practice, most products and/or use cases would give information on these parameters to make it easier for the user. This might benefit some methods more than others. On top of that, research has suggested that there are significant differences in the perception of colour for separate cultural backgrounds [22]. It might also be of interest if those differences extend to the methodology of optimizing for those colours.

Finally, the effects of conducting this test only in a digital form are unknown. Although the experiment was designed to reduce any influences between the room and monitor, a real-world study should be conducted as well. A study in which real objects would be displayed under different lighting conditions might play out differently than just showing images digitally.

5 Conclusion

In conclusion, special care needs to be taken when selecting optimization algorithms. Some methods like the popular *Staircase* might not work well with multiple parameters, because of time constraints and adaptation. Other methods like a Gaussian fit only work effectively for a small number of parameters, since the required sample size scales up to quickly. Genetic algorithms seem to offer the greatest balance of speed and precision i.e., results which don't differ significantly from the ideal. Furthermore,

Genetic was generally well received for its intuitiveness. Intelligent algorithms, which adapt actively based on already acquired information, are the most promising to optimize multiple parameters. As mentioned before, it might also be of interest to study different and more complex genetic algorithms as well as the required population size and number of generations. Furthermore, since this experiment was only performed digitally its findings might not convert directly into real world examples. A future study with objects under different lighting conditions could confirm the results.

6 Appendix

Table 6-1 All the information gathered on the participants as well as their personal score on how 'intuitive' the tested method was perceived. Experience refers to technical experience in the field. Please note that for the calculation of the mean and standard deviation, 'yes' as well as 'm' have been converted to a 1, while 'no' and 'f' have been converted to 0.

	General Information				
	Age	Sex	Glasses	Colourblind	Experience
Mean	27.25	0.79	0.46	0.00	0.61
Std.	7.65	0.42	0.51	0.00	0.50
	User-Scores				
	1D-Gauss	2D-Gauss	Genetic	Staircase	Reference
Mean	7.29	7.39	7.36	5.46	6.79
Std.	1.12	1.20	1.42	2.03	1.69

Table 6-2 The recorded p-value for each statistical test that was conducted. The significance level was set at $\alpha = 5\% = 0.05$.

	Shapiro-Wilk		Wilcoxon	
	Chroma	Hue	Chroma	Hue
<i>1D-Gauss</i>	0.000	0.001	0.509	0.056
<i>2D-Gauss</i>	0.000	0.000	0.585	0.412
<i>Genetic</i>	0.847	0.010	0.003	0.139
<i>Staircase</i>	0.048	0.699	0.001	0.002
<i>Reference</i>	0.370	0.457	-	-

Table 6-3 Measured colour temperature, luminance and D_{uv} of several surfaces in the test room. All measurements were done using a CS-2000 Spectroradiometer.

	Target	Desk	Wall	Monitor
CCT [K]	6500	6263	6548	6520
Lum. [cd/m^2]	120	110.1	120.7	121.8
D_{uv}	0.000	0.000	0.000	0.002

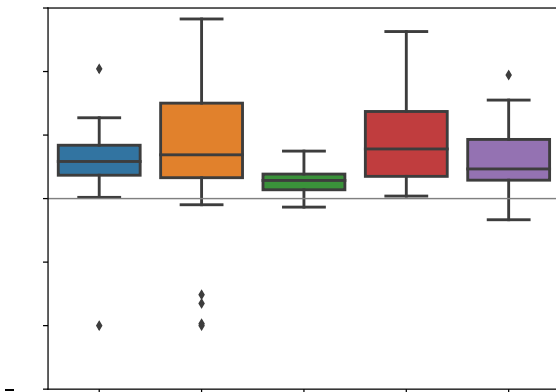


Figure 6-1 Absolute values of the chroma modifiers.

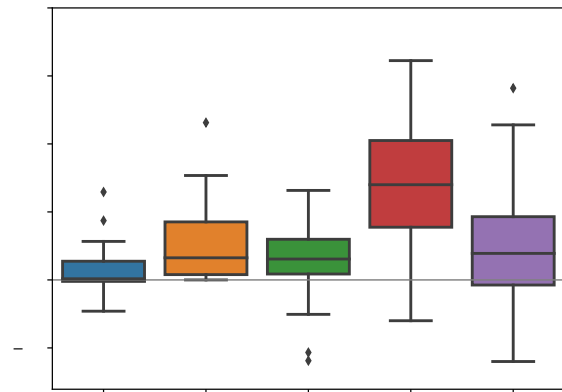


Figure 6-2 Absolute values of the hue modifiers.

7 References

- [1] Mark D. Fairchild, *Color Appearance Models: CIECAM02 and Beyond*, 9.11.2004.
- [2] K. A. G. Smet, "Tutorial: The LuxPy Python Toolbox for Lighting and Color Science," *LEUKOS*, vol. 16, no. 3, pp. 179–201, 2020.
- [3] Shenzhen Myledy Co Ltd, "Why R9 matter for LED lights?," 6/28/2017.
- [4] Prof. Dr. Stefan Weinzierl, "Labor Kommunikationstechnik: Perzeptive Messung und Evaluation," Technische Universität Berlin.
- [5] M. R. Leek, "Adaptive procedures in psychophysical research," *Perception & psychophysics*, vol. 63, no. 8, pp. 1279–1292, 2001.
- [6] H. Levitt, "Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 49, 2B, pp. 467–477, 1971.
- [7] T. Q. Khanh, P. Bodrogi, Q. T. Vinh et al., "Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 1: Experiments in a room," *Lighting Research & Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 697–713, 2017.
- [8] G. R. Newsham, R. G. Marchand, and J. A. Veitch, "Preferred Surface Luminances in Offices, by Evolution," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 33, no. 1, pp. 14–29, 2004.
- [9] B. R. Shelton and I. Scarrow, "Two-alternative versus three-alternative procedures for threshold estimation," *Perception & psychophysics*, vol. 35, no. 4, pp. 385–392, 1984.
- [10] N. A. Macmillan, "Covert converging operations for multidimensional psychophysics," *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 15, no. 3, pp. 573–574, 1992.
- [11] A. Pentland, "Maximum likelihood estimation: the best PEST," *Perception & psychophysics*, vol. 28, no. 4, pp. 377–379, 1980.
- [12] S. Babilon, J. Klabes, P. Myland et al., "Memory colors and the assessment of color quality in lighting applications," *Optics express*, vol. 29, no. 18, pp. 28968–28993, 2021.
- [13] P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant et al., "SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python," *Nature methods*, vol. 17, no. 3, pp. 261–272, 2020.
- [14] M. A. Branch, T. F. Coleman, and Y. Li, "A Subspace, Interior, and Conjugate Gradient Method for Large-Scale Bound-Constrained Minimization Problems," *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 21, no. 1, pp. 1–23, 1999.
- [15] I. Ashdown, "Non-Imaging Optics Design Using Genetic Algorithms," *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 23, no. 1, pp. 12–21, 1994.

- [16] J. Blank and K. Deb, “Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 89497–89509, 2020.
- [17] G. W. Corder and D. I. Foreman, *Nonparametric statistics: A step-by-step approach*, Wiley, Hoboken, New Jersey, 2014.
- [18] A. Field, J. Miles, and Z. Field, *Discovering statistics using R*, Sage, Los Angeles, CA, USA, 2014.
- [19] Julie Delon, *The curse of dimensionality*, 2017.
- [20] S. Gotshall and B. Rylander, *Optimal population size and the genetic algorithm*, 2002.
- [21] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal et al., “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002.
- [22] S. Babilon and T. Q. Khanh, “Impact of the adapted white point and the cultural background on memory color assessments,” *Color Research & Application*, vol. 45, no. 5, pp. 803–824, 2020.

Bildgebende Messverfahren im Fokus: Fortschritte der Standardisierung im Bereich der Leuchtdichtemesskameras.

Tanja Thiele, Christian Schwanengel

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH

Zusammenfassung

Standardisierung und Produktentwicklung sind eng miteinander verbundene Prozesse, die sich gegenseitig beeinflussen und ergänzen. Einerseits entwickeln sich Produkte weiter, so dass stetig an aktuellen Standards gearbeitet werden muss. Andererseits kann auch der Gesetzgeber Rahmenbedingungen definieren, so dass das Produkt einem Standard entsprechen muss. In jedem Fall wird durch die Verwendung von Standards sichergestellt, dass die Produkte kompatibel sind und die gleiche Leistung und Zuverlässigkeit aufweisen. Dies wird auch in der Entwicklung und in der Verwendung von bildgebenden Leuchtdichtemessgeräten angestrebt. Dadurch entsteht innovative Messtechnik, die das Messen nach standardisierten Anforderungen erlaubt und ein Qualitätsstandard schafft. Besonders im Automotivbereich sind durch gesetzliche Bestimmungen für die Sicherheit im Straßenverkehr auf solche Qualitätsstandards zu achten

Index Terms: Standardisierung, Qualität, Messanforderungen

Stand der Technik

Im Straßenverkehr wird ein Fahrer mit den unterschiedlichsten Situationen (Kurven, Fußgänger, usw.) konfrontiert. Um diesen verschiedenen Beleuchtungssituationen gerecht zu werden sind verschiedene Lichtverteilungen nötig, da eine einzige Lichtverteilung nicht in allen Situationen eine optimale Ausleuchtung des Verkehrsraumes gewährleistet. Die Hauptaufgabe eines Scheinwerfers ist also, die Fahrbahn möglichst homogen und weit auszuleuchten. Beim Abblendlichtscheinwerfer muss zusätzlich die Blendung der entgegenkommenden Fahrer in erträglichen, gesetzlichen Grenzen gehalten werden.



Messtechnik

Bei den Qualitätskontrollen von Scheinwerfern wird geprüft, ob die gesetzlichen Anforderungen aber auch die des Kunden und nicht zuletzt die des Herstellers selbst erfüllt werden. Dies geschieht sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Serienfertigung. Das vom Gesetzgeber anerkannte Verfahren ist die 1-Bereichs-Photometrie. Hier wird üblicher Weise der Scheinwerfer auf ein Goniophotometer aufgebaut. Die vom Gesetzgeber angegebenen Messpunkte und -zonen bei Scheinwerfern beziehen sich auf eine Goniophotometermessung mit 25m Messentfernung. In Abbildung 1 ist ein prinzipieller Aufbau eines Goniometers dargestellt. Zwischen Goniometer und Photosensor befindet sich in einem Abstand von 10 m eine Wand mit einem Loch in der Mitte, an welches sich ein 15m langer Tubus anschließt. Diese 10m Wand dient unter anderem als Hilfsmittel zur Positionierung der Scheinwerfer und zur visuellen Beurteilung der Lichtverteilung. Die Messung eines bestimmten Winkelbereiches erfolgt durch das sequentielle Anfahren der einzelnen Winkelpositionen.

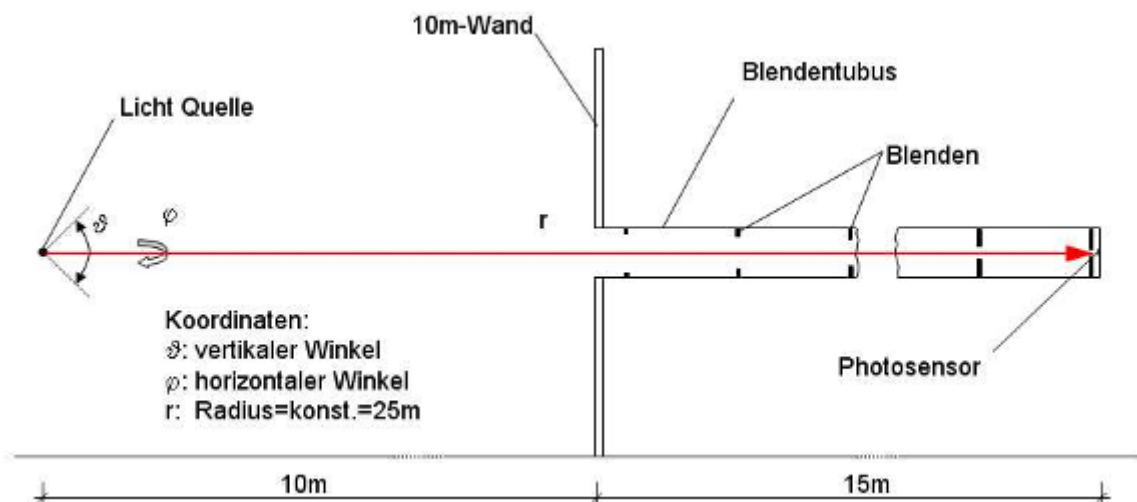


Abbildung 1 Messprinzip eines Goniophotometers

Eine wesentlich schneller Alternative zur Goniophotometermessung ist die Messung mit einer Leuchtdichtemesskamera. Lässt man das Messobjekt auf ein Medium strahlen, erzeugt der auf dem Medium auftreffende Lichtstrom eine Beleuchtungsstärke. Aus dieser resultiert eine Leuchtdichte, die bildauflösend gemessen werden kann. Darauf aufsetzend kann aus dem aufgenommenen Leuchtdichtebild bei Kenntnis der geometrischen Zusammenhänge (Position von Messobjekt, Medium und Kamera) das korrespondierende Beleuchtungsstärkebild sowie die Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) berechnet werden. Weil die Berechnung der LVK über ein zusätzliches Medium und ausgehend von der gemessenen Leuchtdichte in Pixelkoordinaten realisiert wird, spricht man von einer Indirekten LVK-Messung. Abbildung 2 verdeutlicht das Messprinzip am Beispiel einer Scheinwerfermessung. Hier sind typische Messentfernungen 10 m oder mehr.

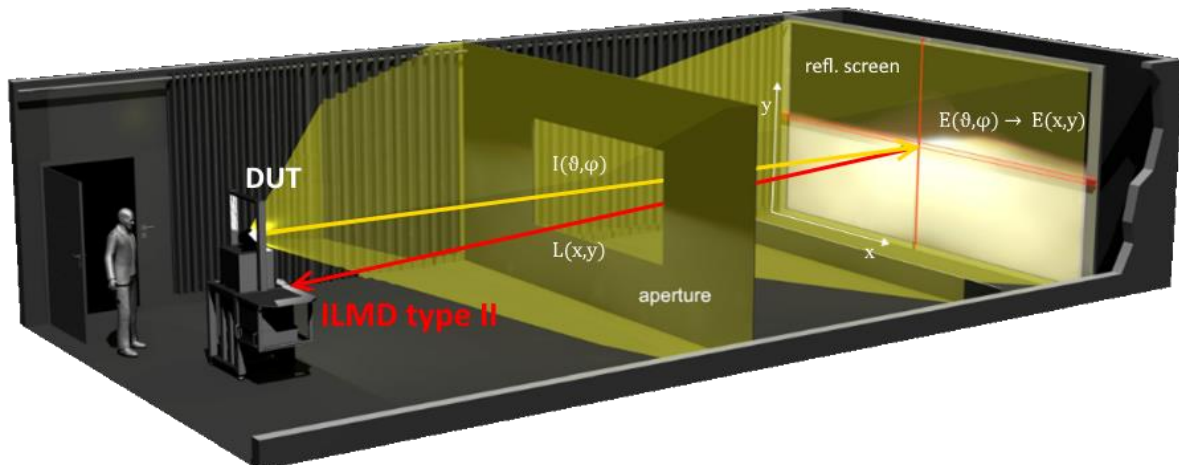


Abbildung 2 Messaufbau zur indirekten Messung der Lichtstärke mit Hilfe eines ILMDs

Wenn man beide Messtechniken kombiniert, kann man die jeweiligen Vorteile nutzen und somit die Messung von Lichtverteilung in Qualität und Schnelligkeit optimieren. Je nach Anforderungen kann man verschiedene Goniometersysteme einsetzen, die den Scheinwerfer für die Messung positionieren. Zusätzlich hat man mehrere Sensoren zur Auswahl, die man flexibel für verschiedene Messungen und Prüfungen einsetzen kann. In Abbildung 3 werden mögliche Konfigurationen gelistet.

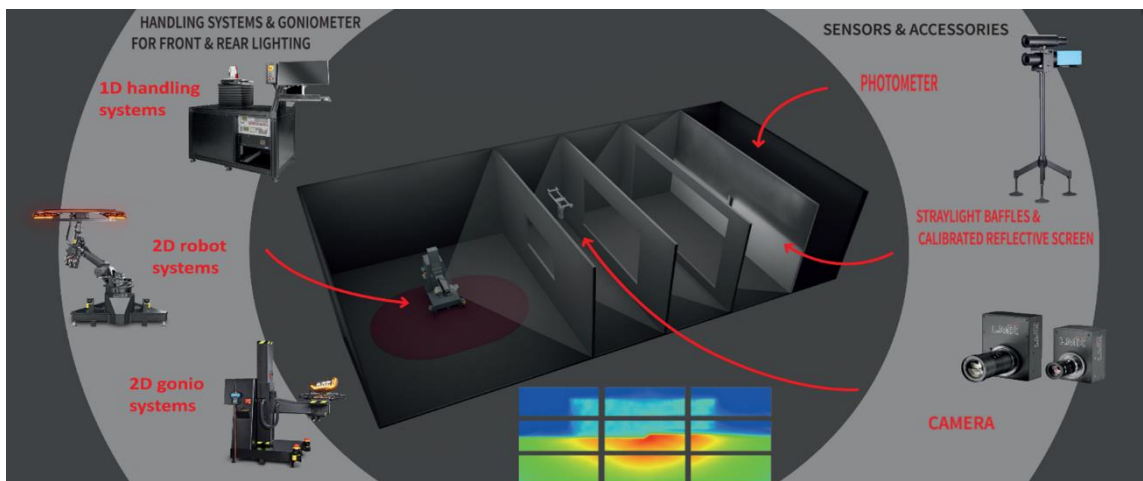


Abbildung 3 Kombinationsmöglichkeiten von verschiedenen Sensoren in einem Labor zur direkten und indirekten Messung von Lichtstärke

Eine umfangreiche Auflistung aller Messtechniken zur Messung von Lichtstärke kann auf der Webseite von TechnoTeam heruntergeladen werden [1].

Gesetzliche Bestimmungen und Standards

Die Anforderungen an KFZ-Scheinwerfer variieren je nach Land und Region, was für Hersteller eine Herausforderung darstellt. Um die Sicherheit und Wirksamkeit ihrer Scheinwerfer zu gewährleisten, müssen Hersteller die spezifischen Anforderungen in ihrer Region erfüllen und diese regelmäßig prüfen und aktualisieren, um Änderungen der Vorschriften zu berücksichtigen. Einige Länder haben strenge Vorschriften für die Helligkeit und Farbe der Scheinwerfer, während andere Länder flexiblere Vorschriften haben. Hersteller müssen sicherstellen, dass ihre Scheinwerfer die geltenden Anforderungen erfüllen, um die Zulassung ihrer Produkte zu erhalten und sicherzustellen, dass sie auf den internationalen Märkten wettbewerbsfähig bleiben können. Für Deutschland gelten die Richtlinien der Europäischen Union UN/ECE. Den Grundstein für eine einheitliche Regelung der technischen Vorschriften für Kraftfahrzeuge wurde Ende der 50er Jahre gelegt. Parallel zur Einführung der asymmetrischen Abblendlichtverteilung wurde in dieser Zeit die erste Prüfvorschrift für die lichttechnische Zulassung eines Frontscheinwerfers in Kraft gesetzt [2].

Messtechnisch bedeutete dies, dass auf einem Messschirm in 25m an fünf einzelnen Punkten, sowie in drei Zonen die Beleuchtungsstärke, meist mit einem Handluxmeter überprüft wurde. Zusätzlich gab es schon Anforderung an die Positionierung des Scheinwerfers vor dem Schirm, was ein Goniometer nötig machte [3].

Mit den Jahren wurde für alle im Straßenverkehr relevanten Beleuchtungen Regularien eingeführt, wie z.B. Fernlicht oder Tagfahrlicht. Mit immer komplexeren Scheinwerfertechnologien wird die Digitalisierung im Auto zum Hauptthema. Lichtfunktionen gehen über das Beleuchten der Straße hinaus und die Scheinwerfer sind zunehmend mit Sensoren verknüpft, deren Informationen während der Fahrt verarbeitet werden und die Lichtverteilung an die benötigte Beleuchtungssituation anpassen. Das Überschneiden der Themenbereiche macht einen immer ausführlicheren Informationsaustausch nötig. So werden die gesetzlichen Regelungen maßgeblich von diversen Gremien und Arbeitsgruppen aus allen beteiligten Bereichen geprägt. Betreffend der Photometrie, werden sowohl Standards in Gremien wie der internationalen Beleuchtungskommission (CIE) und der internationalen Organisation für Normierung (ISO) formuliert und Arbeitsgruppen wie die international automotive lighting and light signaling expert group (GTB) konsultiert, nur um eine Auswahl zu nennen. Die Standards formulieren zum einen Vorgehensweisen, wie man messtechnikübergreifend reproduzierbar misst und die Daten einheitlich aufbereitet, zum anderen auch wie man Messtechnik einheitlich charakterisiert.

Aktuell treibende Standards

Neue Technologien, erfordern neue Regularien, die wiederum zu neuen Anforderungen an die Messtechnik führen, die dann wiederum einheitlich zum Prüfen der Regularien genutzt werden soll. So beeinflussen sich die Prozesse gegenseitig. Folgend sollen zwei Standards vorgestellt werden, die aktuell die Messtechnik beeinflussen.

CIE 244

Photometer können nach bestimmten Kennzahlen in Qualitätsklassen eingeteilt werden. Das hilft dem Anwender, das Messgerät entsprechend seinen Anforderungen auszuwählen. Eine Kennzahl, die sich besonders durchgesetzt hat, ist f_1' , was die spektrale Anpassung des Messsystems an die $V(\lambda)$ Kurve charakterisiert. Das ideale Messsystem weist laut der Definition 0% Abweichung zur normierten Kurve auf. Diese Kennzahl wurde in der Praxis auf Grund ihrer Bekanntheit auch für orts aufgelöste Leuchtdichtemesstechnik (ILMD) übernommen, beschreibt jedoch die Qualität eines ILMD nur eingeschränkt. In der CIE244 von 2021 werden erstmals weitere Kennzahlen für ILMDs formuliert. Diese Kennzahlen adressieren ein oft diskutiertes Thema: Was ist die messbare Dynamik und was ist der messbare Kontrast eines Messsystems? Der Dynamikbereich eines Systems und die Dynamik innerhalb eines Bildes werden oft verwechselt. Der Dynamikbereich ist definiert als der mögliche Wertebereich für einen bestimmten Pixel, einschließlich der Sättigung und verschiedener Integrations- oder Belichtungszeiten. Der Begriff "Kontrast" ist der Unterschied zwischen zwei Bereichen in einer Messung. Es steht also für die Fähigkeit eines Messsystems, sowohl helle als auch dunkle Signale gleichzeitig in einem Bild zu messen. Ein ILMD kann zum Beispiel Quellen mit einer Strahlung von mehreren Mcd/m^2 sehr genau messen, wie eine helle LED oder die Sonne. Mit demselben Instrument ist es jedoch auch möglich, sehr niedrige Werte von 1cd/m^2 mit hoher Genauigkeit zu messen, z. B. ein dunkles Symbol oder die reflektierte Leuchtdichte von einer nächtlichen Straße. Im ersten Fall haben wir sehr kurze Integrationszeiten ($\sim 100\mu\text{s}$) und im zweiten Fall mehrere Sekunden. Dies entspricht einem Dynamikbereich von 1:10.000.000. Ein Kontrast von 1:10.000.000 würde jedoch bedeuten, dass es möglich wäre, dasselbe dunkle Symbol gleichzeitig zu messen, wenn es sich neben der Sonne befindet. Dies ist jedoch für ein ILMD physikalisch unmöglich. Die Messergebnisse des Symbols wären also falsch. Dass, das nicht geht, liegt am Streulicht. Bei einer solchen Messung wird das Licht von allen Oberflächen innerhalb und außerhalb des Messgeräts gestreut.

Um nun zu wissen, welchen Kontrast das ILMD messen kann wurden folgende Kennzahlen definiert (siehe Tabelle 1):

Tabelle 1 Neue Kennzahlen für ILMDs aus der CIE244. Rot gestrichelt entspricht dem Bildfeld des ILMDs, blau entspricht der Auswerteregion.

Umfeldeinfluss		$f_{23} = \frac{Y_{0,3}}{Y_{1,3}}$
Einfluss auf Negativkontrast		$f_{24} = \frac{Y_{0,4}}{Y_{1,4}}$
Kantenfunktion		$f_{25} = \frac{Y_{0,5}}{Y_{1,5}}$

Das Ziel jedes Herstellers von ILMDs sollte nun sein, genormte Standards nach der CIE244 zu schaffen, um so seine Messtechnik zu charakterisieren. Das verhilft den Nutzern, ILMDs besser zu vergleichen und auch die passende Konfiguration für seine Messaufgabe auszuwählen.

Für das Prüfen von Abblendlichtverteilungen ist der Kontrast besonders interessant. Ein wichtiger Bestandteil der Prüfung von Scheinwerfern ist die Bewertung der Blendwirkung. Idealerweise wird die Straße beleuchtet und nicht der Gegenverkehr. Eine Abblendlichtverteilung wird also ab einem bestimmten Ausstrahlwinkel dunkel, das bildet die sogenannte Hell-Dunkel-Grenze. Wird diese Hell-Dunkel-Grenze, durch ein nicht kontrastoptimiertes ILMD verfälscht, führt das dazu, dass Abblendlichtverteilungen nicht mit solch einer Messtechnik geprüft werden können. Den Unterschied, zwischen einem Standard ILMD und einem kontrastoptimierten ILMD zeigt Abbildung 4.

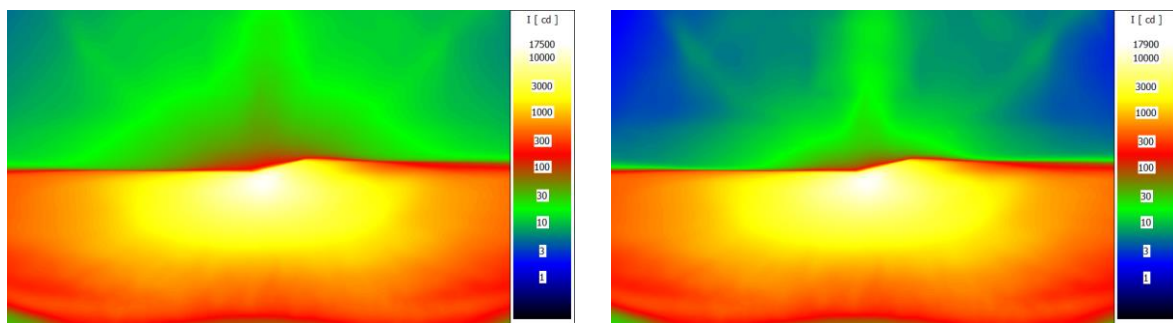
A $f_{25} = 1:600$ B $f_{25} = 1:6000$

Abbildung 4 A Messung eines Abblendlichtes mit einem Standard ILMD B Messung eines Abblendlichtes mit einem kontrastoptimierten ILMD

CIE DIS 027

Hat man die Messtechnik, um die Abblendlichtverteilung eines Scheinwerfers zu messen, ist die Einrichtung des Messlabors, bzw. eine geeignete Messumgebung wichtig. Dabei gilt es auf das Gesamtsystem zu achten. Sowohl die Bedingungen im Messlabor, wie z.B. Umgebungstemperatur und Luftzirkulation, als auch das Handling des Messobjektes, wie z.B. der Aufbau der Messobjekthalterung und die Stromversorgung, sind nicht zu vernachlässigende Faktoren die zur Qualität der Messung beitragen. Dabei ist auch festzulegen welche Größen gemessen werden sollen. Die oben genannte Norm legt die Anforderungen an die Messung der elektrischen, photometrischen und kolorimetrischen Eigenschaften von Scheinwerfern fest. Folgende Größen werden behandelt:

- Gesamtlichtstrom
- Kumulative Lichtstrom
- Lichtstärke
- Beleuchtungsstärke
- Leuchtdichte
- Farbkoordinaten
- Kontrastverhältnisse von Lichtquellen

Einen besonderen Beitrag leistet die Norm zur Anwendbarkeit der Messunsicherheit für die Messung der oben genannten photometrischen Größen. Basierend auf der CIE 198, die die Berechnung der Messunsicherheit in der Photometrie allgemein erklärt, wird in der CIE DIS 027 konkret auf die Berechnung der Messunsicherheit für die Messung der Lichtstärke in einem Messlabor basierend auf den in der Norm genannten Empfehlung eingegangen. Basierend auf dieser Anleitung, können in verschiedenen Messlaboren die Messunsicherheiten entsprechend bestimmt werden, was die Vergleichbarkeit der Messungen erheblich verbessert. Die CIE DIS 027 soll voraussichtlich im Jahr 2023 veröffentlicht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] C. Schwanengel, „www.technoteam.de,“ 19 Juni 2023. [Online]. Available: https://www.technoteam.de/apool/tnt5/content/e3908/e4354/e4674/e4749/e4765/LVK_Messtechniken_ger.pdf.
- [2] B. f. D. u. Verkehr, „<https://bmdv.bund.de>,“ 8 Dezember 2022. [Online]. Available: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/internationale-harmonisierung-der-technischen-vorschriften-fuer-kraftfahrzeuge.html>. [Zugriff am 19 Juni 2023].
- [3] E. Union, „EUR-Lex,“ 19 Juni 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A42010X0710%2801%29>.

24-Stunden-Lichtexposition unterschiedlicher Berufsgruppen

Corina Varga, Ljiljana Udovicic

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) wurde die Lichtexposition unterschiedlicher Berufsgruppen untersucht. Die Ergebnisse zeigen die Abhängigkeit der Lichtexposition der Beschäftigten in Bezug auf die Arbeitszeiten (Tag- oder Nachtschicht), den Arbeitsort (Arbeit in Innenräumen oder im Freien) und die Jahreszeiten (Winter oder Frühling). Die Lichtexposition der nachtschichtarbeitenden Beschäftigten und der Beschäftigten, die in Innenräumen arbeiten, ist deutlich niedriger als die Lichtexposition der im Freien arbeitenden Beschäftigten. Eine geringe Tageslichtexposition sowie die nächtliche Lichtexposition könnten zu einer Desynchronisation circadianer physiologischer Prozesse im menschlichen Körper und zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen.

Index Terms: Light exposure, workers, indoor, outdoor, occupation

1 Einleitung

Zahlreiche Prozesse im menschlichen Körper wie der Schlaf-Wach-Rhythmus, der Blutdruck, die Körpertemperatur, die Ausschüttung von Hormonen und sogar die kognitive Leistungsfähigkeit haben eine Periodenlänge von etwa 24 Stunden – sie unterliegen der circadianen Rhythmik. Das Licht ist der wichtigste Zeitgeber, der diese Prozesse mit dem natürlichen 24-Stunden Hell-Dunkel-Rhythmus von Tag und Nacht anpasst – man spricht von Synchronisation.

Lichtexposition während der Nachtschicht (oft als „Licht zur falschen Zeit“ bezeichnet) sowie eine geringe Tageslichtexposition („Lichtmangel“), bedingt durch überwiegende Tätigkeiten in Innenräumen und nur kurze Aufenthalte im Freien bei Tageslicht, beeinflussen die circadiane Rhythmik und können zu einer Desynchronisation der oben genannten Prozesse führen. Die Desynchronisation wird mit einer Reihe von gesundheitlichen Beeinträchtigungen wie Stoffwechselstörungen oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen in Verbindung gebracht.

Da in diesem Zusammenhang immer noch Forschungsbedarf vorhanden ist, wurde in der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) eine Feldstudie



zur Lichtexposition unterschiedlicher Berufsgruppen durchgeführt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse für drei Berufsgruppen dargestellt: nachtschichtarbeitende Kommissionierer/innen (Licht zur falschen Zeit), tagsüber in Innenräumen arbeitende Lehrer/innen (vermuteter Lichtmangel) und im Freien arbeitende Gärtner. Die Ergebnisse werden als Beleuchtungsstärke und als Dosis (Belichtung) dargestellt.

2 Methoden

Die Lichtexposition wurde kontinuierlich, 24 Stunden lang, mit einem tragbaren Lichtexpositionsmessgerät (ActTrust, Firma Condor Instruments, Abbildung 1), über eine Arbeitswoche im Winter und im Frühling erhoben. Die Lichtexpositionsmessgeräte wurden vor dem Einsatz in der Feldstudie im Optiklabor der BAuA kalibriert.



Abbildung 1: Lichtexpositionsmessgerät – ActTrust der Firma Condor Instruments

Die Studienteilnehmer/innen übten eine Vollzeitbeschäftigung aus. In einem Vorgespräch wurden sie über die Ziele der Studie informiert sowie über die datenschutzrechtlichen Aspekte, die Datenspeicherung und die Verarbeitung der persönlichen Daten aufgeklärt. Die persönlichen Lichtsexpositionsdaten der Studienteilnehmer/innen wurden in anonymisierter Form erhoben und ausgewertet.

Die erhobenen Lichtexpositionsdaten wurden Mithilfe eines Aktivitätstagebuchs ausgewertet, in dem die täglichen Aktivitäten sowohl während der Arbeitszeit als auch in der Freizeit protokolliert wurden. Die gemessene Beleuchtungsstärke wurde über eine Stunde gemittelt, um den stündlichen Mittelwert zu berechnen und damit 24 stündliche Beleuchtungsstärke-Mittelwerte (E_v) pro Arbeitstag zu erhalten.

3 Ergebnisse

Die nachtschichtarbeitenden Kommissionierer/innen begannen ihre Schicht um 22:00 Uhr, die Lehrer/innen ihre Arbeit um 8:00 Uhr und die Gärtner starteten zwischen 6:00 Uhr und 8:00 Uhr. Tabelle 1 stellt die Anzahl der

Studienteilnehmer/innen und die Anzahl der gemittelten Arbeitstage im Winter und im Frühling dar. Für nachtschichtarbeitende Beschäftigten wurden nur die Arbeitstage berücksichtigt, die auf eine vorangegangene Nachtschicht folgten.

Die mittlere stündliche Beleuchtungsstärke der untersuchten Berufsgruppen, erfasst im Winter und im Frühling, ist in den Abbildungen 2a und 2b dargestellt. Die jahreszeitlichen Unterschiede sind gut zu erkennen – im Winter ist die mittlere stündliche Beleuchtungsstärke für alle Berufsgruppen geringer als im Frühling.

Tabelle 1: Anzahl der Studienteilnehmer/innen p (weiblich p_w /männlich p_m) und Anzahl der gemittelten Arbeitstage n im Winter und im Frühling.

Beruf	Jahreszeit	p	p_m	p_w	n
Kommissionierer/innen (Licht zur falschen Zeit)	Winter	6	3	3	15
	Frühling	3	1	2	8
Lehrer/innen (Lichtmangel)	Winter	11	6	5	28
	Frühling	10	5	5	26
Gärtner (Beschäftigte im Freien)	Winter	4	1	3	13
	Frühling	6	1	5	17

Bei nachtschichtarbeitenden Kommissionierer/innen war die mittlere stündliche Beleuchtungsstärke im Winter sehr niedrig und erreichte einen maximalen Wert von 156 lx am Nachmittag um 13:30 Uhr. Im Frühling lassen sich zwei Maxima erkennen, eines am frühen Morgen nach der Arbeitsschicht, wenn sich die Beschäftigten auf dem Weg nach Hause befanden, und das zweite am Nachmittag nach dem Schlafen, beim Erledigen von Einkäufen, Freizeitaktivitäten, o. Ä. Es ist anzumerken, dass die Anzahl der gemittelten Arbeitstage für Kommissionierer/innen im Frühling niedrig war ($n = 8$).

Im Winter zeigte die mittlere stündliche Beleuchtungsstärke der Lehrer/innen zwei Maxima an. Das erste Maximum liegt bei 318 lx und wurde um 10:30 Uhr erreicht. Das zweite Maximum erreichte 310 lx um 13:30 Uhr, wenn die Lehrer/innen auf dem Rückweg von ihrer Arbeit waren.

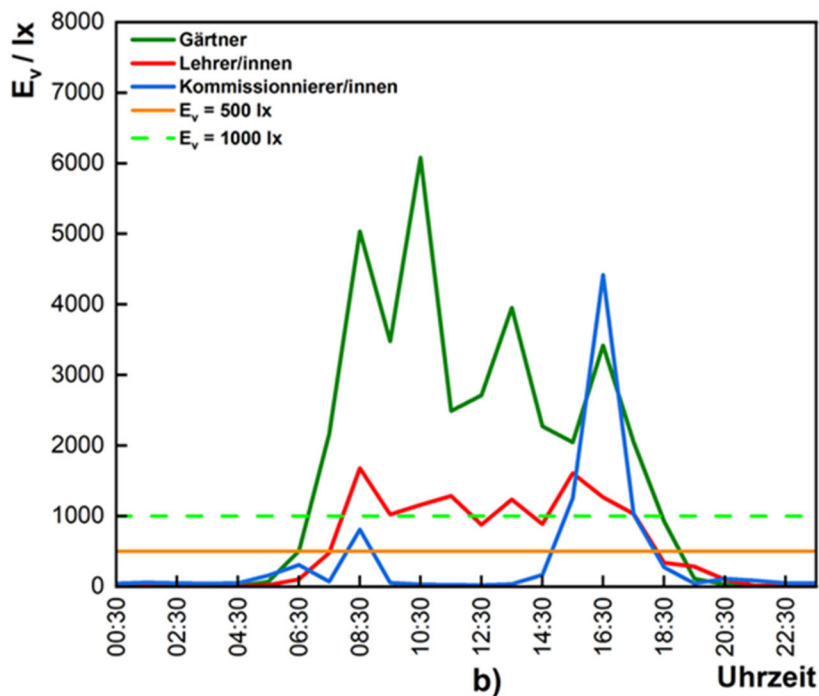
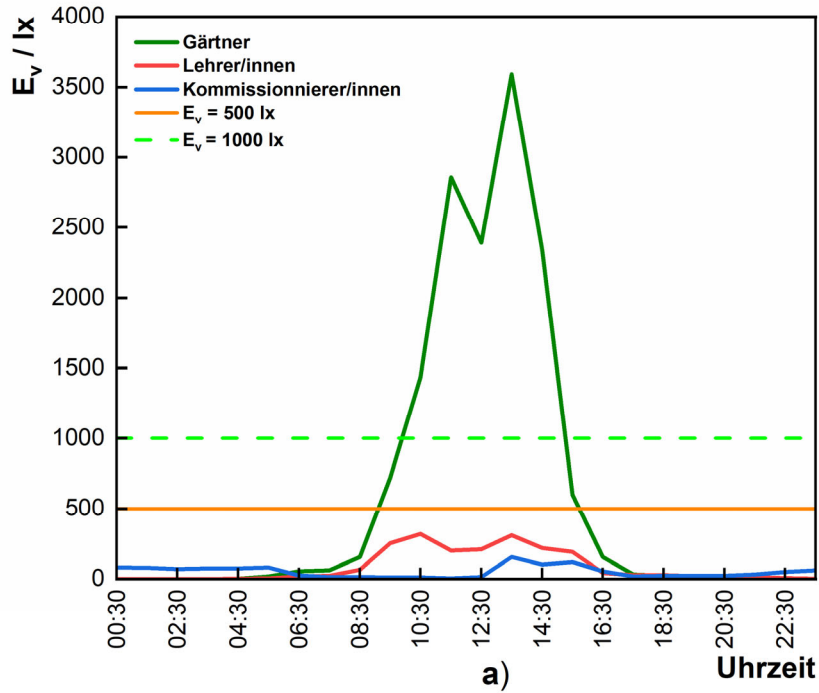


Abbildung 2: Mittlere stündliche Beleuchtungsstärke E_v für nachtschichtarbeitende Kommissionierer/innen, Lehrer/innen und Gärtner, gemessen im **a)** Winter und **b)** Frühling

Im Frühling erscheinen zusätzlich noch zwei weitere Maximalwerte. Der Erste liegt bei 1677 lx um 8:30 Uhr und der Zweite um 15:30 Uhr bei 1604 lx.

Sowohl im Frühling als auch im Winter war die mittlere stündliche Beleuchtungsstärke für die Beschäftigten im Freien – Gärtner – wie erwartet am höchsten. Sie erreichte im Winter einen Maximalwert von fast 3600 lx. Im Frühling erreichte die mittlere stündliche Beleuchtungsstärke gegen Mittag einen Wert von 6080 lx und am Spätnachmittag Werte bis zu 3414 lx.

Die Lichtexposition der Beschäftigten ist in Tabelle 2 als Dosis in Form der Belichtung H_v dargestellt, d. h. als Produkt der Beleuchtungsstärke und der Expositionsdauer. Die Dosis der Lehrer/innen im Winter und im Frühling betrug nur 14 % bzw. 36 % der Dosis der Gärtner. Die entsprechenden Werte für Kommissionierer/innen, die während der Nacht arbeiteten, waren noch niedriger: im Winter nur 8 % und im Frühling 25 % der Dosis, der die Gärtner aussetzt waren

. **Tabelle 2:** Dosis H_v für Kommissionierer/innen, Lehrer/innen und Gärtner im Winter und im Frühling.

Beruf	Jahreszeit	H_v in lx·h	H_v bezogen auf H_v der Beschäftigten im Freien
Kommissionierer/innen (Licht zur falschen Zeit)	Winter	1198	8 %
	Frühling	9217	25 %
Lehrer/innen (Lichtmangel)	Winter	1959	14 %
	Frühling	13387	36 %
Gärtner (Beschäftigten im Freien)	Winter	14442	100 %
	Frühling	37353	100 %

Auch die Expositionsdauer bei bestimmten Beleuchtungsstärken wurde ermittelt:

- geringe Beleuchtungsstärken zwischen (0 - 10) lx, die üblicherweise während der Abendstunden auftreten,
- Beleuchtungsstärken zwischen (10 - 250) lx, die normalerweise in Innenräumen vorherrschen,
- Beleuchtungsstärken zwischen (250 - 1000) lx, die in Innenräumen in Fensternähe vorkommen, und
- Beleuchtungsstärken > 1000 lx, die typischerweise mit einer Tageslichtexposition in Verbindung gebracht werden.

Tabelle 3: Anteile bestimmter Beleuchtungsstärken an der täglichen Lichtexposition im Winter und im Frühling für Kommissionierer/innen, Lehrer/innen und Gärtner.

Beruf	Jahreszeit	Expositionsdauer in min			
		$E_v =$ (0 - 10) lx	$E_v =$ (10 - 250) lx	$E_v =$ (250 - 1000) lx	$E_v >$ 1000 lx
Kommissionierer/innen (Licht zur falschen Zeit)	Winter	214	1208	17	1
	Frühling	4	1095	173	168
Lehrer/innen (Lichtmangel)	Winter	562	771	98	9
	Frühling	455	255	404	326
Gärtner (Beschäftigten im Freien)	Winter	437	524	261	218
	Frühling	453	181	174	632

Im Winter verbringen nachtschichtarbeitende Kommissionierer/innen den Großteil ihrer Zeit, etwa 20 Stunden, unter Beleuchtungsstärken zwischen (10 - 250) lx, das sind ca. 11 Stunden länger als Gärtner. Die entsprechende Expositionsdauer für die Lehrer/innen zwischen (10 - 250) lx beträgt im Winter etwa 13 Stunden.

Im Frühling waren nachtschichtarbeitende Kommissionierer/innen etwa 3 Stunden Beleuchtungsstärken zwischen (250 - 1000) lx ausgesetzt. Die Dauer der Lichtexposition, die Lehrer/innen unter derartigen Lichtverhältnissen verbrachten, betrug im Winter 1,6 Stunden und im Frühling 6,7 Stunden. Bei Gärtnern ist diese Zeit sowohl im Winter als auch im Frühling fast identisch, zwischen 4,4 und 3 Stunden.

Die Beleuchtungsstärke über 1000 lx wird im Winter bei Kommissionierer/innen und Lehrer/innen kaum erreicht. Im Frühling beträgt die entsprechende Expositionszeit etwa 3 Stunden bei Kommissionierer/innen und 5,4 Stunden bei Lehrer/innen. Die Expositionsdauer über 1000 lx für die Gärtner beträgt im Winter und im Frühling 3,6 bzw. 11 Stunden.

4 Fazit

Die Studie zeigt die Abhängigkeit der Lichtexposition der Beschäftigten von der Arbeitszeit, dem Arbeitsort und der Jahreszeit. Die Dauer der Tageslichtexposition ($E_v > 1000 \text{ lx}$) der nachtschichtarbeitenden Kommissionierer/innen ist im Frühling kurz und im Winter kaum vorhanden – verbunden mit den Arbeitszeiten und der Tageslänge. Auch für Lehrer/innen ist die Dosis H_v im Winter im Vergleich zur H_v von im Freien arbeitenden Gärtnern gering. Im Frühling zeigt sich bei Lehrer/innen ein relativ langer Aufenthalt im Freien und eine damit verbundene Tageslichtexposition von mehr als 1000 lx.

Nachtschichtarbeitende Kommissionierer/innen und Lehrer/innen verbringen berufsbedingt den Großteil ihrer Arbeitszeit in Innenräumen. Der Aufenthalt im Freien und die damit verbundene Tageslichtexposition ist meist mit dem Weg zur Arbeit oder nach Hause, und möglicherweise mit einer Mittagspause verbunden. Darüber hinaus schlafen nachtschichtarbeitende Beschäftigte tagsüber. Damit wird auch die Zeit für eine eventuelle Tageslichtexposition erheblich verkürzt, insbesondere im Winter. Sowohl eine geringe Lichtexposition am Tag als auch eine Lichtexposition in der Nacht während Nachtschichten können eine Desynchronisation circadianer physiologischer Prozesse im menschlichen Körper verursachen.

Different Approaches to Optimize High-Definition Matrix Headlights to Improve Computer Vision

Mirko Waldner, Nathalie Müller and Torsten Bertram

Institute of Control Theory and Systems Engineering (RST), TU Dortmund University, Germany

mirko.waldner@tu-dortmund.de

Abstract

The contribution at hand presents and compares different online optimization approaches of dynamic illumination of matrix headlamps to improve automatic object recognition by neural networks. The approaches optimize, on the one hand, the network confidence and, on the other hand, the brightness of the image, the Weber contrast, and the gradient distribution on the image depending on the headlight beam pattern. The evaluation shows no objectively seen best cost function for the scenario studied, and selecting a cost function is a subjective decision. Optimizing the beam pattern to increase the confidence and intersection over union leads to inhomogeneous and subjectively disturbing beam patterns, and using contrast and gradient leads to similar results.

Index Terms: Matrix Headlight, Automated Driving, Optimization

1 Introduction

Automated object detection of traffic objects such as vehicles and pedestrians by computer vision, e.g., with neural networks, is similar to human perception but differs in some aspects, such as the dependence between the contrast of the object to its background and the resulting detection quality [1]. Previous studies have shown that higher contrast caused by stronger illumination of matrix headlights can reduce the quality of automatic recognition by computer vision [1]. Another aspect is that, unlike humans, a detection algorithm can communicate its confidence in the detected objects to the matrix headlight control algorithm faster than humans, enabling online illumination optimizations to maximize recognition quality with minimal energy consumption. Therefore, the different characteristics of automated computer vision and human vision require different and novel offline and online optimization approaches for the dynamic illumination of automotive matrix headlights to maximize traffic safety and system efficiency [2].



An automatic object detection neural network approach, e.g., YOLOv8 [3], has four main outputs: the predicted class of the object, the confidence of this classification, and the size and position of the enclosing bounding box. Fig. 1 shows an example of object detection in a virtual model of the German city of Lippstadt. In offline optimization, as presented in [4], the ground truth properties, e.g., the best bounding box, of the traffic objects are known, and a beam pattern can be optimized for neural networks by minimizing the error between reality and network output. However, in online optimization of dynamic illumination, the ground truth information is missing while driving, so the Generalized Intersection over Union (GioU) [5] and a control error cannot be computed. This paper focuses on the online case.

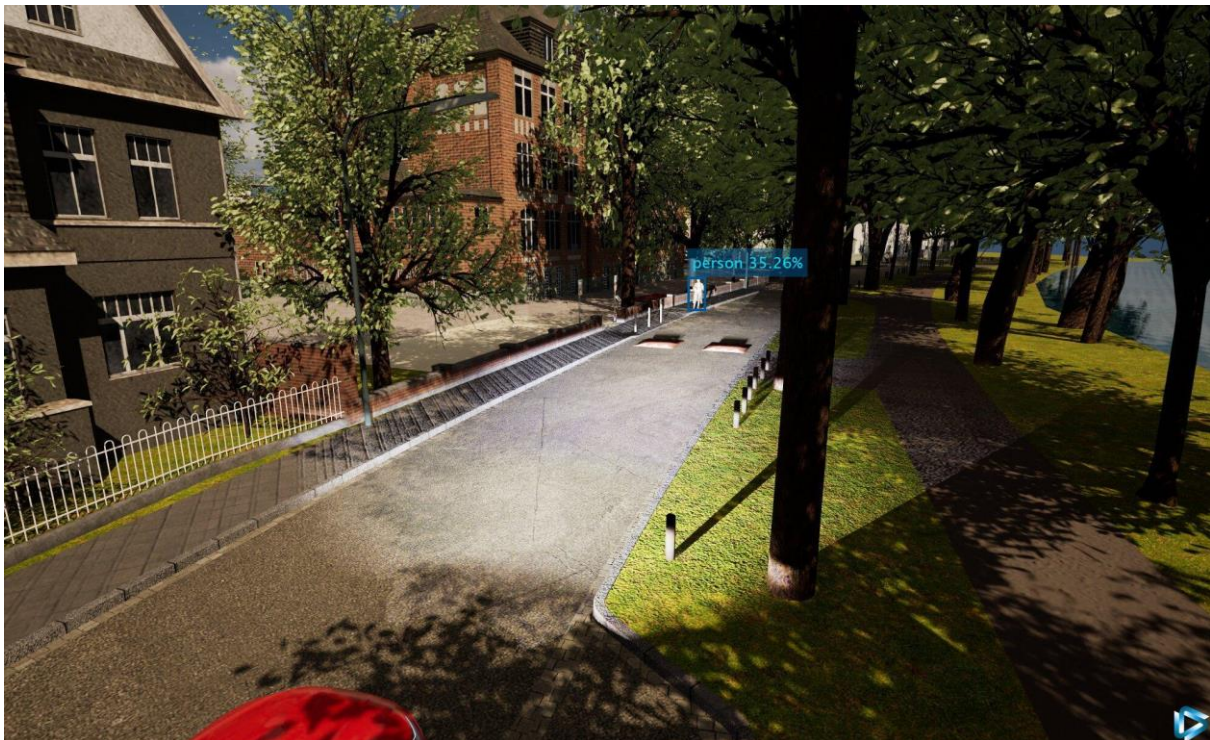


Figure 1: Automated detection of a pedestrian by the YOLOv8 [3] network in a virtual model of the German city of Lippstadt. The object class, confidence and bounding box are shown in blue. The ambient light is day-like only for this image and the ego-vehicle has a normal city light activated. In addition, the pedestrian is marked with a special light beam to remove his camouflage and improve the poor visibility due to the shadows of the leaves.

This contribution presents different novel online optimization approaches, mainly cost functions for high-definition (HD) matrix headlights, and the results are shown and compared. For this purpose, the optimization process is explained in the next chapter, and the possible cost functions are presented. The following evaluation chapter compares the different approaches based on the scenario shown in Fig. 1. A summary and an outlook conclude this paper.

2 Online Optimization of HD Matrix Headlights

One approach to optimize matrix headlights for computer vision is using the provided object detection quantities in a feedback loop. For the online case, this quantity is only the confidence and not the amount of overlap of the true and predicted bounding boxes. Therefore, a possible online optimization function would be to maximize the average confidence of all detected traffic objects [6]. The optimizer chooses the headlight parameters $\mathbf{x} \in \mathbb{R}_{\geq 0 \wedge \leq 1}^{n_p}$, which are the utilizations of the n_p individual light sources called pixels to minimize the cost function. If $c_i(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}_{\geq 0 \wedge \leq 1}$ is the confidence of the i -th object and n_o objects are detected, then the optimization task is to

$$\min_{\mathbf{x}} 1 - \frac{1}{n_o} \sum_{i=0}^{n_o-1} c_i(\mathbf{x}). \quad (1)$$

The advantage of this approach is that calculating the cost value is relatively simple and fast. However, the disadvantage is that the parts of the light distributions that do not illuminate the object and its background and thus do not contribute to its detection are not directly evaluated. Thus, the utilizations of pixels that do not emit light in the objects' direction are irrelevant and can, in principle, be arbitrary. This definition or cost gap can be solved by adding additional terms to (1), such as the energy consumption of the headlamp [6], but this leads to a weighted trade-off between the different aspects, e.g., best detection quality and minimal energy consumption, and can lead to unexpected results, such as the non-illumination of a pedestrian when the weights are set incorrectly.

Another approach is not using the detection results but the camera's color image to calculate the cost value. This method considers the entire beam pattern and is a kind of automatic camera image adjustment by the matrix headlight. The problem is that an HD matrix headlight can simply project the optimal image onto objects that minimize the cost function but do not improve visibility. For example, the scene could consist of only one wall, and the task is to maximize the edges in the image. In that case, the matrix headlamp will likely project a bright checkerboard rather than the optimal dimmed and homogeneous illumination that could make the wall's imperfections visible. The presented solution uses the grayscale image $\mathbf{I} \in \mathbb{R}_{\geq 0 \wedge \leq 1}^{r_1 \times c_1}$ with r_1 rows and c_1 columns from the color image of the camera and compares it with all i -th intensity distributions $\mathbf{I}_{v,i} \in \mathbb{R}_{\geq 0 \wedge \leq 1}^{r_2 \times c_2}$ with r_2 rows and c_2 columns from all n_m light modules of the ego vehicle. The intensity distributions $\mathbf{I}_{v,i}$ of the i -th module is normalized to its intensity maximum $I_{v,\text{Max},i}$ of this module to make it comparable with the grayscale image. The comparison is made by applying the same criteria function $f(\mathbf{I}), f(\mathbf{I}_{v,i})$ to \mathbf{I} and $\mathbf{I}_{v,i}$, and calculating the difference or quotient of the results. This contribution uses division because it is easier for the authors to compare the course of the different cost functions. However, the influence of the choice between subtraction and division

was not further investigated. The general optimization task in this contribution is, with on the parameter vector x depending I and $I_{v,i}$, to

$$\min_x 1 - \frac{n_m f(I(x))}{\sum_{i=0}^{n_m-1} f(I_{v,i}(x))}. \quad (2)$$

The criterion function involves averaging over all rows and columns, so I and $I_{v,i}$ can have a different resolution and number of texture elements (texels). In this contribution, an image pixel is called texel to avoid confusion with the matrix light sources. The complete optimization loop for both approaches is shown in Fig. 2.

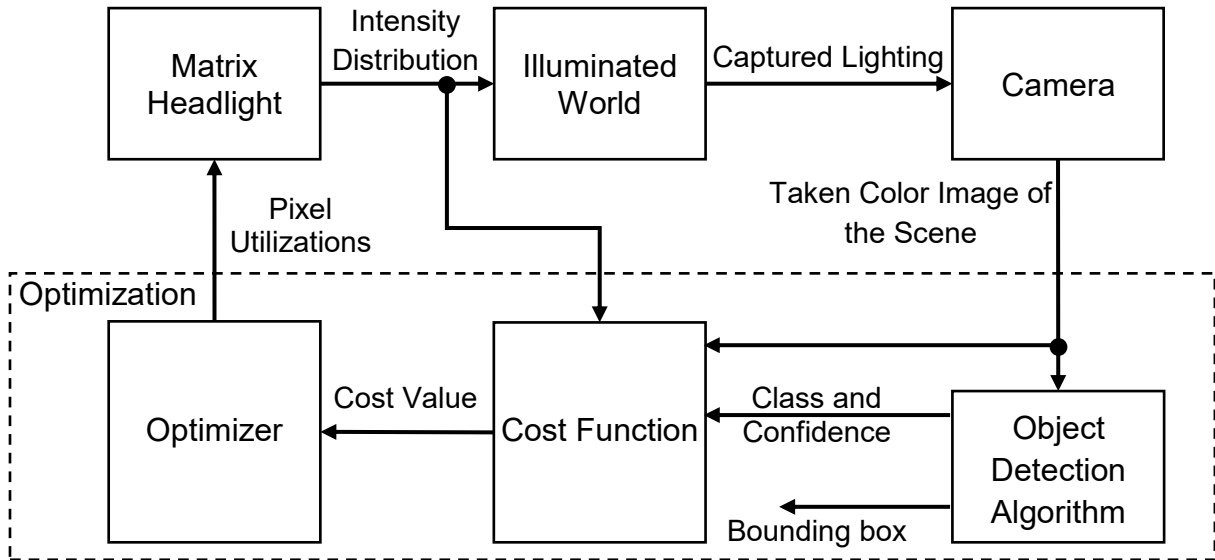


Figure 2: Online optimization loop of the illumination of the matrix headlamp.

Different approaches are possible for the formulation of $f(I)$. Since I and $I_{v,i}$ have the same number type and range of values, $f(I)$ will be formulated only for I in the following but can also be used for $I_{v,i}$. This contribution presents three main ideas: Analyzing the image directly, computing and measuring the Weber contrast [7], and computing and analyzing the image's gradients as a quantity for edge sharpness and homogeneity [8]. The Weber contrast $t_{c,i,j}$ of the texel $t_{i,j} \in \mathbb{R}_{\geq 0 \wedge \leq 1}$ of the i -th row and j -th column of I is

$$t_{c,i,j} = \frac{t_{i,j} - t_{B,i,j}}{t_{B,i,j}}, \quad (3)$$

where $t_{B,i,j} \in \mathbb{R}_{>0 \wedge \leq 1}$ is the background of $t_{i,j}$, more precisely, the average value of the texels surrounding it. It is ensured that $t_{B,i,j}$ is always > 0 to avoid divisions by zero. $t_{B,i,j}$ can be calculated by the discrete convolution of I with the kernel $K_B \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ as $t_{B,i,j} = (K_B * I)[i,j]$ with zero padding around the image. To obtain the background, the kernel is

$$\mathbf{K}_B = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

The horizontal and vertical gradients $t_{GH,i,j} = (\mathbf{K}_H * \mathbf{I})[i,j]$ and $t_{GV,i,j} = (\mathbf{K}_V * \mathbf{I})[i,j]$ of the i -th row and j -th column can also be calculated using discrete convolution and the Sobel operators [9] $\mathbf{K}_H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ and $\mathbf{K}_V \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, which are

$$\mathbf{K}_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ and } \mathbf{K}_V = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

The overall gradient $t_{G,i,j}$ of the i -th row and j -th column is

$$t_{G,i,j} = \sqrt{t_{GH,i,j}^2 + t_{GV,i,j}^2}. \quad (6)$$

Both gradient and contrast are considered possible optimization criteria because they differ for relevant situations. Two of these interesting situations are, for example, a texel surrounded by eight identical texels and uniformly increasing values such as

$$\mathbf{I}_{E1} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix} \text{ and } \mathbf{I}_{E2} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

For the example \mathbf{I}_{E1} , the contrast is $\frac{1-0.1}{0.1} = 9$ and the gradient 0, and for \mathbf{I}_{E2} , the contrast is $\frac{2-2}{2} = 0$, and the horizontal gradient is $4 \cdot 1 - 4 \cdot 3 = -8$. Since both quantities describe changes in brightness and lead to different values, both are considered as possible optimization criteria. The contrast is a kind of relative gradient. To illustrate the differences, Fig. 3 shows an image and the calculated contrasts and gradients of the same scene. One difference is that the lower right edge of the headlamp illumination is more visible in the contrast image than in the gradient image, but the roundness of the tree trunks is better seen at the gradients.



(a) Grayscale original image (b) Grayscale absolute contrast (c) Grayscale absolute gradient

Figure 3: Comparison of a grayscale image with its contrast and gradient distribution.

For the calculation of $f(\mathbf{I}_{v,i})$ the entire $\mathbf{I}_{v,i}$ is used, meaning that the outer texels of $\mathbf{I}_{v,i}$ are all zero. This zero padding ensures that $\mathbf{I}_{v,i}$ becomes brighter at higher intensities, and the outer contrast and gradient increase, even if the beam pattern is entirely homogeneous, so there is some energy consumption penalty in $f(\mathbf{I}_{v,i})$. For an entirely homogeneous beam pattern, the contrast and the gradients are close to zero so that a "good" [8] beam pattern leads to a small $f(\mathbf{I}_{v,i})$, which minimizes the costs of (2).

Several methods can reduce the captured grayscale image and its contrasts and gradients to a single value that can be used in (2). The individual $t_{C,i,j}$ and $t_{G,i,j}$ values themselves form an image with the same resolution $r_1 \times c_1$ as I , but with possible values < 0 and > 1 . Therefore, the following reductions can be applied for all three cases, but for simplicity, the formulas are formulated only for $t_{i,j}$. One approach is calculating the mean absolute value of the image

$$\frac{1}{r_1 c_1} \sum_{i=0}^{r_1} \sum_{j=0}^{c_1} |t_{i,j}|. \quad (8)$$

The mean absolute value is close to zero for a homogeneous beam pattern due to the magnitude calculation for the contrast and gradient case. Another reduction approach is to calculate the variance of the image

$$\frac{1}{r_1 c_1} \sum_{i=0}^{r_1} \sum_{j=0}^{c_1} (t_{i,j} - \bar{t})^2 \quad \text{with} \quad \bar{t} = \frac{1}{r_1 c_1} \sum_{i=0}^{r_1} \sum_{j=0}^{c_1} t_{i,j}. \quad (9)$$

Both approaches yield zero as the minimum for a dark input image that occurs when the headlight is off. Using two reduction methods for the three approaches gives six different ways to calculate the cost value for (2). The possibility of mixing the calculations and using one scheme for the image and another for the intensity distribution of the module is not considered in this contribution.

3 Evaluation of the Usability of the Cost Functions

The quality of automatic object detection generally depends on the selected network and how the detection was learned. It also depends on the objects and the background. For example, we have experienced people of the same size but with different clothing, especially color, giving different results and leading to different confidence values. However, the general recognition behavior under different illumination levels has remained the same in previous studies [1]. Therefore, the course and relationship of the cost values to each other will change slightly for each test scenario or collection of scenarios.

The evaluation scenario chosen in this contribution is the detection of a pedestrian with the standard extra-large YOLOv8x [3] network from Ultralytics under urban environmental conditions. The YOLOv8 model is pretrained by Ultralytics on the COCO dataset, which consists mainly of daylight images. The model was not modified or explicitly trained for this contribution. Fig. 1 shows the daylight illumination scenario, and Fig. 4 shows the camera image for different headlight loads processed by the neural network. An in-house developed matrix headlight simulation based on Unreal Engine 5.1 called "See the Optimal Lighting" (SOL) [10] and its control algorithm [11] are used to generate the camera image, so the test scenario is virtual. The headlight has a horizontal beam angle of $\pm 4^\circ$ and a vertical angle of -1° (down) to 3° (up). The headlight has 16 columns and eight rows, and a pixel has a rectangular shape, a

homogeneous intensity distribution with a maximum intensity of 85,000 cd, and minimal overlap with its neighbors. Examples of the beam pattern can be seen in Fig. 6. The light color is entirely white. The virtual environment model is the Friedrichstraße in Lippstadt (GPS coordinates 51°40'35.7 "N 8°20'11.3 "E) measured and virtually modeled by 3D Mapping Solutions GmbH. The pedestrian is from the Twinmotion Posed Humans Winter Pack 1 by Epic Games. The ambient lighting is 0.3 lx, and the leaves of the trees shade the pedestrian. When the headlights of the ego-person vehicle are disabled, the neural network does not detect the pedestrian.



Figure 4: Camera image for three different headlight utilizations. All pixels are set to the same relative power value, so that the resulting intensity distribution is homogeneous.

This contribution uses a two-step procedure to evaluate the different optimization criteria. In the first step, the intensity distribution of the headlamp is homogeneously changed from 0.01 % to 100 % of its maximum, i.e., all pixels are set to the same utilization value. The resulting beam pattern is almost perfectly homogeneous, with a minimal drop between the illumination of the pixels as in an ideal projector. The resulting behavior of the cost values is shown in Fig. 5. All curves are normalized to their maxima for better comparability, so zero is the minimum for all curves. The GloU [5] is the degree of overlap between the predicted bounding box of the pedestrian and a reference generated using the neural network to detect the object under daylight conditions. A GloU of 1 means a perfect match, 0.5 means 50 % overlap, and the GloU becomes more negative the farther apart the boxes are. To compare the GloU and confidence with the other novel cost functions, they are shown inverted in Fig. 5. Comparing the curves in Fig. 5, three subjectively interesting intervals appear. The first interval ranges from 5 % to 10 % utilization, where the one-minus confidence and GloU curves and the image and gradient variance cost functions have their minimum. As Fig. 4a shows, the pedestrian is clearly visible at this illumination level, and the background is dark. The next region is between 20 % and 30 % utilization, where the confidence and GloU curves do not change much, and the contrast and mean gradient cost functions have their minimum. Here, the person and the background are well illuminated (see Fig. 4b). The third interval begins at about 40 %, where the one minus confidence curve rises sharply. At this point, the scene's illumination is subjectively too intense (see Fig. 4c).

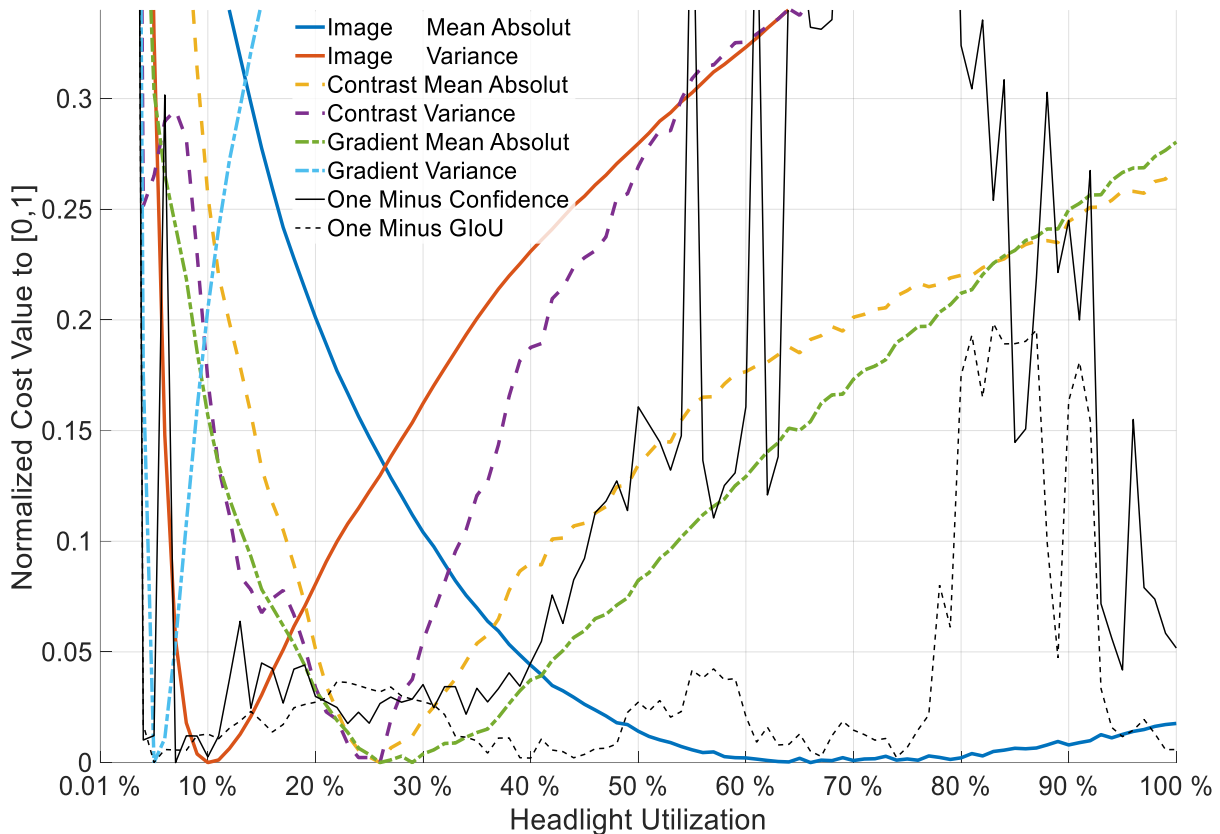


Figure 5: Comparison of the behavior of the colored cost functions and the one minus confidence and GloU curves in black for different headlight utilization rates.

In addition to comparing the curves, the root mean squared error (RMSE) between the cost function curves and the confidence and GloU curves was calculated and is shown in Table 1. According to the calculation, the mean absolute value of the gradient best matches the behavior of the confidence and GloU curves in this test case. However, the variance of the gradient is the worst.

Table 1: Calculation of the Root Mean Squared Error between the cost function curves and the confidence and GloU curve. All curves can be seen in Fig. 5.

Criteria	RMSE to Confidence Curve	RMSE to GloU Curve
Image Mean Absolut	0.2591	0.1820
Image Variance	0.1759	0.2638
Contrast Mean Absolut	0.1538	0.1711
Contrast Variance	0.1565	0.2490
Gradient Mean Absolut	0.1375	0.1306
Gradient Variance	0.4863	0.5992

For the second evaluation, the Matlab particle swarm optimizer [12] is connected to the headlight simulation in Unreal Engine via shared-memory interprocess communication and performs the optimization tasks of (1) and (2). The particle swarm parameters have the default configuration. The lower bound of the parameters is > 0 , the upper bound is one, and the initial population is 100 homogeneous illuminations from 0.01 % to 100 % for all cases. The optimization terminates when either 100 iterations have been performed, or the default criteria are met. In 62.5 % of the cases,

the optimization ends before 100 iterations, and the mean number of iterations required is 83.25. Without the warm start, the optimization would require more iterations. Preliminary research has shown that the warm start does not affect the optimal parameters but only reduces the processing time. The final image taken at the end of the optimization with the optimal parameters and the resulting intensity distribution are shown in Fig. 6.

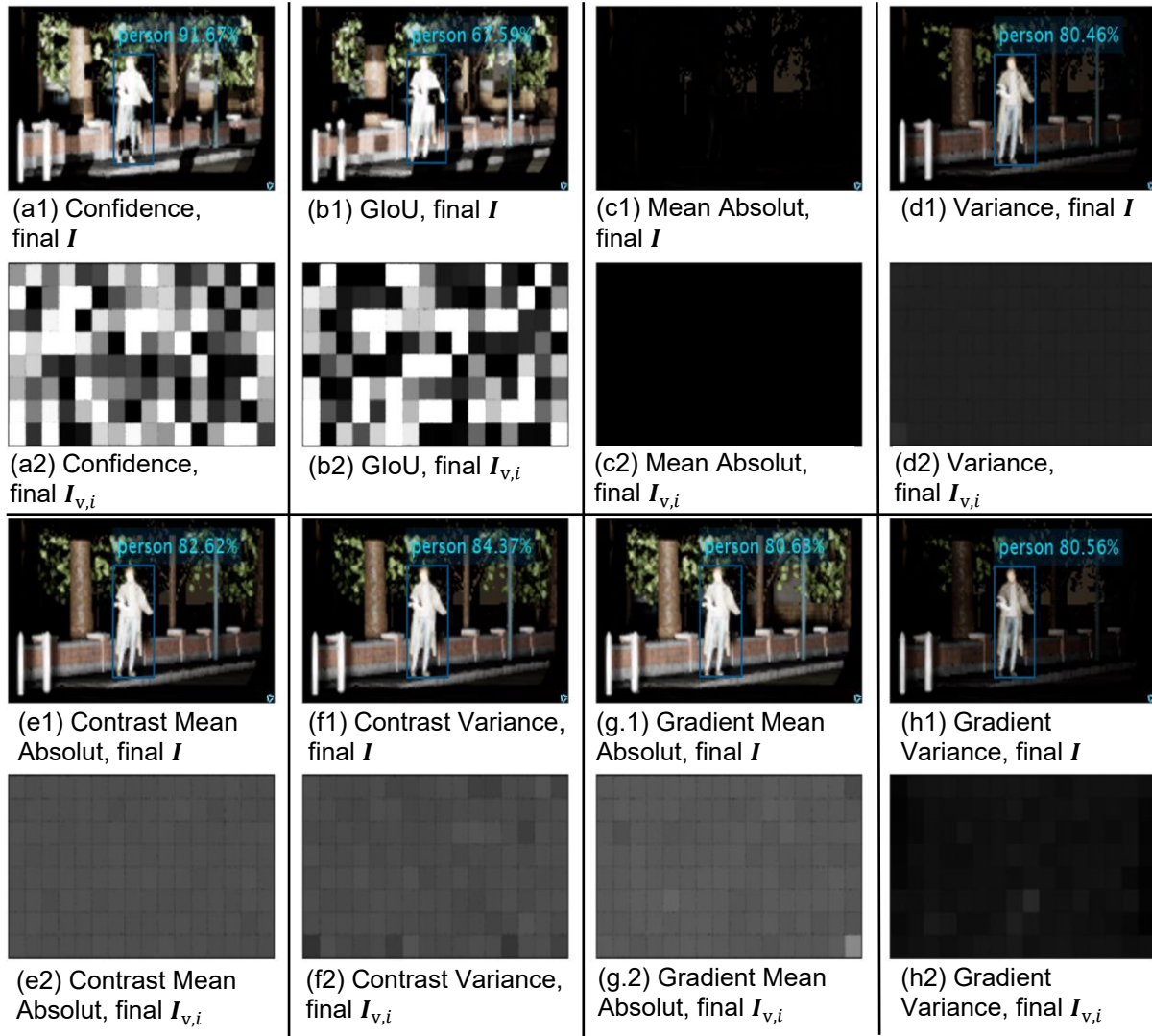


Figure 6: Comparison of final I and $I_{v,1}$ stored after the optimization is finished. The grayscale intensity distributions shown are scaled to 75 % of the possible maximum. The mean utilization for all cases is, in order from (a) to (h), 44.00 %, 40.93 %, 0.00 %, 10.08 %, 23.38 %, 21.99 %, 26.46 %, and 4.84 %.

In the author's opinion, some interesting evaluation results exist, but no clear best cost function exists. The chaotic light distributions (see Figs. 6a2 and 6b2) after optimizing confidence and GloU support the argument from Chapter 2 that using these criteria alone does not result in a subjectively appealing and well-selling matrix headlight light distribution. Also, optimizing the GloU results in the lowest confidence of all cases when the person is detected. Using the mean absolute brightness relative to the brightness of the headlamp results in the optimizer turning off the headlamp so that

only the ambient light is visible in the image (see the house wall in the background of Fig. 6c1). This is because the mean absolute value of $I_{v,i}$ approaches zero only when the headlight gets darker or is almost off, and the other variants can lead to values close to zero for a brighter headlight because the calculation depends on the mean value or the ratios of the pixel neighbors to each other. Therefore, this mean absolute image cost function is not valid. From an objective point of view, all remaining cost functions seem promising for further investigation because the differences in the RMSE in Table 1 and in the shape of the curves in Fig. 5 are too small for the authors. Optimization according to variance seems to result in a darker background and reduce the overexposure of the pedestrian in the foreground. At this point, the cost functions subjectively favored by the authors are the mean of absolute contrast (see Fig. 6e) and gradient (see Fig. 6g) since they have a subjectively good compromise between foreground and background illumination, resulting in homogeneous ray patterns with the lowest RMSEs.

4 Summary & Outlook

The contribution at hand has demonstrated several novel online optimization approaches for dynamic illumination of matrix headlights to improve automatic object recognition by neural networks. The approaches are maximizing the network's confidence, the image's brightness, and the Weber contrast and gradient distribution on the image concerning the headlight pattern. The evaluation shows no objectively seen best cost function in the evaluated scenario. Optimizing the beam pattern to increase the confidence and intersection over the union results in chaotic beam patterns. Using variance appears to result in a darker background, but it subjectively improves the visibility of the internal structure of foreground objects compared to the mean. Using the absolute mean and variance of contrast and slope seem promising for further research, and optimizing the mean brightness should be discarded as it resulted in a deactivated headlight.

In further research, the presented evaluation should be extended to a collection of test scenarios to understand better the behavior of the cost functions and optimization under different conditions. Furthermore, it is planned to consider not only the changes in the contrast level and gradient but also the changes in their direction when formulating the cost function.

5 Acknowledgment

All 3D environment objects, e.g. trees and houses, of this contribution, were created by 3D Mapping Solutions. This work is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action as part of the AHEAD project (grant number: 19A21021C), which is a collaboration with Forvia-Hella and 3D Mapping Solutions. The responsibility for the content of this publication lies with the authors.

6 References

- [1] M. Waldner, N. Müller and T. Bertram: Energy-Efficient Illumination by Matrix Headlamps for Nighttime Auto-mated Object Detection, International Journal of Electrical and Computer Engineering Research, Vol. 2 No. 3 (2022)
- [2] R. Kauschke, M. Waldner, N. Müller, T. Bertram and M. Grünke: Ist automatisiertes Fahren mit kamera-optimierten Lichtfunktionen besser möglich? Top-Down-Entwicklung optimierter Lichtverteilungen für das automatisierte Fahren, 9. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik 2022, 30.06.-01.07.2022
- [3] Ultralytics (Ed.): YOLOv8, <https://github.com/ultralytics/ultralytics>, 2023
- [4] D. Hoffmann, A. Erkan, T. Singer and T. Q. Khanh: Investigation of different influencing parameters on the quality of object detection by camera systems in highly automated vehicles, 14th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL) 2021, 04.-06.04.2022
- [5] H. Rezatofighi, N. Tsoi, J. Gwak, A. Sadeghian, I. Reid and S. Savarese: Generalized Intersection over Union, The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 2019
- [6] N. Müller, M. Waldner and T. Bertram: Virtual Development and Optimization of High-Definition Headlights, 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), 2022
- [7] E. Peli: Contrast in complex images, JOSA A 7.10, 1990
- [8] B. Wördenweber et al.: Automotive lighting and human vision. Vol. 1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- [9] I. Sobel: An Isotropic 3x3 Image Gradient Operator, Presentation at Stanford A.I. Project 1968, 2014
- [10] M. Waldner and T. Bertram: Simulation of High-Definition Pixel-Headlights, 15th International Symposium (ISVC), 2020
- [11] M. Waldner and T. Bertram: Feedforward Control of HD-Headlights for Automated Driving, 14th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL) 2021, 04.-06.04.2022
- [12] Mathworks (Ed.): Particle swarm optimization with the Matlab Global Optimization Toolbox, <https://de.mathworks.com/help/gads/particleswarm.html> , 2023

Towards an optimal pipeline for plant point cloud generation using a low-cost hardware and software approach

Felix Wirth*, Jens Balasus, Antoine Wache, Jill Baldus, Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

*wirth@lichttechnik.tu-darmstadt.de

Summary

Plant phenotyping is a time-consuming task that can be automated with 3D scanning technology. The goal is to create 3D plant point clouds at low cost. Photogrammetry, specifically the structure-from-motion/multi-view stereo (SfM/MVS) method, is particularly suited for this purpose. The method generates 3D point clouds from 2D images by determining and refining camera positions and 3D structures from overlapping images. To completely capture a plant, a turntable and an automated camera system consisting of four 16MP autofocus cameras are developed. An Arduino Uno microcontroller controls the rotating mechanism. The influence of different backgrounds (black, white, gray, cyan, magenta, yellow) is investigated in terms of improving image quality and 3D reconstruction, respectively. For image processing three open-source software are compared and the resulting 3D point clouds are evaluated oriented to the VDI 2634/1 guideline.

Index Terms: 3D point clouds, phenotyping, Structure-from-Motion, SfM, CMYK

1 Intro

Digital phenotyping has gained popularity in plant research due to advances in computer vision, remote sensing, and robotics[1]. The popularity stems from the capabilities gained in the form of determining topological and physiological plant traits. Determination of these traits are time and labor intensive tasks, which are also considered as bottlenecks in the plant breeding cycle [2]. In this process, there is a possibility to automatically determine architectural and morphological features by segmenting structural parts of 3D point clouds. These point clouds can be generated using 3D scanners, allowing for high throughput non-invasive phenotyping.



3D scanners can be implemented using Time-of-Flight (ToF), LiDAR, Structured Light 3D scanning, photogrammetry, as well as computed tomography (CT) non-contact 3D measurement techniques. [1][3] Successful publications for reconstruction of 3D point clouds exist for ToF [4], Lidar [5] [6], Photogrammetry[7][8][9][10] as well as CT [11]. Therefore, the following criteria are established for the selection of a suitable measurement method:

- High reconstruction quality
- Color information is available in the point cloud
- Cost-effective
- Open source
- Compact design that allows setup in a small laboratory
- Modularity
- Allows research of photometric influence parameters

Considering the reviews of Kochi et al. [1] and Okura [3], Structure-from-Motion (SfM) is selected as a suitable technology, since it allows reconstruction results in the submillimeter range, color information is contained in the created point cloud, as well as a cost-effective implementation with suitable hardware selection. Open source can also be ensured by suitable hardware selection as well as software. The installation space results purely from the plant size to be measured and thus allows a compact setup. Since all components for a SfM based scanner are freely selected, it can be designed for maximum modularity. The camera as the main component of an SfM scanner also allows the exploration of various lighting parameters, such as the choice of light sources and backgrounds.

The most significant disadvantage can be considered to be the costly and time-consuming reconstruction [12] [13]. However, since high throughput is not the goal of the 3D scanner, this disadvantage does not exclude the selection.

SfM reconstructs 3D structures from the projections of a series of overlapping images of the same object. For this purpose, the object is to be photographed from different angles. During the reconstruction, the intrinsic and extrinsic camera parameters of all images are also determined. The reconstruction is done in three parts - starting with the detection and extraction of features from each image, e.g. using the SIFT algorithm (scale invariant feature transform) [14]. These features are compared with each other and checked for geometric correspondence. Finally, a structure and motion reconstruction are performed. [15]

Crucial for good reconstruction results are visible textures in the image, similar exposure environments, high visible overlaps, as well as different viewpoints [16].

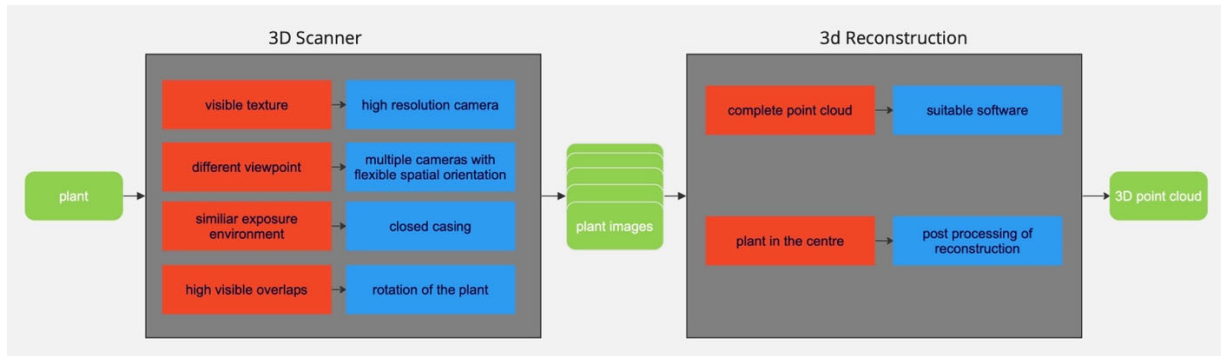


Figure 1: The figure shows the process of creating a 3D point cloud from a real plant. The two main processes are the 3D scanner, which takes the images, and the 3D reconstruction, which reconstructs the point cloud from the various images. The requirements are shown in red and the respective solution approach in blue.

2 Design of the mechanical structure

Since visible features are the most important criterion for good reconstructions, the focus is on selecting a suitable camera. The Raspicam v2 [17], the Arducam 16MP IMX519 Autofocus Synchronized Quad-Camera Kit [18], the Oak-D Lite [19], the Intel RealSense D435 [20] and the ZED 2i [21] are compared. Due to the open-source aspect, the high resolution of 16 megapixels, and the easy integration into a Raspberry Pi 4, the Arducam Quad-Camera Kit was chosen.

The four IMX519 modules are each attached to the aluminum profiles with a bracket as shown in Figure 2b. The developed bracket allows flexible positioning in height and viewing angle. The base shield is placed in the center of the door using an expansion kit [22] (from camera interface MIPI CSI-2 to Ethernet).

For the mechanical frame construction of the 3D scanner the following requirements must be fulfilled: The reconstructions should be possible for plants as they are used at the department of Adaptive Lighting Systems and Visual Processing (cucumbers, basil, lettuce, soy). Therefore, a plant with a size of at least 80 cm and a diameter of 30 cm should find place inside the scanner. Furthermore, a flexible positioning of different light sources and camera types as well as their variable spatial orientation should be possible. Finally, the measurements should be able to take place under defined lighting conditions. Therefore, a corpus consisting of aluminum profiles with the dimensions 50x100x56 cm is designed. The outer walls are covered with black MDF to ensure controlled light conditions. The construction is shown in figure 2a.

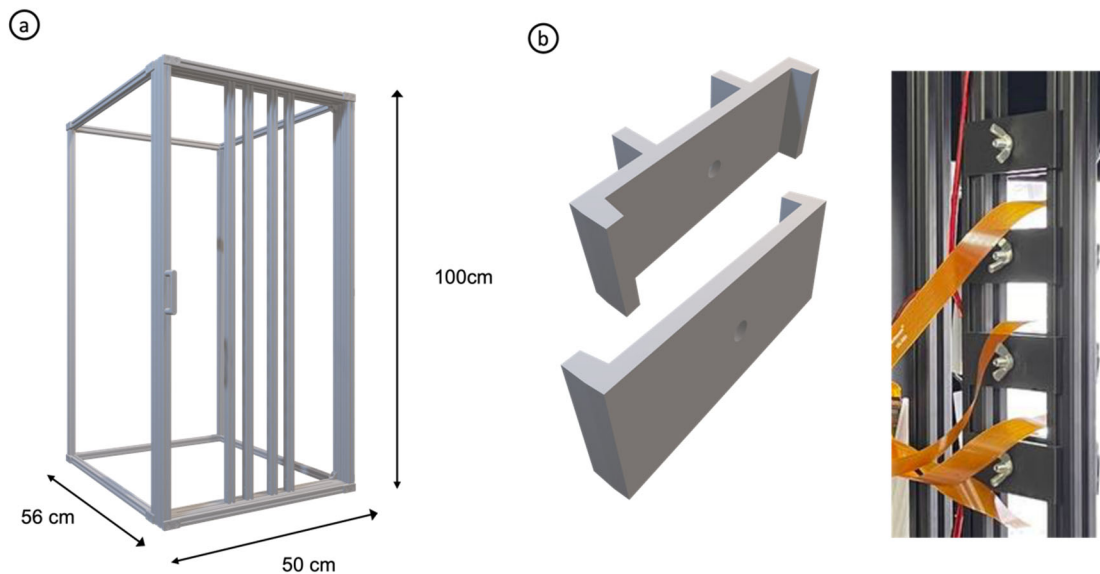


Figure 2: The picture shows the housing of the 3D scanner, which is made of aluminum profiles. The main dimensions are 50x100x56 cm. The bottom, lid, as well as the side parts are covered with black MDF (not shown here). The front view shows a door, in which cameras as well as lighting are integrated. In b the clamp construction is shown, with which flexible positions of the camera can be adjusted.

To meet the requirement of different overlapping images, different arrangements between camera and object are conceivable, defined in [23] as forward intersection, backward intersection, and combination of both. The former describes a method in which images are captured with multiple fixed cameras, while in backward intersection the image capture is performed with a single, moving camera in space. Both approaches can be combined. In this work it is decided to work with cameras in fixed positions and let the object rotate. For this purpose, a turntable based on a NEMA-17 stepper motor driven by an Arduino Uno microcontroller is developed. The housing is made of 3D-printed parts. A countersink is integrated into the lid to reproducibly align the plant rotationally symmetrically (see Figure 3b). A pot is designed to match this sink, in which the plants can be positioned for camera shots. This pot has a defined opening for the shoot axis to enable the best possible defined placement of the shoot of the first rank and to minimize any movement of the plant during the measurement.

To integrate additional features into a set of images, noise function-based patterns (NFP) can be placed in the scene. This is especially useful for adding a detectable pattern to white, black, or texture-less surfaces to improve reconstruction. In [24], wavelet noise was elaborated as a suitable pattern for improving photogrammetric reconstructions. In this work, the use of a cork background as another feature source is also tested. (see Figure 4)

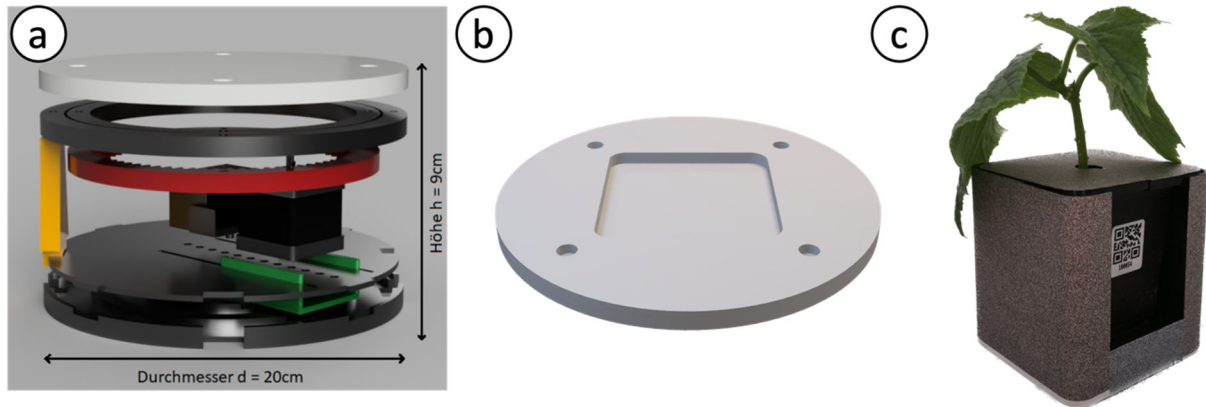


Figure 3 Figure 3a shows the 3D model of the turntable. The base is composed of two plates, with the motor carriage (green) placed between them. To the left of the motor is the fixing component, which prevents the motor from radial slipping. In yellow is shown one of the four supports on which the slewing ring is mounted. In red is the outer gear (inner gear not shown) and on the top of the slew ring is the disk in white. 3b shows the top of the lid including the sink for the pot, which itself can be seen in 3c. The pot is 3D printed and coated with a wavelet pattern. Image source 3a: A. Wache, Bachelor thesis, 2022, 3c: J. Baldus, Bachelor thesis, 2023

To avoid prominent shadows, which can lead to noise during reconstruction, uniform, diffuse lighting is used. Furthermore, the light source should not be recognizable in the image recordings. Placements of light sources from the direction of the camera, spatially oriented to the left and right of the camera, have become established [10] and are also used in this setup. Specifically, LUXEON SunPlus 2835 Horticulture-White LEDs from Lumileds are used, 12 of which can be aligned linearly on each side at different beam angles. The power supply to the LEDs can be varied and thus adapted to the camera system and the plant.

3 Selection of reconstruction programs

In order to generate 3D point clouds from the camera images, a suitable algorithm must be selected. For the selection no commercial software is considered, but only open source developments. COLMAP [25], VisualSfM [26] and Meshroom [27] are identified as suitable programs. In order to enable a targeted comparison, the variable parameters background, turntable surface, brightness, number of shots and angle & position of the cameras are kept equal for a shot. The evaluation criteria are total number of points, number of points of the plant, optical completeness, runtime, and outliers/error reconstruction. Optical completeness is a qualitative evaluation criterion which refers to holes, distribution of points and completeness of the edge. The details are shown in Table 1.

Table 1: The table summarizes the evaluation criteria for the visual completeness of a plant point cloud.

Rating	Poor	Sufficient	Satisfactory	Good	Very good
Density	Elementary parts missing	Many holes larger	Holes in a few places	Hardly holes	No holes
Edge	Partly absent	gaps	largely complete	Almost complete	complete

Exemplary images are shown in figure 4 a-c. The influencing parameters chosen here are red background, cork plate, and 80 exposures. The results of the reconstructions are shown in Figure 4 d-f and evaluated in Table 2. A complete list of all influencing factors tested can be found in the appendix.

As can be seen in the figure, VisualSfM and COLMAP are able to achieve good to very good reconstruction results. With Meshroom there are outliers and artifacts in the reconstruction. COLMAP generates by far the most points, which is reflected in the longest reconstruction time. In addition, many points are generated in areas that are not the focus of this work, namely the pot and the plate. A detailed comparison between VisualSfM and COLMAP (see Figure 4g and 4h) shows that COLMAP achieves the more complete point cloud, which is why this software is used for point cloud generation.

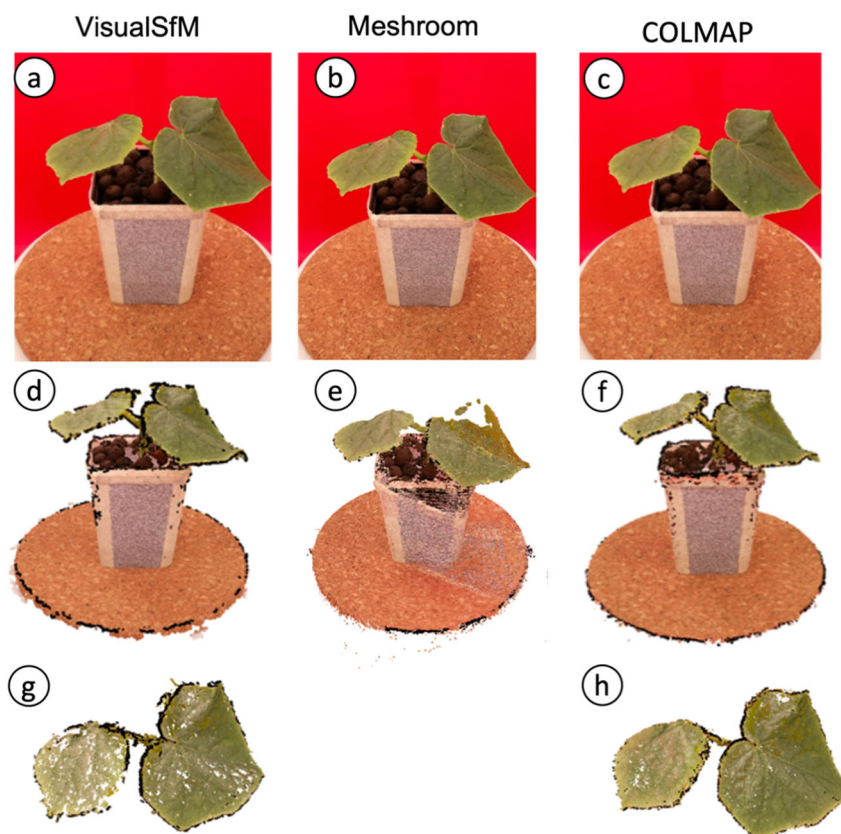


Figure 4: The figure shows the reconstruction results of the VisualSfM, Meshroom and COLMAP software. The exemplary images are created with red background, cork plate, one illumination level with 250mA and 44V, and 80 images. The first row shows a photo image, the second row shows the 3D reconstruction, and the last row shows a detailed view. Since Meshroom performed the worst in terms of quality, a detailed view is omitted here.

Table 2 Comparison of the photogrammetry programs VisualSfM, COLMAP, and Meshroom using 80 images against a red background and cork background. Run times are based on the use of an NVIDIA GeForce GTX 1080 graphics card, Intel® Core™ i5-6600 CPU @ 3.30GHz × 4, and 16Gb RAM.

Criteria/ program	Number of total points	Number of points plant	Completeness	Runtime	Outlier	other
VisualSfM	497.507	73.313	Good	38min	-	
COLMAP	3.031.874	337.380	Very good	2h	-	
Meshroom	305612	4110	Poor	1h30min	X	Fine edge

In order to make a statement about the accuracy of the reconstruction a reference object, which is oriented to the test specimen described in the norm VDI/VDE 2634 [28], is built. Figure 5 shows the comparison of the created reference object, which consists of wooden components and 3D printed connecting parts, and the 3D reconstruction.

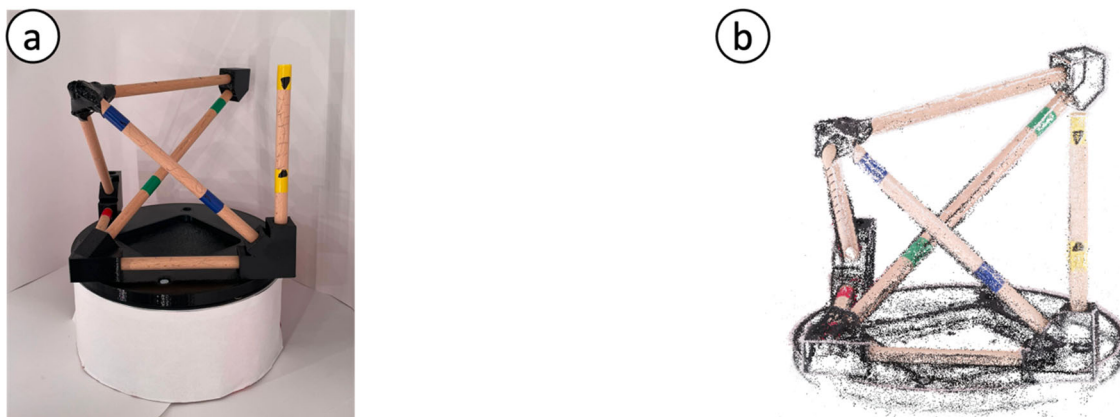


Figure 5: The figure shows the reference object which is based on the test specimen of the VDI/VDE 2634 standard and the reconstruction by the 3D scanner.

To obtain a statement about the local accuracy in millimeters, the arbitrary distances in the point cloud must be set in relation to real objects. The process starts with the calculation of the distances between the certain distinctive colored point pairs within the point clouds (blue, green, yellow etc. marks). A conversion factor is derived from the distance in the point cloud. This is derived from the ratio of the first known measured value (of a manually determined salient point pair) in millimeters to the first calculated Euclidean distance two point pairs. This conversion factor is then used to convert all further distances from salient points into millimeters by multiplying them by the conversion factor. The distances in millimeters obtained in this way can finally be used to calculate the root mean square error (RMSE) and the coefficient of

determination (R^2 value), which are shown in Figure 6. The result is a very good R^2 value of 0.99 and a satisfactory RMSE of 1.32mm.

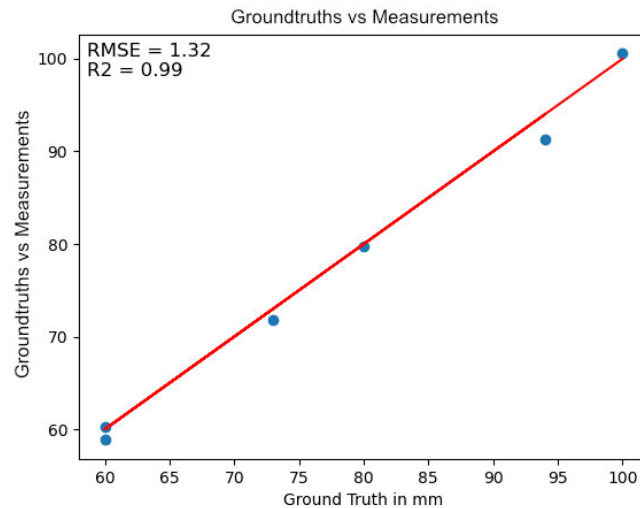


Figure 6 The graph visualizes the local accuracy of the scanner. Based on 6 characteristic distances (marked in color in the reference object) with 5 different lengths, an accuracy in the form of an RMSE of 1.32mm and an R^2 value of 0.99 is achieved.

4 Comparison of different backgrounds

Different backgrounds are tested as an example of a photometric test for the reconstruction quality. The colors of the CMYK color space (cyan, magenta, yellow and black) are selected, plus gray and white. The colors are defined by the spectra in

Figure 7.

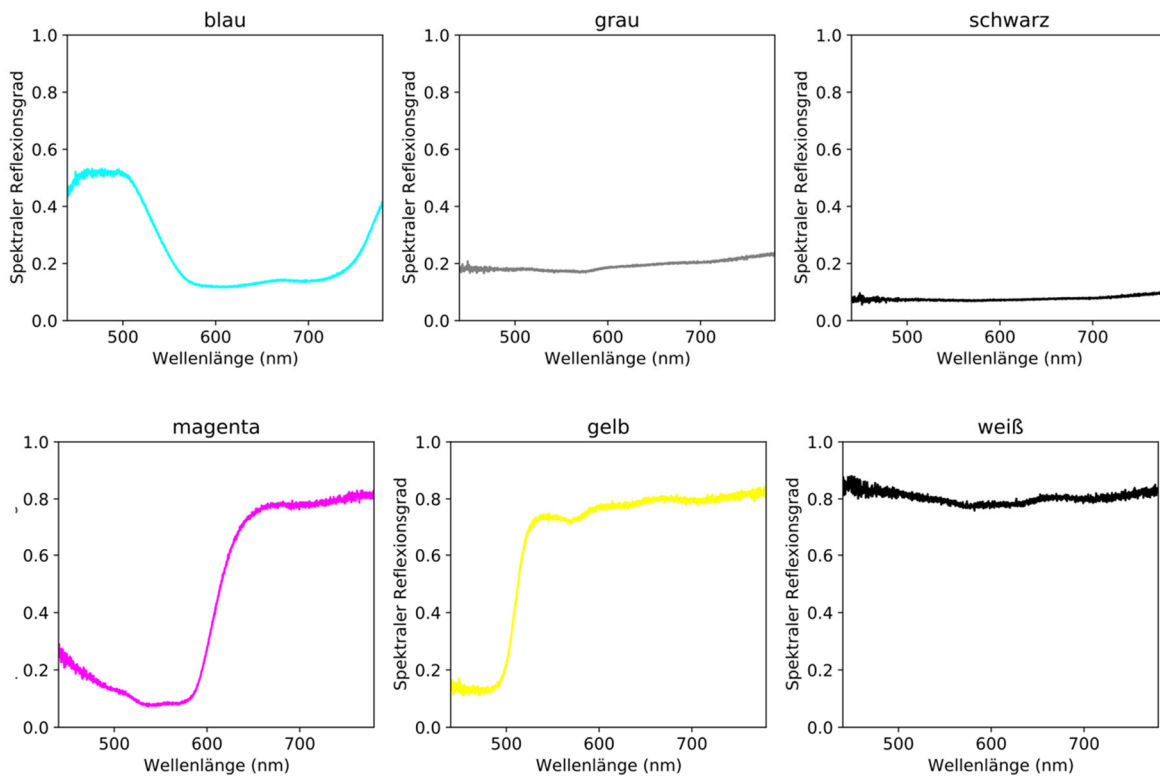


Figure 7: The figure shows the spectral reflectance in the visual range for the six backgrounds used.

The resulting images can be seen in Figure 8. A total of 80 camera shots are taken for each background, consisting of 20 rotations of 18 degrees each and from four different perspectives for each rotation.

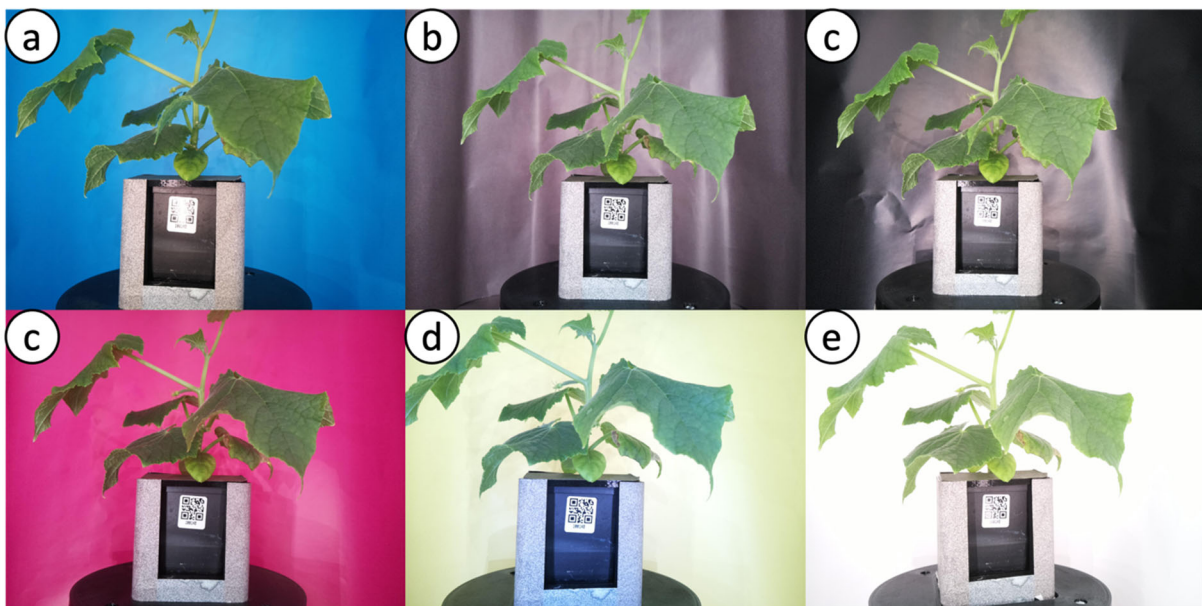


Abbildung 8: The figure shows images of a cucumber plant of the type *Cucumis sativus* in front of different backgrounds. From a-e: cyan, gray, black, magenta, white.

These images are transformed into point clouds using the procedure described in Chapter 3. The results are shown in Figure 9:



Figure 9 The figure shows the reconstruction of the plants with different backgrounds. The arrangement of point cloud to background is analogous to Figure 8.

Primary, it is striking that the reconstruction with gray and black background did not work, which can be attributed to the strong reflections in the background. What is unexpected, however, is that the plant is not reconstructed at all. The reconstructions with the cyan, magenta, yellow and white backgrounds all show very detailed point clouds. What is striking here is the border with the respective background color. In order to better compare the reconstructions, a detailed image of the leaf with rank 5 is shown in Figure 10. The midrib as well as the lateral veins supplying the rest of the leaf tissue are best seen on the reconstruction with the white background. The different shades of green in each point cloud highlight the need for camera calibration for each

background.

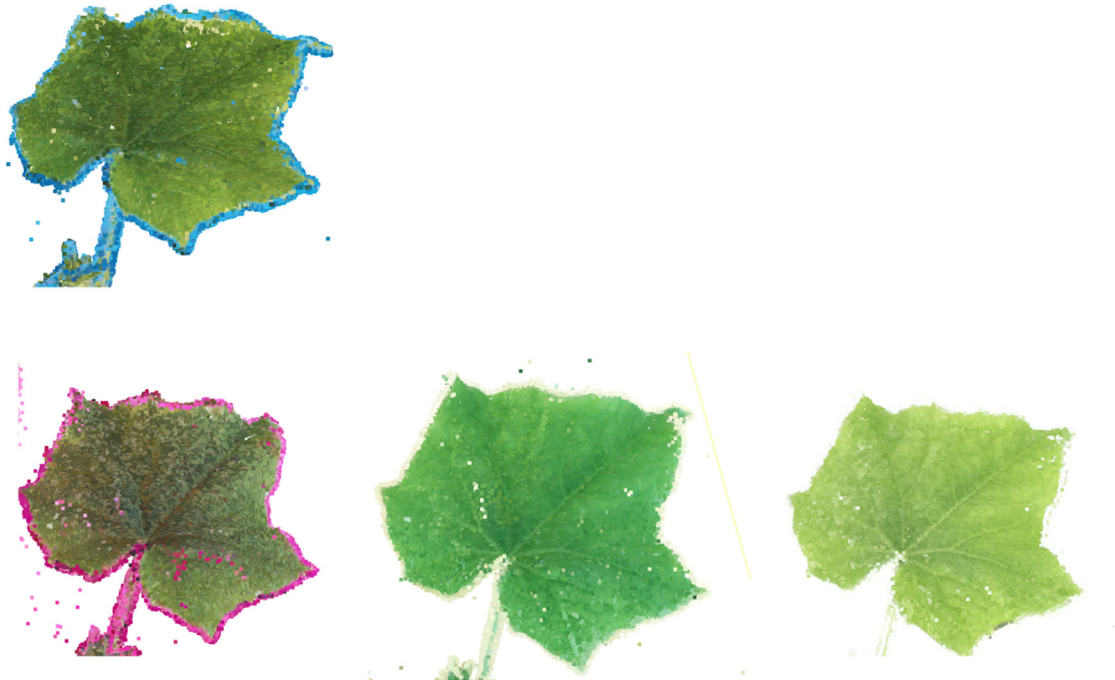


Figure 10: The figure shows the reconstructions of leaves of the fifth rank. The arrangement is analogous to Figure 8. The reconstruction backgrounds for gray and black are empty, since no reconstruction was performed here. The visible prominence of the main vein as well as the secondary veins with white background is clear in comparison to the CMY backgrounds.

5 Conclusion and outlook

As the tests with different colored backgrounds have shown, the choice of background has a great influence on the reconstruction quality. Very good reconstruction results can be achieved with the developed scanner, especially with the white background. The choice of at least 80 images, a pot covered in a wavelet pattern and white background have been shown to be the best option.

In further work on this design, calibrating the cameras as well as adaptive lighting for maximum homogeneity in the background while avoiding over exposure of the plants organs should be considered.

In the long term, the registered wavelengths can also be extended. As Leménager et. al have addressed, photography does not exclusively refer to the visible range. Camera sensors are also capable of recording the UV-A range (320-400 nm) as well as infrared to near-infrared range. This can be used, for example, to reproduce UV-sensitive insect pollination, self-heating flowers, and animal visual systems.[11]

6 References

- [1] N. Kochi, S. Isobe, A. Hayashi, K. Kodama, und T. Tanabata, „Introduction of All-Around 3D Modeling Methods for Investigation of Plants“, 2021.
- [2] P. Song, „High-throughput phenotyping: Breaking through the bottleneck in future crop breeding“, *Crop J.*, 2021.
- [3] F. Okura, „3D modeling and reconstruction of plants and trees: A cross-cutting review across computer graphics, vision, and plant phenotyping“, *Breed. Sci.*, Bd. 72, Nr. 1, S. 31–47, 2022, doi: 10.1270/jsbbs.21074.
- [4] G. Azzari, „Rapid Characterization of Vegetation Structure with a Microsoft Kinect Sensor“, 2013.
- [5] K. Panjvani, A. V. Dinh, und K. A. Wahid, „LiDARPheno – A Low-Cost LiDAR-Based 3D Scanning System for Leaf Morphological Trait Extraction“, *Front. Plant Sci.*, Bd. 10, S. 147, Feb. 2019, doi: 10.3389/fpls.2019.00147.
- [6] M. Forero, H. Murcia, D. Méndez, und J. Lozano, „LiDAR Platform for Acquisition of 3D Plant Phenotyping Database“, 2022.
- [7] J. C. Rose, S. Paulus, und H. Kuhlmann, „Accuracy Analysis of a Multi-View Stereo Approach for Phenotyping of Tomato Plants at the Organ Level“, 2015.
- [8] R. Zhai, Y. Wang, S. Hu, und W. Yang, „4DPhenoMVS: A Low-Cost 3D Tomato Phenotyping Pipeline Using a 3D Reconstruction Point Cloud Based on Multiview Images“, *Plant Biology*, preprint, Nov. 2021. doi: 10.1101/2021.11.09.467984.
- [9] T. Gao *u. a.*, „Novel 3D Imaging Systems for High-Throughput Phenotyping of Plants“, 2021.
- [10] W. T. Salter, A. Shrestha, und M. M. Barbour, „Open source 3D phenotyping of chickpea plant architecture across plant development“, *Plant Methods*, Bd. 17, Nr. 1, S. 95, Dez. 2021, doi: 10.1186/s13007-021-00795-6.
- [11] M. Lemenager, J. Burkiewicz, D. Schoen, und S. Joly, „Studying flowers in 3D using photogrammetry“.
- [12] S. Wu *u. a.*, „MVS-Pheno: A Portable and Low-Cost Phenotyping Platform for Maize Shoots Using Multiview Stereo 3D Reconstruction“.
- [13] A. Paturkar, „Plant trait measurement in 3D for growth monitoring“, 2022.
- [14] D. G. Lowe, „Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints“.
- [15] J. L. Schonberger und J.-M. Frahm, „Structure-from-Motion Revisited“.
- [16] „Tutorial — COLMAP 3.8-dev documentation“. <https://colmap.github.io/tutorial.html> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [17] R. P. Ltd, „Buy a Raspberry Pi Camera Module 2“, *Raspberry Pi*. <https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-v2/> (zugegriffen 15. Juni 2023).

- [18] „16MP IMX519 Autofocus Synchronized Quad-Camera Kit for Raspberry Pi, Nvidia Jetson Nano/Xavier NX“, *Arducam*. <https://www.arducam.com/product/arducam-16mp-imx519-autofocus-synchronized-quad-camera-kit-for-raspberry-pi-nvidia-jetson-nano-xavier-nx/> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [19] „OAK-D Lite – Luxonis“. <https://shop.luxonis.com/collections/oak-cameras-1/products/oak-d-lite-1?variant=42583102456031> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [20] „Intel® RealSense™ Depth Camera D435if“. <https://store.intelrealsense.com/buy-intel-realsense-depth-camera-d435if.html> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [21] „ZED 2i Stereo Camera | Stereolabs Store“. https://store.stereolabs.com/en-de/products/zed-2i?_gl=1*1nxontp*_ga*MTMyODE5MzA2NS4xNjg2Nzg1OTU4*_ga_LQLTWBS792*MTY4Njc4NTk1Ny4xLjAuMTY4Njc4NTk1Ny42MC4wLjA.&_ga=2.93009370.651141088.1686785958-1328193065.1686785958 (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [22] „Cable Extension Kit for RPi Camera Modules V1/V2/HQ/Arducam Series“, *Arducam*. <https://www.arducam.com/product/15-meter-cable-extension-kit-2/> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [23] N. Kochi, A. Hayashi, Y. Shinohara, T. Tanabata, K. Kodama, und S. Isobe, „All-around 3D plant modeling system using multiple images and its composition“, *Breed. Sci.*, Bd. 72, Nr. 1, S. 75–84, 2022, doi: 10.1270/jsbbs.21068.
- [24] A. Koutsoudis, G. Ioannakis, B. Vidmar, F. Arnaoutoglou, und C. Chamzas, „Using noise function-based patterns to enhance photogrammetric 3D reconstruction performance of featureless surfaces“, *J. Cult. Herit.*, Bd. 16, Nr. 5, S. 664–670, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.culher.2015.01.008.
- [25] „COLMAP - Structure-From-Motion and Multi-View Stereo“. <https://demuc.de/colmap/> (zugegriffen 14. Juni 2023).
- [26] „VisualSFM : A Visual Structure from Motion System“. <http://ccwu.me/vsfm/index.html> (zugegriffen 14. Juni 2023).
- [27] *Wooden Lion - Download Free 3D model by AliceVision - Sketchfab*. Zugegriffen: 15. Juni 2023. [Online Video]. Verfügbar unter: <https://sketchfab.com/models/791850b543fe4616b26a08bbc0134bad/embed?autostart=1>
- [28] *VDI/VDE 2634 Blatt 1 - Optische 3D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung*. 2002. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdivde-2634-blatt-1-optische-3d-messsysteme-bildgebende-systeme-mit-punktfoermiger-antastung>

7 Appendix

Table 3: The table shows the tests carried out to determine suitable image numbers, lighting settings and the comparison of cork and wavelet patterns. The findings from the VisualSfM tests in the form of light setting 2 were transferred to the COLMAP tests. Overall, a white background with 80 images and a wavelet pattern turned out to be the best option. The acronyms used are as follows: w - white background, r - red background, a - cropped (images have been cropped to fit only the plant), K - cork background, W - wavelet background, 1,2,3 - various light settings with 1 being the lowest and 3 highest intensity.

VisualSfM

Criteria	Number of total points	Number of plant points	completeness	outlier	other
w K 1 80	415.362	50.298	satisfactory	-	
w K 2 80	447.482	62.270	satisfactory	-	
w K 3 80	415.296	53.491	sufficient	-	
w K 2 160	500.847	73.960	satisfactory	x ca. 1.009	Leaf enlargement
w W 1 80	413.838	57.605	satisfactory	-	
w W 2 80	430.960	58.370	satisfactory	x ca. 171	
w W 3 80	413.219	52.733	sufficient	-	
w W 2 160	708.090	90.700	good	x ca. 1.140	
a W 2 80	321.676	54.792	satisfactory	-	
r K 2 80	497.507	73.313	good	-	Red colors shift

COLMAP

Criteria	Number of total points	Number of plant points	completeness	outlier	other
w K 2 80	2.581.884	169.880	satisfactory	-	
w K 2 160	5.144.729	896.588	Very good	-	
w W 2 80	1.998.919	116.696	sufficient	-	
w W 2 160	5.212.909	1.284.942	Very good	-	
r K 2 80	3.031.874	337.380	Very good	-	Red colors shift

Auf dem Weg zu einer optimalen Pipeline für die Erzeugung von Punktwolken für Pflanzen unter Verwendung eines kostengünstigen Hardware- und Softwareansatzes

Felix Wirth, Jens Balasus, Antoine Wache, Jill Baldus, Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh*

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

**wirth@lichttechnik.tu-darmstadt.de*

Zusammenfassung

Die Phänotypisierung von Pflanzen ist eine zeitaufwändige Aufgabe, die mit 3D-Scannertechnologie automatisiert werden kann. Ziel ist die kostengünstige Erstellung von 3D-Pflanzenpunktwolken. Photogrammetrie, speziell die Structure-from-Motion/Multi-View-Stereo-Methode (SfM/MVS), eignet sich hierzu besonders. Die Methode erzeugt aus 2D-Bildern 3D-Punktwolken, indem Kamerapositionen und 3D-Strukturen aus überlappenden Bildern ermittelt und verfeinert werden. Um eine Pflanze komplett zu erfassen, wird eine Drehscheibe und ein automatisiertes Kamerasystem entwickelt, das aus vier 16MP Autofokus-Kameras besteht. Ein Arduino Uno-Mikrocontroller steuert den Drehmechanismus. Der Einfluss verschiedener Hintergründe (Schwarz, Weiß, Grau, Cyan, Magenta, Gelb) wird im Hinblick auf die Verbesserung der Bildqualität bzw. der 3D-Rekonstruktion untersucht. Zur Bildverarbeitung werden drei Open-Source-Softwares verglichen und die resultierenden 3D-Punktwolken orientiert an der VDI 2634/1 Richtlinie evaluiert.

Index Terms: 3D-Punktwolken, Phänotypisierung, Structure-from-Motion, SfM

1 Einleitung

Digitale Phänotypisierung hat in der Pflanzenforschung aufgrund von Fortschritten in Computer Vision, Remote Sensing und Robotik an Popularität gewonnen [1]. Die Popularität ergibt sich aus den gewonnenen Möglichkeiten in Form der Bestimmung topologischer und physiologischer Pflanzenmerkmale. Die Bestimmung dieser Merkmale sind zeit- und arbeitsintensive Aufgaben, die auch als Engpass im Pflanzenzüchtungszyklus gelten [2]. In diesem Prozess besteht die Möglichkeit, architektonische und morphologische Merkmale automatisch zu bestimmen, indem strukturelle Teile von 3D-Punktwolken segmentiert werden. Diese Punktwolken können mit 3D-Scannern erzeugt werden, was eine nicht-invasive Phänotypisierung mit hohem Durchsatz ermöglicht.

3D-Scanner können mit den berührungslosen 3D-Messverfahren Time-of-Flight (ToF), LiDAR, Structured Light 3D-Scanning, Photogrammetrie sowie Computertomographie (CT) umgesetzt werden. [1][3] Sowohl für ToF [4], Lidar [5][6], Photogrammetrie [7][8][9][10] als auch CT [11] existieren erfolgreiche Veröffentlichung zur Rekonstruktion von 3D Punktwolken. Für die Auswahl eines geeigneten Messverfahrens werden deswegen folgende Kriterien aufgestellt:

- Hohe Rekonstruktionsqualität
- Farbinformation in der Punktwolke vorhanden
- Kostengünstig
- Open Source
- Kompakter Bauraum, der Aufbau in einem kleinen Labor erlaubt
- Modularität
- Erlaubt Forschung lichttechnischer Einflussparameter

Unter Berücksichtigung der Reviews von Kochi et al. [1] und Okura [3] wird Structure-from-Motion (SfM) als geeignete Technologie ausgewählt, da es Rekonstruktionsergebnisse im Submillimeterbereich erlaubt, Farbinformationen in der erstellten Punktwolke enthalten sind, sowie eine kostengünstige Umsetzung bei geeigneter Hardwareauswahl erlaubt. Open Source kann durch passende Hardwareauswahl sowie Software ebenfalls sichergestellt werden. Der Bauraum ergibt sich rein durch die zu vermessende Pflanzengröße und erlaubt damit einen kompakten Aufbau. Da alle Komponenten für einen SfM basierten Scanners frei gewählt werden, kann dieser auf maximale Modularität ausgelegt werden. Die Kamera als Hauptkomponente eines SfM-Scanners erlaubt darüber hinaus die Erforschung verschiedener Lichttechnischer Einflussparameter, wie die Wahl von Lichtquellen und Hintergründen.

Als größter Nachteil kann die aufwendige und zeitintensive Rekonstruktion angesehen werden [12] [13]. Da aber kein hoher Durchsatz mit Hilfe des 3D-Scanners angestrebt wird, schließt dieser Nachteil die Auswahl nicht aus.

SfM rekonstruiert 3D-Strukturen aus den Projektionen einer Reihe von Bildern, welche überlappend die Bilder desselben Objekts zeigen. Dafür soll das Objekt aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen werden. Bei der Rekonstruktion werden darüber hinaus die intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter aller Bilder bestimmt. Die Rekonstruktion erfolgt dabei dreiteilig - beginnend mit der Erkennung und Extraktion von Merkmalen aus jedem Bild, bspw. mit Hilfe des SIFT-Algorithmus (scale invariant feature transform) [14]. Diese Merkmale werden miteinander verglichen und auf geometrische Übereinstimmung geprüft. Abschließend werden eine Struktur und Bewegungsrekonstruktion durchgeführt. [15]

Entscheidend für gute Rekonstruktionsergebnisse sind sichtbare Texturen im Bild, ähnliche Belichtungsbedingungen, hohe sichtbare Überlappungen, sowie unterschiedliche Blickpunkte [16].

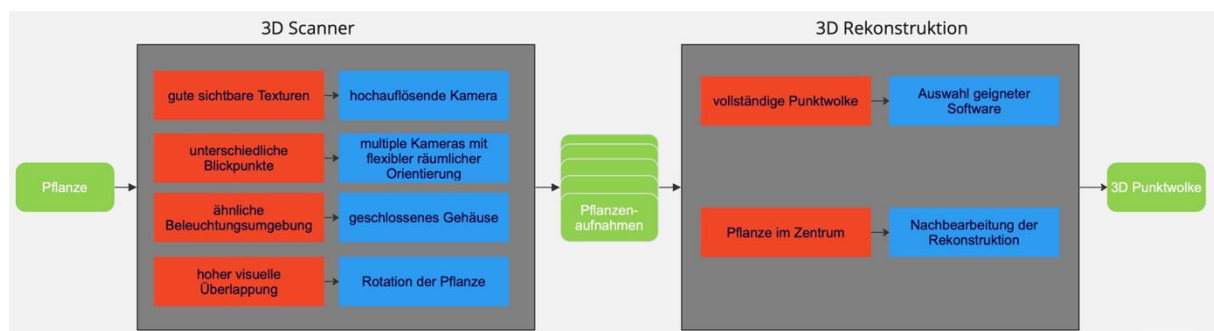


Abbildung 1: Die Abbildung zeigt den Entstehungsprozess einer 3D-Punktwolke aus einer realen Pflanze. Die beiden Hauptprozesse sind der 3D-Scanner, welcher die Aufnahmen macht, sowie die 3D-Rekonstruktion, welche aus den verschiedenen Aufnahmen die Punktwolke rekonstruiert. In Rot sind die Anforderungen und in Blau der jeweilige Lösungsansatz dargestellt.

2 Konzeption des mechanischen Aufbaus

Da sichtbare Merkmale das Kriterium für gute Rekonstruktionen sind, steht die Auswahl einer geeigneten Kamera im Zentrum. Verglichen werden die RaspiCam v2 [17], das Arducam 16MP IMX519 Autofocus Synchronized Quad-Camera Kit [18], der Oak-D Lite [19], der Intel RealSense D435 [20] sowie der ZED 2i [21]. Aufgrund des Open Source Aspekts, der hohen Auflösung von 16 Megapixeln, sowie der einfachen Integration in einen Raspberry Pi 4 fiel die Wahl auf das Arducam Quad-Camera Kit.

Die vier IMX519 Module werden jeweils mit einer Halterung, wie sie in Abbildung 2b zu sehen ist, an den Aluminiumprofilen befestigt. Die entwickelte Halterung ermöglicht eine flexible Positionierung in Höhe und Betrachtungswinkel. Das Basis-Shield wird mit Hilfe eines Erweiterungskits [22] (von Kamera-Interface MIPI CSI-2 auf Ethernet) mittig in der Tür platziert.

Für die mechanische Rahmenkonstruktion des 3D-Scanners gilt es folgende Anforderungen zu erfüllen: Die Rekonstruktionen sollen für Pflanzen möglich sein, wie sie am Fachgebiet Adaptive Lichttechnische Systeme und visuelle Verarbeitung eingesetzt werden (Gurken, Basilikum, Salat, Soja). Weshalb eine Pflanze mit einer Größe von mind. 80 cm sowie einem Durchmesser von 30 cm innerhalb des Scanners Platz finden soll. Des Weiteren soll eine flexible Positionierung von verschiedenen Lichtquellen und Kamertypen, als auch deren variable räumliche Ausrichtung möglich sein. Abschließend sollen die Messungen unter definierten Lichtbedingungen stattfinden können. Es wird deswegen ein aus Aluminiumprofilen bestehender Korpus mit den Maßen 50x100x56 cm gestaltet. Die Außenwände aus schwarzem MDF verkleidet, um kontrollierte Lichtbedingungen sicherzustellen. Die Konstruktion ist in Abbildung 2a dargestellt.

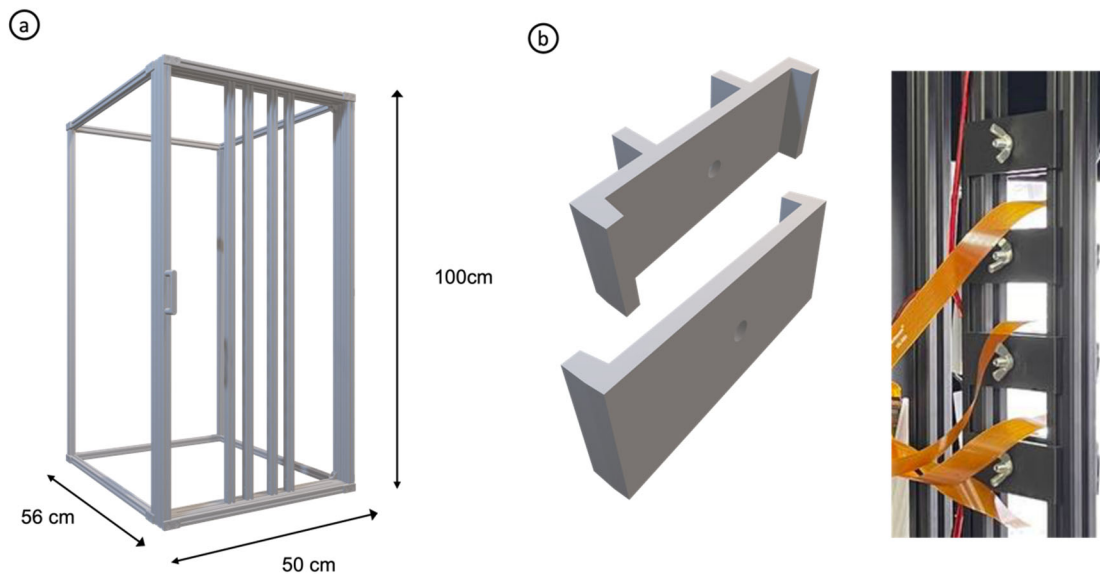


Abbildung 2: Die Abbildung zeigt das Gehäuse des 3D-Scanners, welches aus Aluminiumprofilen besteht. Die Hauptmaße sind 50x100x56 cm. Der Boden, Deckel, sowie die Seitenteile sind mit schwarzem MDF verkleidet (hier nicht zu sehen). Die Frontansicht zeigt eine Tür, in die Kameras sowie Beleuchtung integriert sind. In b ist die Klemmenkonstruktion gezeigt, mit der flexible Positionen der Kamera eingestellt werden können.

Um die Anforderung an verschiedene überlappende Aufnahmen zu erfüllen, sind unterschiedliche Anordnungen zwischen Kamera und Objekt denkbar, die in [23] als Forward Intersection, Backward Intersection und Kombination aus beidem definiert werden. Ersteres beschreibt ein Verfahren bei dem Bilder mit mehreren fixierten Kameras aufgenommen werden, während die Bilderfassung bei der Backward Resection mit einer einzigen, beweglichen Kamera im Raum stattfindet. Beide Ansätze können kombiniert werden. In dieser Arbeit wird entschieden mit Kameras in festen Positionen zu arbeiten und das Objekt rotieren zu lassen. Zu diesem Zweck wird ein Drehteller auf Basis eines NEMA-17 Schrittmotors, welcher von einem Arduino Uno-Mikrocontroller angetrieben wird, entwickelt. Das Gehäuse besteht aus 3D-gedruckten Teilen. In den Deckel wird eine Einsenkung integriert, um die Pflanze reproduzierbar rotationssymmetrisch ausrichten zu können (s. Abbildung 3b). Passend zu dieser Einsenkung wird ein Topf gestaltet, in dem die Pflanzen für die Aufnahmen positioniert werden können. Dieser hat eine definierte Öffnung für die Sprossachse, um eine bestmöglich definierte Platzierung des Sprosses des ersten Ranges zu ermöglichen, sowie etwaige Bewegungen der Pflanze während der Messung zu minimieren.

Um zusätzliche Features in ein Set von Bildern zu integrieren, können auf Rauschfunktionen basierende Muster bzw. „noisefunction-based pattern“ (NFP) in der Szene platziert werden. Dies ist insbesondere hilfreich um weiße, schwarze oder texturarme Oberflächen mit einem detektierbaren Muster auszustatten und die Rekonstruktion damit zu verbessern. In [24] wurde Wavelet-Rauschen als geeignetes Muster für die Verbesserung von photogrammetrischen Rekonstruktionen herausgearbeitet. In dieser Arbeit wird außerdem die Verwendung eines Kork-Untergrunds als weitere Merkmalsquelle getestet. (s. Abbildung 4)

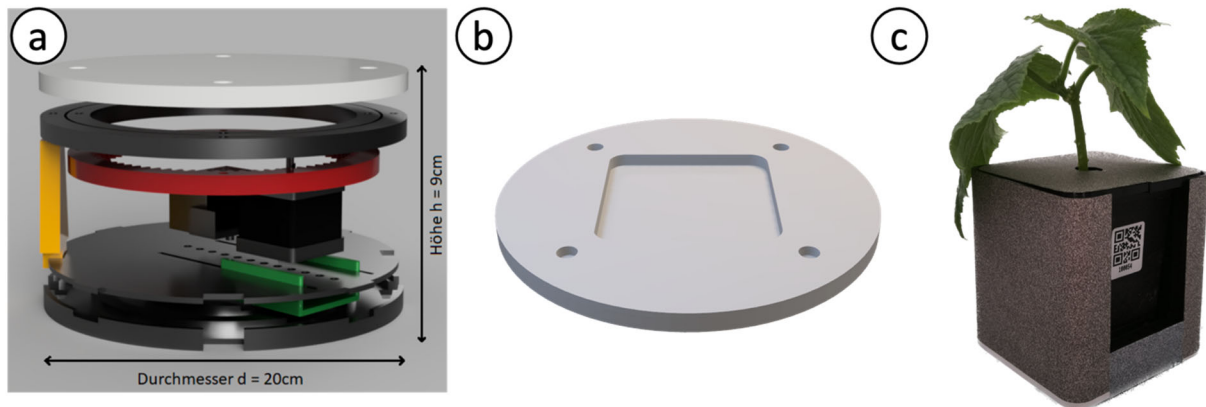


Abbildung 3 Die Abbildung 3a zeigt das 3D-Modell des Drehtellers. Der Boden ist zusammengesetzt aus zwei Platten, dazwischen ist der Motorschlitten (grün) platziert. Links neben dem Motor befindet sich die Fixierkomponente, welche den Motor vor radialem Verrutschen abhält. In Gelb dargestellt ist eine der vier Stützen, worauf der Drehkranz montiert ist. In Rot ist das äußere Zahnrad zu sehen (innere nicht dargestellt) und auf der Oberseite des Drehkranzes ist der Teller in Weiß zu erkennen. 3b zeigt die Oberseite des Deckels inklusive der Einsenkung für den Topf, welcher wiederum in 3c zu sehen ist. Der Topf ist 3D gedruckt und mit einem Wavelet Muster beschichtet. Bildquelle 3a: A. Wache, Bachelorarbeit, 2022, Bildquelle 3c: J. Baldus, Bachelorarbeit, 2023

Um markante Schatten zu vermeiden, welche bei der Rekonstruktion zu Rauschen führen können, wird eine gleichmäßige, diffuse Beleuchtung eingesetzt. Des Weiteren sollen die Lichtquelle in den Bildaufnahmen nicht erkennbar sein. Platzierungen der Lichtquellen aus der Richtung der Kamera, räumlich links und rechts neben der Kamera orientiert, haben sich etabliert und werden in diesem Aufbau verwendet [10]. Konkret kommen LUXEON SunPlus 2835 Horticulture-White LEDs von Lumileds zum Einsatz, wovon 12 Stück linear an jeder Seite in verschiedenen Abstrahlwinkeln ausgerichtet werden können. Die Bestromung der LEDs kann variabel erfolgen und damit an das Kamerasystem und die Pflanze angepasst werden.

3 Auswahl der Rekonstruktionsprogramme

Um aus den Kameraaufnahmen 3D-Punktwolken zu generieren, muss ein geeigneter Algorithmus ausgewählt werden. Für die Auswahl wird keine kommerzielle Software berücksichtigt, sondern ausschließlich Open Source Entwicklungen. Als geeignete Programme werden COLMAP [25], VisualSfM [26] und Meshroom [27] identifiziert. Um einen gezielten Vergleich zu ermöglichen, werden bei einer Aufnahme die variablen Parameter Hintergrund, Untergrund, Helligkeit, Anzahl der Aufnahmen und Winkel & Position der Kameras gleichgehalten. Als Bewertungskriterien dienen die Anzahl der Punkte gesamt, Anzahl Punkte der Pflanze, optische Vollständigkeit, Laufzeit sowie Ausreißer/ Fehlerrekonstruktion. Optische Vollständigkeit ist ein qualitatives

Bewertungsmerkmal welches sich auf Löcher, die Verteilung der Punkte und die Vollständigkeit des Randes bezieht. Die Details sind der Tabelle 1 entnehmbar.

Tabelle 1: Die Tabelle fasst die Bewertungskriterien für die optische Vollständigkeit einer Pflanzenpunktvolke zusammenfassen

Bewertung	mangelhaft	ausreichend	befriedigend	gut	sehr gut
<i>Dichte</i>	elementare Teile fehlen	viele/größere Löcher	stellenweise Löcher	wenige Löcher	kaum/sehr kleine Löcher
Rand	Teilweise nicht vorhanden	Lückenhaft/unvollständig	Weitestgehend vollständig	Nahezu vollständig	vollständig

Exemplarisch sind Aufnahmen in Abbildung 4 a-c dargestellt. Die hier gewählten Einflussparameter sind roter Hintergrund, Kork-Teller, sowie 80 Aufnahmen. Die Resultate der Rekonstruktionen sind in Abbildung 4 d-f dargestellt und in Tabelle 2 evaluiert. Eine vollständige Liste aller getesteten Einflussfaktoren ist dem Anhang zu entnehmen.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, sind VisualSfM und COLMAP in der Lage gute bis sehr gute Rekonstruktionsergebnisse zu erzielen. Bei Meshroom kommt es zu Ausreißern und Artefakten in der Rekonstruktion. COLMAP generiert mit Abstand die meisten Punkte, was sich in der längsten Rekonstruktionszeit widerspiegelt. Außerdem werden viele Punkte in Bereichen generiert, die nicht im Zentrum dieser Arbeit stehen, nämlich des Topfes und des Tellers. Im Detailvergleich zwischen VisualSfM und COLMAP (s. Abbildung 4g und 4h) zeigt sich, dass COLMAP die vollständigere Punktvolke erzielt, weshalb diese Software für die Erzeugung von Punktwolken verwendet wird.

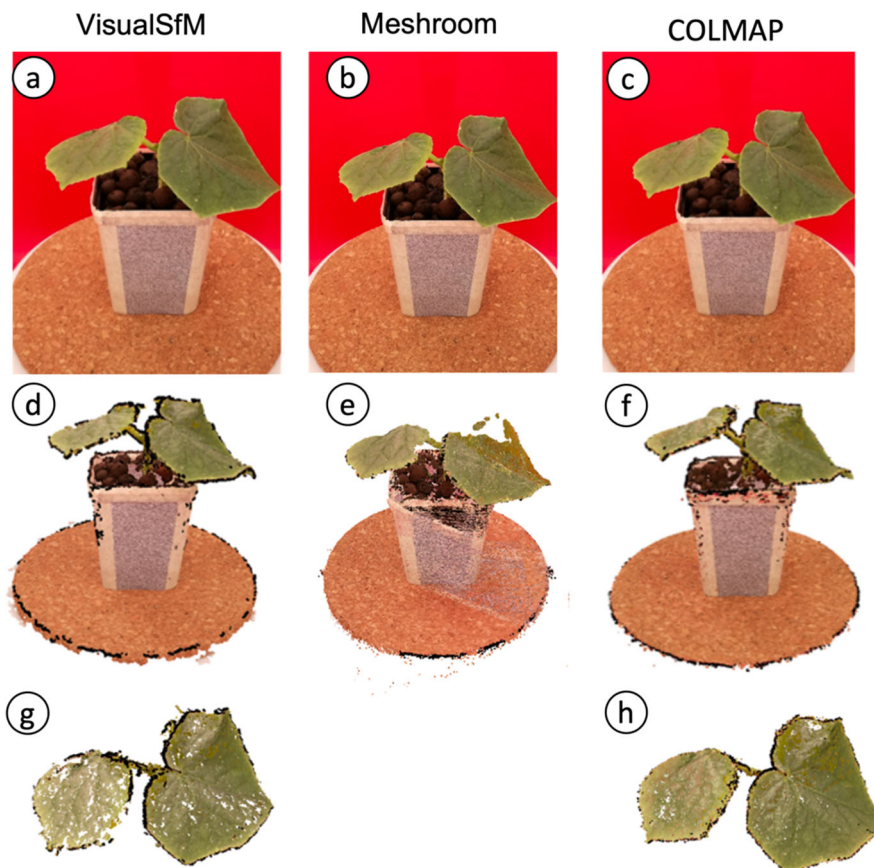


Abbildung 4: Die Abbildung zeigt die Rekonstruktionsergebnisse der Software VisualSfM, Meshroom und COLMAP. Die beispielhaften Aufnahmen werden mit rotem Hintergrund, Kork-Teller, einer Beleuchtungsstufe mit 250mA und 44V, sowie 80 Aufnahmen erstellt. Die erste Zeile zeigt eine Fotoaufnahme, die zweite Zeile die 3D Rekonstruktion und die letzte Zeile eine Detailansicht. Da Meshroom qualitativ am schlechtesten abgeschnitten hat, wird hier auf eine Detailansicht verzichtet.

Tabelle 2 Vergleich der Photogrammetrie-Programme VisualSfM, COLMAP und Meshroom anhand von 80 Aufnahmen vor rotem Hintergrund und Kork-Untergrund. Die Laufzeit beziehen sich auf die Verwendung einer NVIDIA-Grafikkarte GeForce GTX 1080, Intel® Core™ i5-6600 CPU @ 3.30GHz × 4 sowie 16Gb RAM.

Kriterien/ Programm	Anzahl Punkte gesamt	Anzahl Punkte Pflanze	Vollständigkeit Pflanze	Laufzeit	Aus- reißer	Sonstiges
VisualSfM	497.507	73.313	Gut	38min	-	
COLMAP	3.031.874	337.380	sehr gut	2h	-	
Meshroom	305612	4110	Mangelhaft	1h30min	X	Feiner Rand

Um eine Aussage über die Genauigkeit der Rekonstruktion in Bezug auf die örtliche Auflösung zu treffen, wird ein Referenzobjekt nach dem Vorbild des Prüfkörpers der VDI/VDE 2634 [28] angefertigt. Abbildung 5 zeigt den Vergleich aus dem erstellten

Referenzobjekt, welches aus Holzbauteilen und 3D gedruckten Verbindungsteilen besteht und der 3D Rekonstruktion.

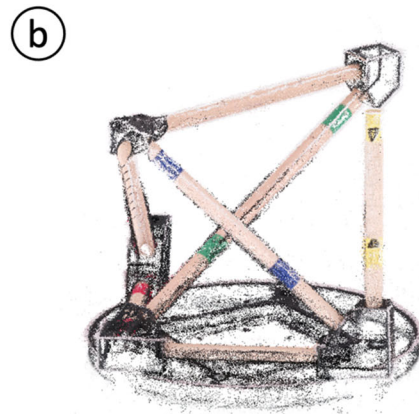


Abbildung 5: Die Abbildung zeigt das Referenzobjekt welches dem Prüfkörper der VDI/VDE 2634 Norm nachempfunden ist und die Rekonstruktion durch den 3D Scanner.

Um eine Aussage über die örtliche Genauigkeit in Millimetern zu erhalten, müssen die arbiträren Abstände in der Punktwolke in Relation zu realen Objekten gesetzt werden. Der Prozess beginnt mit der Berechnung der Distanzen zwischen den bestimmten markanten farblichen Punktpaaren (blaue, rote, grüne etc. Markierung) innerhalb der Punktwolken. Aus der Distanz in der Punktwolke wird ein Umrechnungsfaktor abgeleitet. Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis des ersten bekannten Messwerts (eines per Hand bestimmten markanten Punktpaares) in Millimeter zur ersten berechneten euklidischen Distanz zwei Punktpaare. Mit diesem Umrechnungsfaktor werden dann alle weiteren Distanzen von markanten Punkten in Millimeter umgerechnet, indem sie mit dem Umrechnungsfaktor multipliziert werden. Die so ermittelten Abstände in Millimeter können schließlich für die Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers (Root Mean Square Error, RMSE) und des Bestimmtheitsmaßes (R^2 -Wert), welche in Abbildung 6 dargestellt sind verwendet werden. Es ergibt sich ein sehr guter R^2 -Wert von 0.99 und ein zufriedenstellender RMSE von 1.32mm.

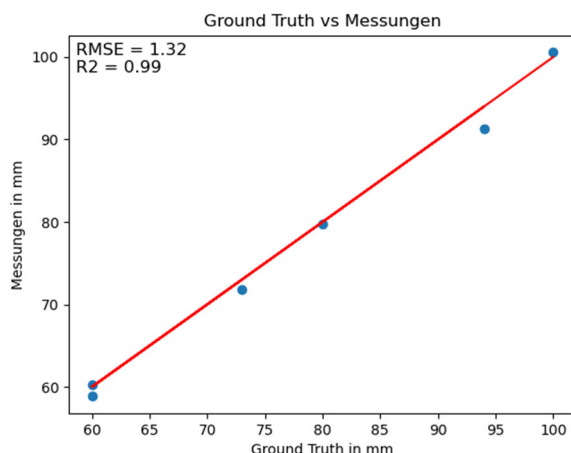


Abbildung 6 Der Graph visualisiert die örtliche Genauigkeit des Scanners. Anhand von 6 charakteristischen Distanzen (in dem Referenzobjekt farbig markiert) mit 5 unterschiedlichen Längen wird eine Genauigkeit in Form von einem RMSE von 1.32mm sowie einem R^2 Wert von 0.99 erreicht.

4 Vergleich verschiedener Hintergründe

Als Beispiel einer lichttechnischen Untersuchung für die Rekonstruktionsqualität werden verschiedene Hintergründe getestet. Dabei werden die Farben des CMYK Farbraumes (Cyan, Magenta, Yellow und Black) gewählt, zusätzlich Grau und Weiß. Die Farben sind durch die Spektren in Abbildung 7 definiert.

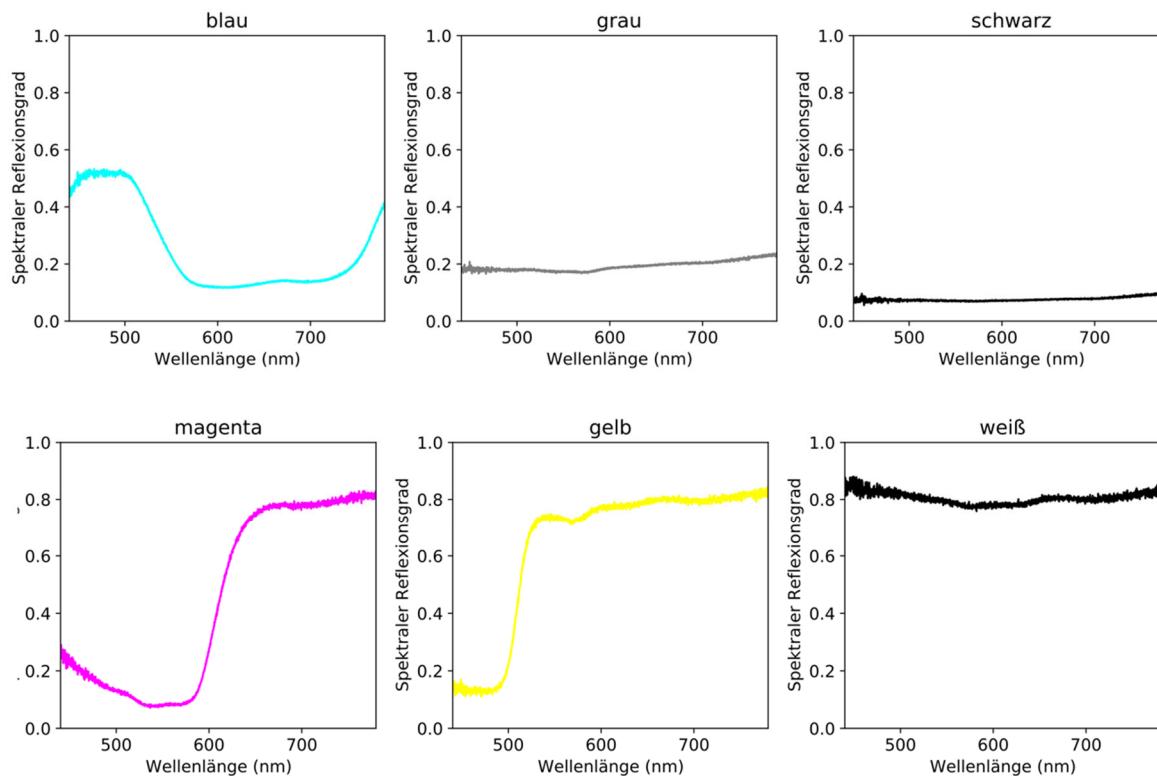


Abbildung 7: Die Abbildung zeigt die spektralen Reflexionsgrade im visuellen Bereich für die sechs eingesetzten Hintergründe.

Die damit resultierenden Aufnahmen sind in Abbildung 8 zu sehen. Insgesamt werden 80 Aufnahmen je Hintergrund gemacht, bestehend aus 20 Drehungen à 18 Grad sowie aus je vier unterschiedlichen Perspektiven pro Drehung.

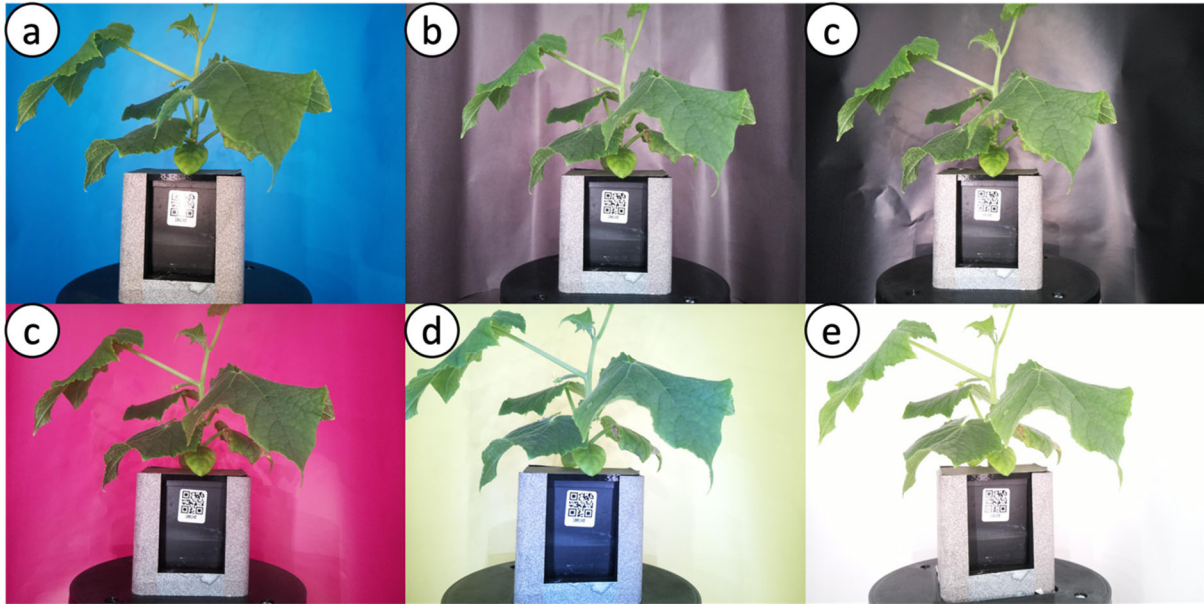


Abbildung 8: Die Abbildung zeigt Aufnahmen einer Gurkenpflanze des Typs *Cucumis sativus* vor verschiedenen Hintergründen. Von a-e: Cyan, Grau, Schwarz, Magenta, Gelb, Weiß

Diese Aufnahmen werden mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren in Punktwolken transformiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt:



Abbildung 9 Die Abbildung zeigt die Rekonstruktion der Pflanzen mit verschiedenen Hintergründen. Die Anordnung von Punktwolke zu Hintergrund ist analog zu Abbildung 8.

Dabei ist zunächst einmal auffällig, dass die Rekonstruktion mit grauem und schwarzem Hintergrund nicht funktioniert hat, was sich auf die starken Reflektionen im Hintergrund zurückführen lässt. Unerwartet ist jedoch, dass die Pflanze gar nicht rekonstruiert wird. Die Rekonstruktionen mit den Hintergründen Cyan, Magenta, Gelb und Weiß zeigen alle sehr detaillierte Punktwolken. Auffällig ist hier die Umrandung mit der jeweiligen Hintergrundfarbe. Um die Rekonstruktion besser vergleichen zu können ist in Abbildung 10 eine Detailaufnahme des Blattes mit Rang 5 dargestellt. Die Mittelrippe sowie die Seitenadern, die das übrige Blattgewebe versorgen sind auf der Rekonstruktion mit dem weißen Hintergrund am besten zu erkennen. Die unterschiedlichen Grüntöne in jeder Punktwolke heben die Notwendigkeit einer Kamerakalibrierung für jeden Hintergrund hervor.

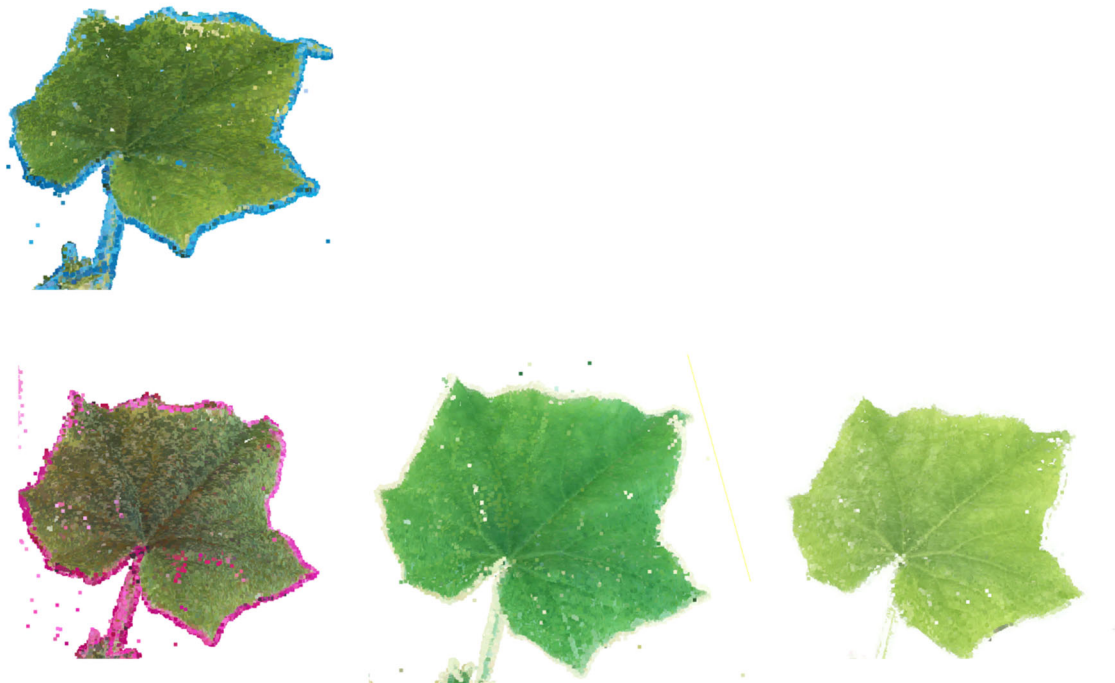


Abbildung 10: Die Abbildung zeigt die Rekonstruktionen von Blättern des fünften Ranges. Die Anordnung ist analog zu Abbildung 8. Freigelassen sind die Hintergründe grau und schwarz, da hier keine Rekonstruktion erfolgt ist. Deutlich wird das sichtbare Hervortreten der Hauptrippe sowie der Nebenadern mit weißem Hintergrund in Vergleich zu den CMY-Hintergründen.

5 Fazit und Ausblick

Wie die Tests mit unterschiedlichen farbigen Hintergründen gezeigt haben, hat die Wahl des Hintergrunds einen großen Einfluss auf die Rekonstruktionsqualität. Dabei können mit dem entwickelten Scanner, insbesondere mit dem weißen Hintergrund, sehr gute Rekonstruktionsergebnisse erzielt werden. Die Wahl von mindestens 80

Bildern, einem mit einem Wavelet Muster beklebten Übertopf sowie weißem Hintergrund hat sich als die beste Variante herausgestellt.

In weiteren Arbeiten an dieser Konstruktion sollte an einer Kalibrierung der Kameras sowie einer adaptiven Beleuchtung für maximale Homogenität im Hintergrund bei gleichzeitiger Vermeidung der Überblendung der Organe der Pflanzen gearbeitet werden.

Langfristig können auch die registrierten Wellenlängen erweitert werden. Wie Leménager et. al adressiert haben bezieht sich Fotografie nicht ausschließlich auf den sichtbaren Bereich. Kamerasensoren sind auch in der Lage den UV-A Bereich (320-400 nm) sowie Infrarot bis Nahinfrarotbereich aufzunehmen. Damit können beispielsweise UV-sensitive Insektenbestäubungen, selbsterhitzende Blüten sowie visuelle Systeme von Tieren nachgebildet werden. [11]

6 References

- [1] N. Kochi, S. Isobe, A. Hayashi, K. Kodama, und T. Tanabata, „Introduction of All-Around 3D Modeling Methods for Investigation of Plants“, 2021.
- [2] P. Song, „High-throughput phenotyping: Breaking through the bottleneck in future crop breeding“, *Crop J.*, 2021.
- [3] F. Okura, „3D modeling and reconstruction of plants and trees: A cross-cutting review across computer graphics, vision, and plant phenotyping“, *Breed. Sci.*, Bd. 72, Nr. 1, S. 31–47, 2022, doi: 10.1270/jsbbs.21074.
- [4] G. Azzari, „Rapid Characterization of Vegetation Structure with a Microsoft Kinect Sensor“, 2013.
- [5] K. Panjvani, A. V. Dinh, und K. A. Wahid, „LiDARPheno – A Low-Cost LiDAR-Based 3D Scanning System for Leaf Morphological Trait Extraction“, *Front. Plant Sci.*, Bd. 10, S. 147, Feb. 2019, doi: 10.3389/fpls.2019.00147.
- [6] M. Forero, H. Murcia, D. Méndez, und J. Lozano, „LiDAR Platform for Acquisition of 3D Plant Phenotyping Database“, 2022.
- [7] J. C. Rose, S. Paulus, und H. Kuhlmann, „Accuracy Analysis of a Multi-View Stereo Approach for Phenotyping of Tomato Plants at the Organ Level“, 2015.
- [8] R. Zhai, Y. Wang, S. Hu, und W. Yang, „4DPhenoMVS: A Low-Cost 3D Tomato Phenotyping Pipeline Using a 3D Reconstruction Point Cloud Based on Multiview Images“, *Plant Biology*, preprint, Nov. 2021. doi: 10.1101/2021.11.09.467984.
- [9] T. Gao u. a., „Novel 3D Imaging Systems for High-Throughput Phenotyping of Plants“, 2021.

- [10] W. T. Salter, A. Shrestha, und M. M. Barbour, „Open source 3D phenotyping of chickpea plant architecture across plant development“, *Plant Methods*, Bd. 17, Nr. 1, S. 95, Dez. 2021, doi: 10.1186/s13007-021-00795-6.
- [11] M. Lemenager, J. Burkiewicz, D. Schoen, und S. Joly, „Studying flowers in 3D using photogrammetry“.
- [12] S. Wu u. a., „MVS-Pheno: A Portable and Low-Cost Phenotyping Platform for Maize Shoots Using Multiview Stereo 3D Reconstruction“.
- [13] A. Paturkar, „Plant trait measurement in 3D for growth monitoring“, 2022.
- [14] D. G. Lowe, „Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints“.
- [15] J. L. Schonberger und J.-M. Frahm, „Structure-from-Motion Revisited“.
- [16] „Tutorial — COLMAP 3.8-dev documentation“. <https://colmap.github.io/tutorial.html> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [17] R. P. Ltd, „Buy a Raspberry Pi Camera Module 2“, *Raspberry Pi*. <https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-v2/> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [18] „16MP IMX519 Autofocus Synchronized Quad-Camera Kit for Raspberry Pi, Nvidia Jetson Nano/Xavier NX“, *Arducam*. <https://www.arducam.com/product/arducam-16mp-imx519-autofocus-synchronized-quad-camera-kit-for-raspberry-pi-nvidia-jetson-nano-xavier-nx/> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [19] „OAK-D Lite – Luxonis“. <https://shop.luxonis.com/collections/oak-cameras-1/products/oak-d-lite-1?variant=42583102456031> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [20] „Intel® RealSense™ Depth Camera D435if“. <https://store.intelrealsense.com/buy-intel-realsense-depth-camera-d435if.html> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [21] „ZED 2i Stereo Camera | Stereolabs Store“. https://store.stereolabs.com/en-de/products/zed-2i?_gl=1*1nxontp*_ga*MTMyODE5MzA2NS4xNjg2Nzg1OTU4*_ga_LQLTWBS792*MTY4Njc4NTk1Ny4xLjAuMTY4Njc4NTk1Ny42MC4wLjA.&_ga=2.93009370.651141088.1686785958-1328193065.1686785958 (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [22] „Cable Extension Kit for RPi Camera Modules V1/V2/HQ/Arducam Series“, *Arducam*. <https://www.arducam.com/product/15-meter-cable-extension-kit-2/> (zugegriffen 15. Juni 2023).
- [23] N. Kochi, A. Hayashi, Y. Shinohara, T. Tanabata, K. Kodama, und S. Isobe, „All-around 3D plant modeling system using multiple images and its composition“, *Breed. Sci.*, Bd. 72, Nr. 1, S. 75–84, 2022, doi: 10.1270/jsbbs.21068.
- [24] A. Koutsoudis, G. Ioannakis, B. Vidmar, F. Arnaoutoglou, und C. Chamzas, „Using noise function-based patterns to enhance photogrammetric 3D reconstruction performance of featureless surfaces“, *J. Cult. Herit.*, Bd. 16, Nr. 5, S. 664–670, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.culher.2015.01.008.

- [25] „COLMAP - Structure-From-Motion and Multi-View Stereo“.
<https://demuc.de/colmap/> (zugegriffen 14. Juni 2023).
- [26] „VisualSfM : A Visual Structure from Motion System“.
<http://ccwu.me/vsfm/index.html> (zugegriffen 14. Juni 2023).
- [27] *Wooden Lion - Download Free 3D model by AliceVision - Sketchfab*. Zugegriffen: 15. Juni 2023. [Online Video]. Verfügbar unter:
<https://sketchfab.com/models/791850b543fe4616b26a08bbc0134bad/embed?autostart=1>
- [28] *VDI/VDE 2634 Blatt 1 - Optische 3D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung*. 2002. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdivde-2634-blatt-1-optische-3d-messsysteme-bildgebende-systeme-mit-punktfoermiger-antastung>

7 Anhang

Tabelle 3: Die Tabelle zeigt die durchgeführten Tests zur Bestimmung geeigneter Bildanzahlen, Beleuchtungseinstellungen sowie dem Vergleich von Kork und Wavelet Muster. Die Erkenntnisse aus den VisualSfM Versuchen in Form der Lichteinstellung 2 wurden für die COLMAP Versuche übertragen. Insgesamt hat sich ein weißer Hintergrund, mit 80 Bildern sowie Wavelet Muster als die beste Variante herausgestellt. Die verwendeten Akronyme sind wie folgt: *w* – weißer Hintergrund, *r* - roter Hintergrund, *a* ausgeschnitten (Bilder

wurden passend zugeschnitten), *K* - Kork-Untergrund, *W* – Waveletuntergrund, 1,2,3 – verschiedene Lichteinstellung mit 1 niedrigste und 3 höchste Intensität.

VisualSfM

Bewertungskriterien/ Parameter	Anzahl Punkte gesamt	Anzahl Punkte Pflanze	Vollständigkeit Pflanze	Ausreißer	Sonstiges
w K 1 80	415.362	50.298	ausreichend	-	
w K 2 80	447.482	62.270	befriedigend	-	
w K 3 80	415.296	53.491	ausreichend	-	
w K 2 160	500.847	73.960	befriedigend	x ca. 1.009	kleines Blatt sehr dick
w W 1 80	413.838	57.605	befriedigend	-	
w W 2 80	430.960	58.370	befriedigend	x ca. 171	
w W 3 80	413.219	52.733	ausreichend	-	
w W 2 160	708.090	90.700	gut	x ca. 1.140	
a W 2 80	321.676	54.792	ausreichend	-	
r K 2 80	497.507	73.313	gut	-	Farbveränderung; Rotstich

COLMAP

Bewertungskriterien/ Parameter	Anzahl Punkte gesamt	Anzahl Punkte Pflanze	Vollständigkeit Pflanze	Ausreißer	Sonstiges
w K 2 80	2.581.884	169.880	befriedigend	-	
w K 2 160	5.144.729	896.588	sehr gut	-	
w W 2 80	1.998.919	116.696	ausreichend	-	
w W 2 160	5.212.909	1.284.942	sehr gut	-	
r K 2 80	3.031.874	337.380	sehr gut	-	Farbveränderung; Rotstich



SCAN ME

URN: [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023200248](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2023200248)



SCAN ME

DOI: [10.22032/dbt.55787](https://doi.org/10.22032/dbt.55787)

Lux junior 2023

16. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs 23. bis 25.6.2023 Dörfeld/Ilm