



## 9. VDI-Fachtagung

# Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik 2022

Karlsruhe, 30. Juni und 01. Juli 2022

Bildquelle: © Karlsruher Institut für Technologie



**VDI-BERICHTE**  
Herausgeber:  
VDI Wissensforum GmbH

## Fachlicher Träger

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Fachbereich Optische Technologien)

Im VDI-Fachbereich Optische Technologien werden ausgewählte Themen dieses Fachgebietes bearbeitet. In Fachausschüssen werden aktuelle Techniken bewertet und auf Ihre Anwendung untersucht. Ergebnisse der Fachausschussaktivitäten sind VDI-Richtlinien und Veranstaltungen.

[www.vdi.de/ot](http://www.vdi.de/ot)

## Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

## Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek (German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

## © VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2022

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuscriptdruck.

Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

E-ISBN 978-3-18-102400-3

ISBN 978-3-18-092400-7

# Inhalt

Vorwort . . . . .	1
-------------------	---

## ► Car2X-Kommunikation

---

Bildgebende Car2Car-Kommunikation mit sichtbarem Licht . . . . .	3
--	---

J. Ziehn, M. Roschani, M. Ruf, D. Brüstle, Fraunhofer IOSB, Karlsruhe;  
M. Helmer, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI), Karlsruhe

Lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle zwischen automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern . . . . .	17
---	----

M. Baumann, M. Helmer, K. Trampert, C. Neumann, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

## ► Hochauflösende Scheinwerfersysteme

---

Verbesserung der kameragestützten Objekterkennung im Straßenverkehr durch nahinfrarote Zusatzbeleuchtung . . . . .	31
--	----

M. C. Sundermeier, H. Dierend, R. Lachmayer, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Stadtlicht mit hochauflösenden Scheinwerfern: Verbesserte Ausleuchtung, reduzierte Blendung und Energieeinsparung . . . . .	45
---	----

C. Wilks, B. Kubitz, HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt

Anforderungen an eine Scheinwerferkalibrierung für hochauflösende Systeme . . . . .	55
---	----

R. Arifi, M. Helmer, C. Neumann, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

## ► Moderne Produktionssysteme

---

**Selbstlernende Produktionsmaschinen für die automatisierte Fertigung von Lichtsystemen . . . . . 67**  
M. Hoeren, D. Zontar, C. Brecher, Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen

**Weiterentwicklungen in der MLA Technologie – Applikationen und technologische Umsetzungen . . . . . 75**  
C. Bremer, W. Noell, R. Völkel, SUSS MicroOptics SA, Neuchâtel, Schweiz

## ► Lichtsysteme mit innovativer Funktionalität

---

**Holografie – Neue Möglichkeiten in der Fahrzeugbeleuchtung . . . . . 89**  
M. Mügge, HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt;  
C. Erler, Carl ZEISS Jena GmbH, Jena

**Die Mobilität der Zukunft – Spielwiese für gesundheitsfördernde Lichtfunktionen beim autonomen Fahren? . . . . . 113**  
B. Balkan, S. Bogdanow, IAV GmbH, Gifhorn;  
B. Kleinert, Hochschule Magdeburg-Stendal

**Ist automatisiertes Fahren mit kamera-optimierten Lichtfunktionen besser möglich?  
Top-Down-Entwicklung optimierter Lichtverteilungen für das automatisierte Fahren . . . . . 129**  
R. Kauschke, HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt;  
M. Waldner, N. Müller, T. Bertram, Technische Universität Dortmund;  
M. Grünke, 3D Mapping Solutions GmbH, Holzkirchen

## ► Bewertung lichttechnischer Systeme – Gesetzgebung vs. Consumer Test

---

**The Best of Two Worlds – Innovations in Light Measurement Technology . . . . . 141**  
C. Schwanengel, U. Krüger, TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH Ilmenau;  
T. Reiners, LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin

**„Headlamp Safety Performance Rating“ – Ein Instrument zur Verbesserung der Verkehrssicherheit . . . . . 153**  
F. Freytag, E.-O. Rosenhahn, Marelli Automotive Lighting GmbH, Reutlingen

**Dynamische Bodenprojektionen – Experimentelle Untersuchungen bzgl. photometrischer Anforderungen . . . . . 167**  
F. Maier, U. Schlöder, Marelli Automotive Lighting and Sensing Reutlingen GmbH, Reutlingen

## ► Innovative Lichttechnologien

---

Wärmesenkenfreies Scheinwerfer-Konzept mit effizienten LEDs – Heatsinkless Headlamp Concept enabled by efficient LEDs . . . . .	187
S. Grötsch, A. Günther, N. Haefner, R. Huber, ams-OSRAM International, Regensburg	
FlatLight – Flache Leuchtelemente für individuelles Styling. . . . .	199
M. Vollmer, Hella GmbH Hueck & Co. KGaA, Lippstadt	
<b>Das Ende von Haitz's Law? Folgt die LED Technologie noch den langjährigen Gesetzmäßigkeiten? . . . . .</b>	207
D. Decker, Senior Consultant, PGUB Management Consultants GmbH, Wiesbaden	





**VDI NACHRICHTEN RECRUITING TAG –  
DEUTSCHLANDS FÜHRENDE  
KARRIEREMESSE FÜR INGENIEURE.**

Ideal für Ihre erfolgreiche Jobsuche:

- Renommierte Unternehmen
- Direkter Kontakt mit Entscheidern
- Karriereberatung und -vorträge
- Job Board

Wir machen Ingenieurkarrieren.  
Vor Ort. Und Online!

**VDI nachrichten Recruiting Tag und VDI nachrichten Recruiting Tag Online. Deutschlands führende  
Karrieremessen für Ingenieure und IT-Ingenieure.**

Für alle Studierenden der Ingenieurwissenschaften, Absolventen und Young Professionals ein absolutes Muss. Knüpfen Sie Kontakte zu renommierten Unternehmen und sprechen Sie direkt mit Entscheidern aus den Fachabteilungen. Viele Serviceangebote wie Karriereberatung und -vorträge unterstützen Sie bei Ihrem erfolgreichen Einstieg ins Berufsleben.



**Jetzt informieren und kostenfrei teilnehmen: [www.ingenieur.de/recruitingtag](http://www.ingenieur.de/recruitingtag)**

**Mehr Informationen?**

Silvia Becker, Telefon: +49 211 6188-170

Franziska Opitz, Telefon: +49 211 6188-377

[recruiting@vdi-nachrichten.com](mailto:recruiting@vdi-nachrichten.com)

**VDI nachrichten  
recruiting tag**



## Vorwort

### Wohin des Weges?

Nicht nur im Wortsinn trifft diese alte Frage den Kern der automobilen Lichttechnik. Die technische Entwicklung von Sensorik und Aktuatorik führt seit einigen Jahren zu dramatischen Verbesserungen der Sicht auf nächtlichen Straßen. Signalfunktionen bestechen durch neuartige Designs, welche den aktuellen Entwicklungsstand der optischen Technologien repräsentieren. Fahrzeuginnenraumgestaltung und Displaytechnik, wie auch die Kommunikation mit Licht geraten immer stärker in den Fokus. Weiterhin verlangt die Entwicklung von autonomen Fahrzeugkonzepten neue Ideen für das Licht im und um das Automobil herum. Ein Ende der technologischen Entwicklung ist hier noch lange nicht abzusehen. Unter der fachlichen Trägerschaft der VDI/VDE-Gesellschaft GMA treffen sich Experten der automobilen Lichttechnik im Juni 2022 zum neunten Mal auf der Tagung „Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik“ präsentieren aktuelle Themen der Fahrzeugbeleuchtung, sowie neueste Trends für Licht und Sensorik und tauschen sich fachübergreifend aus. Einsteiger auf diesem Gebiet können die Tagung nutzen, um das Know How in geballter Form aufzunehmen. Ziel der Tagung ist der Informationsaustausch zwischen industrieller Praxis und Forschung. Angesprochen sind Vertreter der Automobilindustrie, Systemlieferanten, Leuchtmittelhersteller, Halbleiterindustrie, Dienstleister und Produzenten aus den Bereichen Sensorik und Kameratechnik sowie Forschungsinstitute. Der Programmausschuss unter der fachlichen Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann vom Lichttechnischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie freut sich über Ihre Einreichungen zu innovativen Technologien aus den Bereichen Licht und Sicht.

Der Programmausschuss



# Bildgebende Car2Car-Kommunikation mit sichtbarem Licht

## Imaging Vehicle-to-Vehicle Communication using Visible Light

J. Ziehn, Dr.-Ing. M. Roschani, Dr.-Ing. M. Ruf, D. Brüstle,

Fraunhofer IOSB, Karlsruhe;

Dr.-Ing. M. Helmer,

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

Diese Veröffentlichung ist entstanden im Rahmen der Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe, gefördert aus Mitteln des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg sowie Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, und als nationales Leistungszentrum aus Mitteln der Fraunhofer-Gesellschaft.

### Kurzfassung

Mit steigender Automatisierung und Vernetzung von Fahrzeugen rückt auch der Datenaustausch zunehmend in den Bereich der sicherheitskritischen Fahrzeugfunktionen; das Einstreuen gefälschter Funknachrichten kann in absehbarer Zukunft schwere Verkehrsunfälle verursachen. Um verbleibende Risiken in verfügbaren Automotive-Security-Architekturen zu reduzieren, stellt dieser Beitrag ein Konzept für einen zweiten Kommunikationskanal mittels Fahrzeugscheinwerferlicht dar. Im Gegensatz zu bekannten Ansätzen erlaubt dieses Konzept, sowohl eine hinreichende Datenmenge zu übertragen, als auch die Senderposition durch ein *bildgebendes* Verfahren zu rekonstruieren, das mit serienfähiger und kostengünstiger Technik realisiert werden kann.

### Abstract

With advances in automated and connected driving, secure communication is increasingly becoming a safety-critical function. Injection of manipulated radio messages into traffic can cause severe accidents in the foreseeable future. To mitigate remaining vulnerabilities in current automotive security architectures, this paper proposes a secondary communication channel using vehicle front and rear lights. In contrast to existing approaches, this method allows both to achieve a sufficient data rate and to extract the angular position of the sender, by means of an *imaging* process which only requires close-to-market, cost-efficient technology.

## 1. Einleitung und Motivation

Vernetztes Fahren erhält mit fortschreitender Automatisierung von Fahrzeugfunktionen zunehmende Bedeutung: Während der Datenaustausch von Online-Karten, Stauinformationen oder Gefahrenstellen bereits selbstverständlicher Bestandteil ist, eröffnet beispielsweise die Einbeziehung vernetzter Informationen in die Echtzeit-Manöverplanung neue Potentiale zur Sicherheits- und Effizienzsteigerung im Verkehr. Vertrauen in korrekt kommunizierte Daten und Handlungen anderer Verkehrsteilnehmer ermöglicht die Reduktion von Sicherheitsabständen oder das frühzeitige Einleiten von Notfallmaßnahmen, erzeugt aber gleichzeitig auch Verwundbarkeit. Die Folgen einer missbräuchlichen Kommunikation können von Verkehrsbehinderungen bis hin zu schweren Unfällen reichen. Die Vorteile des Vertrauensgewinns durch vernetztes und kooperatives Fahren zu nutzen, ohne Missbrauchsrisiken zuzulassen, ist damit eine wesentliche Entwicklungsherausforderung.

Um dem Einstreuen gefälschter Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Nachrichten vorzubeugen, beschreiben wir ein System, erstmals vorgestellt in [24, 25], das zusätzlich zur etablierten Funk-Verbindung zwischen vernetzten Fahrzeugen einen zweiten Kanal über *Visible Light Communication* einführt, spezifisch der Modulation eines unsichtbaren Authentifizierungssignals auf das Licht von LED-Scheinwerfern. Während die Datenrate, die bestenfalls im Kilobit-Bereich liegt, keine Funkkommunikation ersetzen kann, ermöglicht sie eine starke Absicherung gegen Cyberangriffe, indem das Signal mit hoher Genauigkeit der Richtung des Senders zugeordnet, und dieser somit visuell identifiziert werden kann. Dies wird erreicht durch Ausnutzung des sogenannten „Rolling-Shutter-Effekts“ in CMOS-Sensoren, der in dem vorgeschlagenen System eine *bildgebende Datenübertragung* ermöglicht, also eine Verbindung von Nachrichtendaten und räumlichen Informationen in einer einzelnen Erfassung, und mit einem kostengünstigen System.

## Hintergrund und Stand der Technik

Das vorgeschlagene System betrifft die Bereiche vernetztes Fahren, Cybersicherheit, Kommunikationskanäle und die Ausnutzung des genannten Rolling-Shutter-Effekts.

Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (Car to Car, C2C) und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation (Car to Infrastructure, C2I; allgemein Car to X, C2X), jeweils derzeit fast ausschließlich mit Funk-Technologie umgesetzt, ist die Grundlage für vernetztes Fahren mit grundsätzlich unterschiedlichen Anwendungsfällen, die von unkritischen Funktionen wie integrierter Navigation bis hin zu sicherheitskritischen Funktionen wie kooperativer Sensorik, kooperativer Manöverplanung und kooperativer Kollisionsvermeidung reichen [10, 19].

Cyberrisiken im automatisierten und vernetzten Fahren sind aufgrund der potentiell hohen Kritikalität Gegenstand umfangreicher Forschungen und werden durch fortgeschrittene Sicherheitsmaßnahmen mitigiert [23, 20]. Während direkte Manipulationen am Fahrzeug gezielte und umfassende Eingriffe ermöglichen können, sind diese neben der technischen Komplexität riskant und logistisch aufwändig. Hingegen stellen Eingriffe in vernetzte Funktionen eine neuartige Gefahr dar, die auch Safety-relevante Risiken bergen können, etwa in Eingriffen beispielsweise in das Airbag-System [5], oder in die vernetzte, kooperative Manöverplanung durch das Einstreuen falscher Manöversignale durch mit Malware infizierte Mobiltelefone [24]. Grundstein der Absicherung gegen entsprechende Angriffe sind Public-Key-Infrastrukturen (PKI, [21, 2]), die ein hohes Maß an Sicherheit ermöglichen, aber dennoch verwundbar sind für den Diebstahl von Zertifikaten bzw. Schlüsseln [17, 15].

Als Alternative zur Funkübertragung besteht die sogenannte *Visible Light Communication* (VLC), also das Übertragen von Nachrichten per sichtbarem Licht, die schon heute für unterschiedliche Anwendungen genutzt wird. Für den Empfang wird zumeist auf Photodioden gesetzt [14], die ebenfalls wie Funk ungerichtet empfangen, deren Übertragungsrichtung allerdings durch optische Abschattung eingeschränkt sein kann. Den Bedarf für eine positionsgenaue und schnelle Übertragung von Informationen beschreibt Yamazato (2017) [22] und nennt zwei Lösungsansätze: High-Speed-Kameras mit einer Bildrate von 1000 Bildern pro Sekunde (*frames per second*, FPS), und ein von Takai et al. (2013) beschriebenes System [18] namens Optical Communication Image Sensor (OCI). Beide sind in der Lage, hochfrequente Signale oberhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwelle pixelgenau zu lokalisieren, jedoch ist zumindest für High-Speed-Sensoren (bspw. Sony IMX382) festzustellen, dass entsprechende Kameras derzeit im dreistelligen Euro-Bereich liegen, bei entsprechend hoher Bildrate aber nur VGA-Auflösung (640×480) oder weniger erreichen. Eine Automotive-Anwendung ist damit derzeit fraglich. Der OCI [18] hingegen stellt einen spezialisierten Bildsensor dar, der zusätzlich zu regulären Bildpixelen sogenannte *Communication Pixel* (CPx) einführt, die alternierend über die Sensoroberfläche verteilt sind. Diese basieren auf Photodioden, die bei Erkennung eines Signals selektiert und mit bis zu 20 Mbps ausgelesen werden können. Der Fokus liegt hier auf einer erheblichen Verbesserung der Datenrate gegenüber High-Speed-Kameras, die die Nutzung als vollwertigen Datenkanal erlaubt.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Variante hingegen ist begrenzt auf Datenraten in derselben Größenordnung wie von High-Speed-Kameras (unter günstigen Bedingungen potentiell leicht darüber), erlaubt dafür aber einen lokalisierten simultanen Empfang einer großen Anzahl an

VLC-Sendern mittels ausschließlich bereits am Markt verfügbarer, kostengünstiger Technologien. Dabei nutzt das System den Rolling-Shutter-Effekt (Details in Abschn. 2), der seinerseits in unterschiedlichen Realisierungen gezielt zur Messung schneller oder hochfrequenter Informationen genutzt worden ist [16], auch als Empfangsmethode für Visible Light Communication [4]. Für den Automotive-Bereich bzw. C2X beschreiben Ji et al. 2014 [13] eine Anwendung für VLC-Übertragung per Heckscheinwerfer und den Empfang mittels Rolling-Shutter-Effekt. Auch hier wird ein Security-Gewinn in der Empfangsbegrenzung auf direkte Sichtlinien gesehen, wohingegen eine hohe Datenrate bei gleichzeitiger Beibehaltung relevanter Positionsinformation nicht bezweckt wird.

## 2. Prinzip

Ziel der bildgebenden C2C-Kommunikation ist die Übertragung von Signalen über das Flackern von Fahrzeugscheinwerfern unter den folgenden Randbedingungen:

- Beibehaltung der gesetzlich vorgesehenen Scheinwerfer-Funktion
- Nachrichtenempfang potentiell mehrerer Quellen *inklusive* Richtung der Quellen
- Hinreichende Datenrate für angestrebten Sicherheitsgewinn (Details in Abschn. 1)
- Versand sowie Empfang der Informationen mit kostengünstiger, serienfähiger Technik

Es ist keine andere Lösung bekannt, die diese Anforderungen mit heutiger Technik erfüllt.

Soll die Helligkeit eines Scheinwerfers moduliert werden, um Informationen ohne visuelle Störungen zu versenden, muss eine gleichbleibende mittlere Helligkeit und eine hinreichend hohe Sendefrequenz im Einklang mit den einschlägigen ECE-Richtlinien [6, 7, 8] erreicht werden.

Eine gleichbleibende mittlere Helligkeit beim Versand beliebiger Daten ermöglicht die sogenannte Manchester-Codierung [3], bei der ein Bit **0** codiert wird als Sequenz **[an, aus]**, und ein Bit **1** als Sequenz **[aus, an]**. Ab einer Minimalfrequenz (der sogenannten *flicker fusion rate* oder *critical flicker fusion frequency CFF*), die abhängig von Gesamtintensität und relativer Helligkeit zwischen Signalamplitude und Hintergrund-/Basishelligkeit ist [12], nimmt das menschliche Auge dies als konstante, mittlere Helligkeit wahr. Experimentelle Untersuchungen mit dem vorgestellten System zeigen, dass zur Datenübertragung ohne visuelle Störungen Schaltfrequenzen von mindestens 1000 Hz bei maximalem Modulations-Kontrast erforderlich sind.

### Empfang über „Rolling Shutter“

Das Ziel, 1000-Hz-Flackern ortsaufgelöst mit kostengünstiger Sensorik auszuwerten, motiviert den folgenden Lösungsansatz. Bei der derzeit verbreitetsten Form der CMOS-Kamerachips ist das zeitversetzte Auslesen der Bildzeilen die einfachste elektronische Realisierung. Zu den

damit einhergehenden „Rolling-Shutter-Effekten“ zählen geometrische Verzerrungen bewegter Objekte ebenso wie Streifenbildung bei Helligkeitsänderungen; der Effekt wird aber insbesondere in Consumer-Kameras gemeinhin toleriert. In industriellen Anwendungen hingegen kann der Effekt die Bildauswertung deutlich erschweren, etwa mit schwierig modellierbaren Verzerrungen durch Vibrationen [11, 1], weshalb dort oft auf komplexere Sensoren zurückgegriffen wird, die einen „Global Shutter“ auch für CMOS-Technik realisieren.

Eine vertikale Kameraspalte, die mehrere Zeilen  $y \in \{1, 2, \dots, Y\}$  enthält, kann beschrieben werden über eine zeit- und zeilenabhängige Bildintensität  $b(t, y)$ , die zu einer Sensormesung  $I(y)$  über eine Belichtungszeit  $T_{\text{Belichtung}}$  akkumuliert wird über

$$I(y) = \int_{\tau(y)}^{\tau(y)+T_{\text{Belichtung}}} dt b(t, y) \quad (1)$$

wobei  $\tau(y)$  die Abtastfunktion des Shutters über die Bildzeilen ist, die in typischen Anwendungen als linear angenommen werden kann mit einem Zeitversatz  $T_{\text{Zeile}}$  zwischen aufeinander folgenden Zeilen,  $\tau(y) = y \cdot T_{\text{Zeile}}$ .

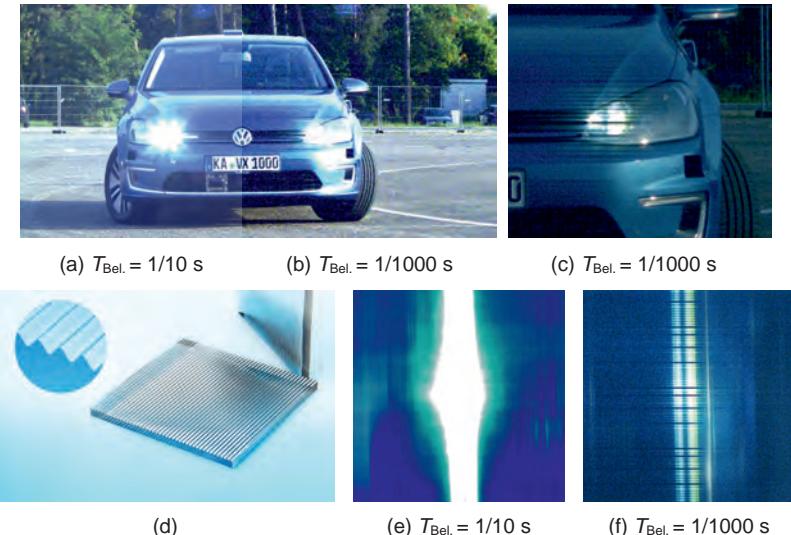


Bild 1: Scheinwerfer mit Manchester-codiertem Signal mit einer Schaltzeit von 1000 Hz in CMOS-Kamera mit Belichtungszeiten von 1/10 s (a) und 1/1000 s (b, c). Durch Einsatz eines optischen Tiefpassfilters (d), der das Bild entlang einer Achse glättet (e) wird das Signal entlang der gesamten Achse sichtbar (f).

Allgemein gilt für (ganzzahlige)  $n$  mit  $n \geq T_{\text{Belichtung}}/T_{\text{Zeile}}$ , dass zwei Zeilen  $y$  und  $y + n$  nicht mehr gleichzeitig, sondern während strikt disjunkten Zeitintervallen belichtet werden. Damit ermöglicht der Rolling-Shutter-Effekt den Empfang hochfrequenter Flackerns mit kostengünstiger Technik, wie in Bild 1 erkennbar ist.

Gleichzeitig ist in Bild 1c zu erkennen, weshalb dieser Aufbau noch ungeeignet für die Datenübertragung ist: Obwohl das Fahrzeug einen großen Teil des Bildes einnimmt, ist nur ein kurzer Ausschnitt der Signalinformation extrahierbar; zudem ist die Trennung zwischen Signal und räumlicher Bildinformation schwierig. Um das Signal möglichst in der gesamten Bildvertikalen klar empfangen zu können, wird daher ein anisotroper Tiefpassfilter (auch *Diffusor* genannt) in den optischen Pfad eingebracht, der das Licht entlang der vertikalen Achse streut. Mit ihm werden Lichtquellen über die gesamte vertikale Achse gestreut, wohingegen der horizontale Winkel des Senders direkt extrahiert werden kann (Abschn. 3, Bild 2) dargestellt.

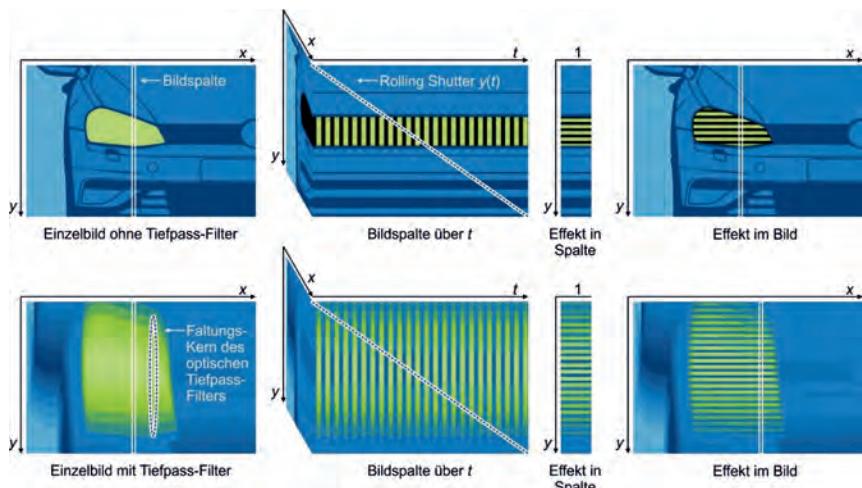


Bild 2: Der Rolling-Shutter-Effekt macht das hochfrequente Flackern für die Kamera sichtbar, indem er die Zeitachse auf die vertikale Bildachse ( $y$ ) abbildet. Ohne zusätzlichen Filter ist das Signal nur im direkten Bereich des Scheinwerfers sichtbar; durch einen vorgesetzten optischen Tiefpass-Filter wird einfallendes Licht über einen größeren  $y$ -Bereich verteilt, sodass mehr Bits übertragen werden können. Die Lage des Scheinwerfers im Bild bleibt gleichwohl schätzbar.

## Anwendung zur Absicherung gegen Cyberangriffe

Wie aus der Motivation in Abschn. 1 hervorgeht, die auf eine Datenrate ab 1000 Hz zielt, und wie die praktischen Ergebnisse in Abschn. 3 zeigen, ist das System nicht darauf ausgelegt, die bisherige C2X-Kommunikation im MBit/s-Bereich (bspw. ca. 50 MBit/s für DSRC bzw. HSPA+) auch nur annähernd zu ersetzen. Im Idealfall gängiger kostengünstiger Kameras wäre etwa mit einer Bildrate von 50 Hz und einer Zeilenauflösung von 1080 Pixeln mit 27 kBit/s Manchester-codierten Informationen zu rechnen; unter typischen Bedingungen (Abschn. 4) mit deutlich weniger. Hinzu kommt, dass Fahrzeuge in der Regel vernetzte Manöver deutlich vor dem ersten Sichtkontakt planen.

Der Security-Gewinn durch das System kann somit nicht darin liegen, die Kommunikation sicherheitskritischer Nachrichten vollständig über bildgebende VLC durchzuführen. Vielmehr soll das VLC-System die Funkkommunikation lediglich um die Authentifizierung des Senders ergänzen, um das Einstreuen falscher Nachrichten durch andere Einheiten auszuschließen.

Zu diesem Zweck (Details in [24]) tauschen Fahrzeuge ihre kooperativen Nachrichten, beispielsweise Manöverplanungsdaten, weiterhin per funkbasiertem C2C aus. Zusätzlich dazu wird aus dem Planungsergebnis eine für alle beteiligten Fahrzeuge unterschiedliche, und für das Planungsergebnis eindeutige, potentiell unendlich lange Bit-Sequenz generiert. Diese kann dynamisch für alle Fahrzeuge berechnet werden, sodass jedes Fahrzeug seine eigene Sequenz, sowie die Sequenzen aller Kooperationspartner kennt. Während der Manöverausführung sendet jedes Fahrzeug seine eigene Sequenz, und beobachtet die Sequenzen anderer Fahrzeuge.

Da die Sequenzen den beteiligten Fahrzeugen bekannt sind, kann das Signal auf Bit-Ebene (sogar potentiell unterhalb der Bit-Ebene, s. Abschn. 3) empfangen und verifiziert werden; eine Übertragung von zusammenhängenden Datenpaketen ist nicht erforderlich. Auch vorübergehende Abschattungen oder unsicher empfangene Bits können so modelliert werden. Der Prozess führt zu einem exponentiellen Abfall der Wahrscheinlichkeit einer Abweichung in der Sequenz über die Zeit des Sichtkontakte. Ab einem manöverspezifischen Zeitpunkt  $t_{\text{Entscheidung}}$ , an dem das Manöver letztmalig sicher abgebrochen werden könnte, kann geprüft werden, ob ein manöverspezifischer Mindestwert  $p_{\min}$  an Vertrauen überschritten wurde. Ansonsten wird das Manöver abgebrochen. Die Berechnung von  $t_{\text{Entscheidung}}$ ,  $p_{\min}$ , sowie eine Prognose der Sichtkontakte und damit der Chance auf erfolgreichen Vertrauensaufbau, kann effizient in der kooperativen Planung berücksichtigt werden. Damit ermöglicht das System bei sicherheitskritischen Manövern eine a-priori Abschätzung des Risikos, und eine Möglichkeit zur sicheren

Durchführung. Manöver, bei denen absehbar  $p_{\min}$  bis  $t_{\text{Entscheidung}}$  nicht erreicht wird (beispielsweise mangels Sichtkontakt) können damit verworfen werden.

Die Möglichkeit, falsche Funknachrichten etwa lediglich durch infizierte Mobiltelefone breit in den Verkehr einzustreuen, ist damit nahezu ausgeschlossen. Sicherheitskritische Manöver zu sabotieren erfordert in Verbindung mit der Scheinwerferkommunikation einen Eingriff in die Scheinwerfersteuerung eines betroffenen Fahrzeugs; entsprechende Angriffe fallen damit in den strenger und besser kontrollierten Bereich der Absicherung von internen Fahrzeugsystemen (wie Längs-/Querföhrung, Airbags), statt in den Bereich der Absicherung von Funkkanälen und mobilen Endgeräten. Ausführlichere Erklärungen finden sich in [24].

### 3. Prozessierung

Die Prozessierung des Signals aus einem Grauwertbild mit linearen Intensitäten  $I(x, y)$  (s. Bild 3) liefert eine Schätzung der Koordinaten  $(x^*, y^*)$  des Scheinwerfers, sowie reellwertige normalisierte Signalintensitäten  $N(y)$  und deren Signifikanzverhältnisse  $R(y)$ . Eine prinzipielle Implementierung gliedert sich in die folgenden Schritte:

- **Bestimmung von Spalten  $x^*$**  über Häufungen großer  $y$ -Ableitungen. Diese können aufgrund des Tiefpassfilters nur durch zeitliche, aber nicht durch räumliche Kontraste entstehen.
- Für jede solcher Bildspalten  $I_{x^*}(y)$ :
  - **Berechnung der oberen und der unteren Einhüllenden**  $O(y)$ ,  $U(y)$  durch morphologisches *Opening* bzw. *Closing* der Signalstreifen über die  $y$ -Achse
  - **Berechnung der Hüllkurve** der Signalintensitäten als Gauß-geglättete Funktion  $H = N(0, \sigma) * H'$  mit  $H'(y) = O(y) - U(y)$
  - **Bestimmung der Zeile  $y^*$**  als Maximum von  $H(y)$
  - **Bestimmung des normalisierten Signals**  $N(y) = (I_{x^*}(y) - U(y)) / H(y)$
  - **Bestimmung es Signifikanzverhältnisses**  $R(y) = (O(y) - U(y)) / U(y)$

Die Prozessierung nutzt nur einfache signalverarbeitende Operationen mit geringem Rechenaufwand und hoher Parallelität. Die geschätzten Koordinaten des sendenden Scheinwerfers  $x^*, y^*$  können anschließend mit Daten der regulären Fahrzeugsensorik abgeglichen werden, um das sendende Fahrzeug zu authentifizieren. Die Signal- und Signifikanzdaten  $N, R$  können mit dem erwarteten Signal verglichen werden, um den Vertrauengewinn je Bildzeile oder eventuelle Abweichungen zu bestimmen.

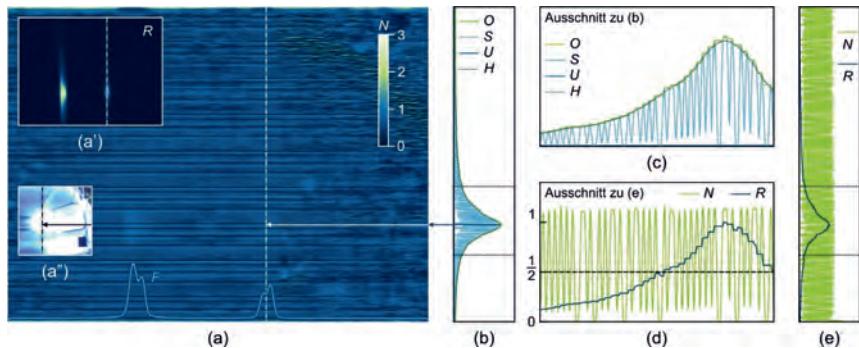


Bild 3: Beispiel der Prozessierung anhand der Realdaten aus Bild 1. Es werden Frequenz-Peaks  $F$  bestimmt (a, unterer Bildrand). Anschließend werden für alle Peaks (wie hier am Beispiel des rechten Scheinwerfers) zunächst Ober- und Untergrenze  $O$ ,  $U$  um das Signal  $S$  bestimmt, und anschließend die Hüllkurve  $H$  (b, c). Daraus kann das normalisierte Signal  $N$  berechnet werden (d, e und beispielhaft vollflächig in a), sowie das Signifikanzverhältnis  $R$  (d, e, a'). Aus  $H$  und  $F$  kann die Position geschätzt werden. Das Ergebnis im Referenzbild ist in (a'') gezeigt. In (a) ist erkennbar, dass das Signal durch die Prozessierung über große Bereiche des Gesamtbildes herausgearbeitet werden kann, auch deutlich abseits der Scheinwerfer.

#### 4. Erprobung

Das System wurde auf nicht-öffentlichen Teilen des Testfelds Autonomes Fahren Baden-Württemberg [9] erprobt, sowie im Labor und in simulierten Verkehrsszenarien (Bild 4). Als Kameras wurden eine IDS-UI-3590CP-C-HQ-Kamera (Sensor 1/2,08", 4912 × 3684 Pxl, Brennweite 8,5 mm, FOV 39,7° × 30,3°) mit ansteuerbarem Shutter, sowie ein Sony IMX219PQ Embedded-Sensor (Sensor 1/4", 1920 × 1080 Pxl, Brennweite 3 mm, FOV 62,2° × 48,8°) genutzt. Scheinwerferseitig wurden in ein Golf-VII-Versuchsfahrzeug, zur Umgehung der Serien-Steuerung, neue LED-Leuchtmittel (nicht zugelassen) in das Fernlicht gesetzt, das direkt über einen Mikrocontroller (ATmega328P) geschaltet wurde. Als maximale Frequenz wurde 1000 Hz erprobt. Zur automatisierten Bewertung der Übertragung wurde, abweichend zu dem hier vorgeschlagenen Protokoll von Referenzsignalen, eine Übertragung von 12-Bit Datenpaketen realisiert, die als Ganzes rekonstruiert werden mussten um als erfolgreiche Übertragung bewertet zu werden.



Bild 4: Shader-basierte photometrische Simulation<sup>1</sup> von Herausforderungen in der Einsatzumgebung: Vertikal überlappende Scheinwerfer und Sonneneinstrahlung.

Die Tests wurden in unterschiedlichen Lichtsituationen durchgeführt, sowohl in Bezug auf Umgebungslicht als auch in Bezug auf eine Unterbelichtung der Kamera durch schmale Blendewerte. Auch bei Tageslicht und direkter Sonneneinstrahlung konnten in statischen Szenarien bis 200 m Distanz (der auf dem Gelände maximal möglichen Strecke) mit der IDS-Kamera Datenraten von 100 Bit/s einschließlich (x, y)-Lokalisierung des Scheinwerfers auf (0,01°, 0,19°) robust erreicht werden, was in der Distanz einer Abweichung von unter (3 cm, 66 cm) entspricht. Direkter Sonnenstand über dem Scheinwerfer führt zu einem Einbruch der Übertragungsrate durch Überlagerung des Helligkeitsprofils. Regen und Schnee hingegen tragen durch Reduktion des Umgebungslichts vielmehr zu einer verbesserten Datenrate bei.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben ein System zur bildgebenden Übertragung von Signalen per Visible Light Communication (VLC) in Automotive-Anwendungen vorgestellt, das mit serienfähiger Technik 1000-Hz-Signale senden, und simultan mit dem Einfallsinkel empfangen kann. Das Senden entsprechender Informationen über Scheinwerfer ist bereits im Stand der Technik etabliert; der Empfang von Winkel- und Signalinformationen über Nutzung des Rolling-Shutter-Effekts in Verbindung mit einem optischen Tiefpassfilter ermöglicht eine kostengünstige Realisierung. Die bisherigen begrenzten Erprobungen legen nahe, dass unter typischen Bedingungen Datenraten von mindestens 100 Bit/s erreicht werden können. Während dies keinen Austausch von Datenpaketen als Ersatz für Funk-Kommunikation zulässt, ist dies hinreichend für den beabsichtigten Anwendungsfall: Der Authentifikation von Funksendern anhand der visuellen

---

<sup>1</sup> In der Simulationsplattform OCTANE, [www.octane.org](http://www.octane.org)

Verifikation ihrer Position, für die in Erprobungen Genauigkeiten von deutlich unter 1° erreicht wurden.

Der gegenwärtig begrenzte Umfang der Auslegung und Erprobung ist zukünftig durch den Aufbau eines straßenverkehrsfähigen Gesamtsystems auf Basis von Front- und Heckscheinwerfer zu erweitern, einschließlich einer geschlossenen Verarbeitungskette zur Übertragung und Authentifizierung von C2C-Daten. Ein solches System soll Realtests im Straßenverkehr zulässig und möglich machen, und damit die Erprobung in realistischen, dynamischen Szenarien; sowie auf Basis darauf die fundierte lichttechnische Vermessung und Evaluation und den Vergleich unterschiedlicher Empfangsoptiken und Algorithmen. Die Relevanz im Praxiseinsatz ist darüber hinaus durch simulative Erprobung in komplexen Gesamtszenarien des künftigen kooperativen und vernetzten Fahrens zu quantifizieren.

## Literatur

- [1] Baker, S. et al.: *Removing rolling shutter wobble*. In: *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 2392–2399. IEEE, 2010.
- [2] Bißmeyer, N. et al.: *A generic public key infrastructure for securing Car-to-X communication*. In: *World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS)*, S. 12–24, Okt. 2012.
- [3] Cailean, A. et al.: *Miller code usage in Visible Light Communications under the PHY I layer of the IEEE 802.15.7 standard*. In: *2014 10th International Conference on Communications (COMM)*, S. 1–4, May 2014.
- [4] Danakis, C. et al.: *Using a CMOS camera sensor for visible light communication*. In: *2012 IEEE Globecom Workshops*, S. 1244–1248. IEEE, 2012.
- [5] Dürrwang, J. et al.: *Security evaluation of an Airbag-ECU by reusing threat modeling artefacts*. In: *2017 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, S. 37–43. IEEE, 2017.
- [6] UN/ECE: *Regelung Nr. 112 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen und/oder LED-Modulen ausgerüstet sind: ECE R112*, 2013.
- [7] UN/ECE: *Regelung Nr. 123 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen (AFS) für Kraftfahrzeuge: ECE R123*, 2010.
- [8] UN/ECE: *Regelung Nr. 48 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen [2016/1723]: ECE R48*, 2016.
- [9] Fleck, T. et al.: *Towards Large Scale Urban Traffic Reference Data: Smart Infrastructure in the Test Area Autonomous Driving Baden-Württemberg*. In: Strand, M. et al. (Hrsg.): *Intelligent Autonomous Systems 15*, S. 964–982, Cham, 2019. Springer International Publishing, ISBN 978-3-030-01370-7.
- [10] Frese, C. und J. Beyerer: *Collision Avoidance by Cooperative Driving Maneuvers*. AT-Zelektronik worldwide eMagazine, 6(5):48–52, Oct 2011, ISSN 2192-9092.
- [11] Hedborg, J. et al.: *Rolling shutter bundle adjustment*. In: *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 1434–1441. IEEE, 2012.
- [12] IEEE: *IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers*. IEEE PAR 1789, 2015.
- [13] Ji, P. et al.: *Vehicular visible light communications with LED taillight and rolling shutter camera*. In: *2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, S. 1–6. IEEE, 2014.
- [14] Khan, L. U.: *Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges*. Digital Communications and Networks, 3(2):78–88, 2017.
- [15] Matrosov, A. et al.: *Stuxnet under the microscope*. ESET LLC (September 2010), 2010.
- [16] McCloskey, S. und S. Venkatesha: *Rolling shutter bar code imaging*, Sep. 2016. US Patent 9,454,689.

- [17] Schramm, K., K. Lemke und C. Paar: *Embedded Cryptography: Side Channel Attacks*. In: Lemke, K., C. Paar und M. Wolf (Hrsg.): *Embedded Security in Cars*, S. 187–206. Springer, 2006.
- [18] Takai, I. et al.: *LED and CMOS image sensor based optical wireless communication system for automotive applications*. IEEE Photonics Journal, 5(5):6801418–6801418, 2013.
- [19] Tas, Ö. et al.: *Making Bertha Cooperate – Team AnnieWAY's Entry to the 2016 Grand Cooperative Driving Challenge*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Nov 2017.
- [20] Weimerskirch, A.: *An Overview of Automotive Cybersecurity: Challenges and Solution Approaches*. In: *Proceedings of the 5th International Workshop on Trustworthy Embedded Devices*, TrustED '15, S. 53–53, New York, NY, USA, 2015. ACM, ISBN 978-1-4503-3828-8.
- [21] Whyte, W. et al.: *A security credential management system for V2V communications*. In: *2013 IEEE Vehicular Networking Conference*, S. 1–8, Dec 2013.
- [22] Yamazato, T.: *V2X communications with an image sensor*. Journal of Communications and Information Networks, 2(4):65–74, 2017.
- [23] Yağdereli, E., C. Gemci und A. Aktaş: *A study on cyber-security of autonomous and unmanned vehicles*. The Journal of Defense Modeling and Simulation, 12(4):369–381, 2015.
- [24] Ziehn, J. et al.: *A Non-Invasive Cyberrisk in Cooperative Driving*. In: *8. Tagung Fahrerassistenz*, Munich, 2017. Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik mit TÜV SÜD Akademie.
- [25] Ziehn, J. et al.: *Imaging vehicle-to-vehicle communication using visible light*. Advanced Optical Technologies, 2020, 9. Jg., Nr. 6, S. 339–348.

# Lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle zwischen automatisierten Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern

M.Sc. Maximilian Baumann, Dr.-Ing. Melanie Helmer,  
Dr.-Ing. Klaus Trampert, Prof. Cornelius Neumann,  
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

## Kurzfassung

Im innerstädtischen Bereich können Situationen auftreten, in denen die Vorfahrt aus verkehrsrechtlicher Sicht nicht oder nicht eindeutig hervorgeht. Beispielhaft kann dies an Engstellen oder gleichrangigen Kreuzungen auftreten. Zur Lösung dieser Pattsituation muss ein Verkehrsteilnehmer auf seine eigene Vorfahrt verzichten, so wie dies § 11 Absatz 3 der Straßenverkehrsordnung (StVO) gefordert ist. Der Verzichtende muss sich hier mit den beteiligten Verkehrsteilnehmern verständigen und den Verzicht kommunizieren. Üblicherweise geschieht dies mittels, auditiven oder visuellen Signalen, wie z.B. Augenkontakt, Gesten, oder (Licht-)Hupe. All diese Situationen haben gemein, dass die beteiligten Personen direkt miteinander kommunizieren.

Beim voll autonomen Fahren, entfällt der Mensch als sichtbarer Fahrzeugführer und Kommunikationspartner. Zur Lösung der beschriebenen Situationen, muss daher eine Möglichkeit zur Kommunikation zwischen dem automatisierten Fahrzeug und den anderen Verkehrsteilnehmern geschaffen werden.

Die Umsetzung einer solchen Mensch-Maschine-Schnittstelle wird als Teilbereich im Rahmen des Verbundprojektes INITIATIVE untersucht. Am Beispiel verschiedener Szenarien wird gezeigt, ob und wie Problemsituationen durch eine lichtbasierte Mensch-Maschine-Schnittstelle lösbar sind.

Im Beitrag wird aufgezeigt, wie diese Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine lichtbasiert aussehen könnte.

## Abstract

Particularly in urban areas, situations can arise in which it is not clear at first from a traffic law perspective, which road user has the right of way. Narrow places or intersections with the same priority can be mentioned here as examples. According to Section 11 (3) of the German Road Traffic Regulations (StVO), a waiver of one's right of way must be made, if the traffic situation requires it. Usually, this is done by means of eye contact, gestures, auditory or visual signals,

such as flashing lights. What all these situations have in common, however, is that the road users or persons involved communicate directly with each other.

Due to the constant development in the field of automated driving, which is virtually accompanied by the elimination of the previously known vehicle driver, the human in the automated vehicle is no longer a communication partner in the situations described above. In order to be able to solve the described situation nevertheless, a possibility for communication must be given for outsiders at the automated vehicle. The implementation of such a human-machine interface is being investigated as part of the INITIATIVE joint project. Using various scenarios as examples, it is to be shown whether and how problem situations can be solved by a light-based human-machine interface.

The article shows how the interface between man and machine could be light-based in situations where communication is absolutely necessary.

## 1. Motivation

In der Straßenverkehrsordnung (StVO) stehen die wichtigsten Regeln zur Benutzung der Straße, Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie zum Verhalten im Straßenverkehr. Leitgedanke ist dabei das Gebot der gegenseitigen Rücksichtnahme. So geben Verkehrszeichen vor, welche Teilnehmer an einer Kreuzung Vorfahrt haben, sofern sich dies nicht aus der allgemeinen Vorfahrtsregel ergibt. Situationen, in denen es nicht eindeutig ist, welcher Verkehrsteilnehmer Vorfahrt hat, spricht man von einer Pattsituation [1]. Eine Pattsituation kann demnach als Konstellation im Verkehr beschrieben werden, in der nicht alle Verkehrsteilnehmer ihr geplantes Fahrmanöver gleichzeitig ausführen können. Eine Pattsituation kann beispielsweise an einer Kreuzung mit gleichrangiger Vorfahrtsberechtigung entstehen, wenn jeder Einmündung ein Fahrzeug steht, das geradeaus fahren möchte. Ein anderes Beispiel für eine Pattsituation ist eine Engstelle auf einer Straße, an der zwei Fahrzeug auf gleicher Höhe parken, sodass nur ein Fahrzeug gleichzeitig passieren kann. Nähern sich aus beiden Richtungen nun Fahrzeuge der Engstelle, so entsteht eine Pattsituation, da ein Fahrzeug warten muss.

Zur Lösung dieser Pattsituationen müssen sich die Verkehrsteilnehmer miteinander abstimmen. Diese Abstimmung zum Aushandeln des Verzichts auf die eigene Vorfahrt ist in § 11 III StVO geregelt [2]. Die Beteiligten solch einer Pattsituation müssen sich miteinander verständigen, also kommunizieren, wer auf seine Vorfahrt verzichtet um die Pattsituation zu lösen. Üblicherweise geschieht diese Verständigung als nonverbale Kommunikation mittels Bewegungen und Gesten [3], [4] oder über das Geben einer Lichthupe [5]. Diese Kommunikation ist sowohl zwischen den fahrzeugführenden Personen als auch mit anderen Verkehrsteilnehmern wie Fahrradfahrern oder Fußgängern (Vulnerable Road User – VRU) üblich.

Im Bereich des autonomen Fahrens ist, ab einem Automationslevel von 4 und höher, die Fahr-aufgabe nicht mehr der fahrzeugführenden Person zugeordnet [6]. In Level 4 kann ein aktives Eingreifen durch die fahrzeugführende Person in Gefahrensituationen nach Aufforderung noch vorkommen. Seine Aufmerksamkeit ist daher nicht mehr zwingend dem Verkehrsgeschehen zugewandt. Mit der Einführung autonomer Fahrzeuge (Autonomous Vehicle – AV) in den Straßenverkehr ist daher eine Verständigung mit der fahrzeugführenden Person nicht immer möglich, da das Fahrzeug nun durch die Künstliche Intelligenz (KI) geführt wird. Es müssen neue Wege der Kommunikation untersucht werden, um eine Verständigung zwischen der fahrzeug-führenden Intelligenz des AV und den übrigen Verkehrsteilnehmern zu ermöglichen.

Für diese Verständigung wird ein Kommunikationskanal zwischen den Systemen Mensch (VRU) und Maschine (AV) benötigt. Dieser Kanal wird im Folgenden als Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human Machine Interface – HMI) bezeichnet. Die Informationsaufnahme des Menschen erfolgt zu 80 % visuell [7]. Von daher ist es günstig die Verständigung zwischen Mensch und Maschine ebenfalls visuell zu gestalten. Am Fahrzeug stehen hierzu die lichttechnischen Einrichtungen zur Verfügung.

Im Folgenden wird aufgezeigt, was unter dem Begriff Kommunikation verstanden ist und wie diese im Straßenverkehr ablaufen kann. Auf Basis der gemachten Überlegungen und Definitionen werden Anforderungen an eine potenzielle lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle im Folgenden formuliert. Mögliche Kommunikationsschnittstellen, sowohl im Fahrzeuginnenraum (iHMI) als auch für den Außenbereich (eHMI), werden im Rahmen des BMWi-geförderten Verbundprojektes INITIATIVE untersucht. Innerhalb des Projektes soll eine KI-gestützte adaptive Kommunikation verschiedener Verkehrsteilnehmer für die Integration automatisierter Fahrzeuge in gemischten Verkehrsszenarien erarbeitet werden.

## 2. Stand der Technik

Viele Forschungsvorhaben [8], [9] haben bereits die Möglichkeiten einer lichtbasierten Kommunikation untersucht und Ideen aufgezeigt, diese umzusetzen. Um die Anforderungen an eine lichtbasierte Kommunikation besser beschreiben zu können, soll zunächst auf die Begriffe Kommunikation sowie Informationsübertragung eingegangen und anschließend deren Anwendung im Straßenverkehr aufgezeigt werden.

### 2.1 Kommunikationsmodell

Eine einfache Beschreibung des Kommunikationsvorgangs ist durch das Sender-Empfänger-Modell nach Shannon und Weaver möglich [10]. Anhand dessen lässt sich der Ablauf eines Kommunikationsvorgangs zwischen einem Sender und einem Empfänger, wie in Bild 1 zu sehen, über den sogenannten Kommunikationskanal beschreiben.

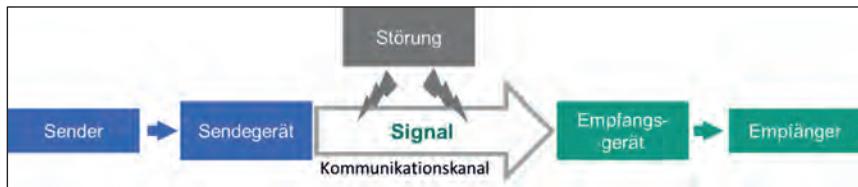


Bild 1: Das Sender-Empfänger-Modell nach Shannon und Weaver

Auftretende Störungen können die erfolgreiche Übertragung einer Information beeinflussen, so dass diese entweder nicht oder nicht vollständig empfangen werden kann. Ebenso kann die Information den Empfänger verfälscht erreichen, der ursprüngliche Inhalt der Nachricht ist nicht mehr erkennbar. Zur Sicherstellung einer erfolgreichen Informationsübertragung muss diese entweder robust versendet oder potenzielle Störungen erkannt und beseitigt werden.

## 2.2 Das Sender-Empfänger-Modell im Straßenverkehr

Das zuvor beschriebene Modell nach Shannon und Weaver wird im Folgenden dafür verwendet, einen Kommunikationsvorgang im Straßenverkehr zu beschreiben [11]. Es handelt sich um Situationen aus dem Straßenverkehr. Dabei wird zunächst von einem Fahrzeug ausgegangen, das durch eine Person geführt wird. Im Anschluss erfolgt die Betrachtung mit einem autonom fahrenden Fahrzeug.

Beispielhaft wird eine Pattsituation an einer Engstelle betrachtet, in der die Fahrbahn nur durch ein Fahrzeug passiert werden kann und sich die fahrzeugführenden Personen beider Fahrzeuge abstimmen müssen, wer zuerst fahren darf. Fahrzeug 1 (blau), zu sehen in Bild 2 links, verzichtet gemäß § 11 III auf seine eigene Vorfahrt und lässt Fahrzeug 2 (türkis), in der Abbildung rechts, zuerst fahren.

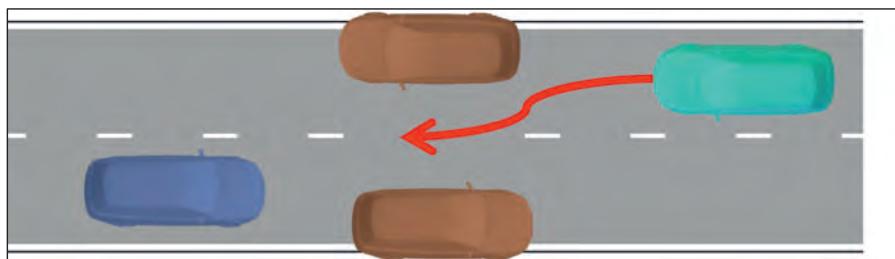


Bild 2: Pattsituation an einer Engstelle mit zwei Fahrzeugen, welche sich verständigen müssen.

Der Ablauf dieses Kommunikationsvorgang kann nun durch das zuvor eingeführte Sender-Empfänger-Modell beschrieben werden. Der Fahrer des Fahrzeug 1 ist somit nach dem Sender-Empfänger-Modell von Shannon und Weaver der Sender und teilt seine Verzichtsabsicht beispielsweise über das Geben der Lichthupe mit. Die Scheinwerfer sind somit das Sendegerät, der optische Weg zwischen Scheinwerfer und Fahrer 2 der Kommunikationskanal und die Nachricht das Geben der Lichthupe. Dieses Aufblitzen wird im Allgemeinen als Aufforderung zum Fahren verstanden [12].

Eine Störung auf die Übertragung kann dabei in Form von Versperrung des optischen Weges einwirken. Weiter könnte Fahrer 2 im Moment der Übertragung in eine andere Richtung geschaut haben, oder die Scheinwerfer von Fahrzeug 1 defekt sein. Diese Störung sind dann jedoch der Empfänger- bzw. der Senderseite zuzuordnen und nicht dem Kanal.

Bei Betrachtung der gleichen Situation jedoch mit einem autonomen Fahrzeug auf der Senderseite, lässt sich auch diese durch geringfügige Anpassung durch Shannon und Weaver beschreiben. Der Sender ist nun der Computer bzw. die KI, die aufgrund der zuvor gesammelten Sensordaten und Entscheidungsalgorithmen, das Fahrzeug 2 passieren lassen möchte. Anhand dieser einfachen Situation lässt sich zeigen, dass sich bestimmte Pattsituationen durch einfache Nachrichten auflösen lassen. Dabei stellt sich die Frage, ob beispielsweise das Geben einer Lichthupe ausreichend ist, um den überwiegenden Anteil der Pattsituationen auflösen zu können. Daher wird zunächst geschaut, welche Pattsituationen im Straßenverkehr auftreten können und wie diese auflösbar sind.

### **3. Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle**

Um sicherzustellen, dass die Kommunikationsschnittstelle in jeder beliebigen Situation zur Verständigung zwischen AV und VRU genutzt werden kann, ist vorab zu ermitteln, welche Parameter Einfluss auf die Kommunikation nehmen, um daraus Anforderungen zu formulieren. Zur Definition der Anforderungen an eine Kommunikationsschnittstelle wird zunächst untersucht, in welchen Begegnungssituationen des Straßenverkehrs eine Kommunikation notwendig ist. Es handelt es sich einerseits um Pattsituation, wie in Kapitel 1 beschrieben, aber andererseits auch um Situationen, in denen vor einer Gefahr gewarnt wird. Dies könnte beispielsweise ein auf der Fahrbahn liegen gebliebenes Fahrzeug sein. Das Setting aus einer gegebenen Situation sowie der darin beteiligten Teilnehmer wird im Folgenden als Szenario zusammengefasst.

### 3.1 Auswahl relevanter Szenarien zur Bearbeitung

Für eine Auslegung eines lichtbasierten eHMI-Systems ist zunächst zu klären, in welchen Situationen im Straßenverkehr kommuniziert wird. Neben der in Kapitel 1 gezeigten Situation in einer Engstelle gibt es noch weitere Situationen, in denen Stand heute eine Kommunikation stattfindet.

Als Beispiel ist hier eine Situation an einem Fußgängerüberweg, wie in Bild 3 zu sehen, zu nennen.

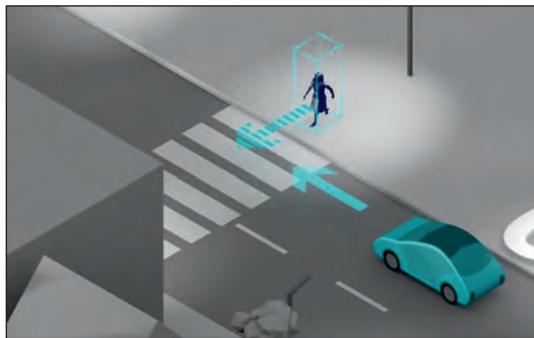


Bild 3: Situation an einem Fußgängerüberweg – Das nahende autonome Fahrzeug erkennt den Fußgänger sowie dessen Absicht zu queren

Laut §26 StVO müssen Fahrzeuge den an einem Fußgängerüberweg Wartenden das Überqueren ermöglichen. Ist dies der Fall, darf sich das Fahrzeug nur mit moderater Geschwindigkeit nähern oder muss ggf. anhalten und warten [13]. Viele wartende Fußgänger nehmen die Reduzierung der Geschwindigkeit wahr und überqueren den Fußgängerüberweg [1]. Einige jedoch, suchen Blickkontakt mit der fahrzeugführenden Person [5], um sich zu vergewissern, dass diese sie erkannt hat und sie die Straße gefahrlos überqueren können. Bei einem automatisierten Fahrzeug, dessen Passagier vielleicht gerade nicht auf die Fahrbahn schaut, kann dies so nicht stattfinden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, diese Rückmeldung der Erkennung durch das AV, im Folgenden Detektionsrückmeldung genannt, über ein HMI-System auszugeben. Durch die Detektionsrückmeldung kann der Fußgänger vergewissert sein, dass das Fahrzeug ihn erkannt hat und er kann die Straße überqueren.

Denkbar sind jedoch auch Situationen, in denen eine einfache Detektionsrückmeldung nicht ausreichend ist. Als Beispiel ist eine Kreuzung, wie in Bild 4 zu sehen, anzuführen, in der die Verkehrsteilnehmer entsprechend den Pfeilen abbiegen möchten.

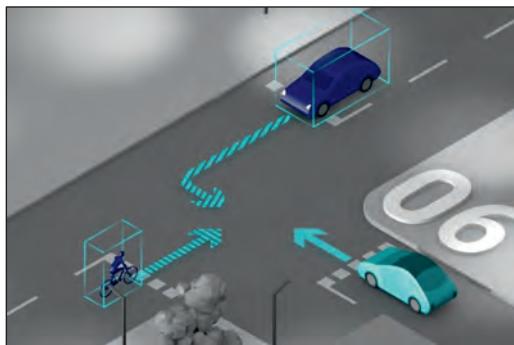


Bild 4: T-Kreuzung mit ungeklärter Vorfahrt – Die Teilnehmer müssen sich miteinander verständigen und gegebenenfalls auf die eigene Vorfahrt verzichten

In diesem Fall hätte nach der Vorfahrtsregel jeder Teilnehmer zu warten, da er in Fahrtrichtung einen Verkehrsteilnehmer von rechts kommend hat. Zur Lösung der Pattsituation ist erneut eine Verständigung zwischen den Teilnehmern notwendig und mindestens ein Teilnehmer, der auf seine Vorfahrt verzichtet.

Diese exemplarischen Szenarien sowie weitere Pattsituationen im Straßenverkehr wurden innerhalb des INITIATIVE-Projektes erarbeitet. Diese dienen als Grundlage zur Untersuchung einer lichtbasierten Kommunikationsschnittstelle in Situationen zwischen AV und VRU. Welche Nachrichten zur Lösung einer Pattsituation denkbar sind, wird im Folgenden erarbeitet.

### **3.2 Auswahl bestimmter Nachrichten zur Lösung der Problemsituation**

Nach Auswahl der Szenarien zur Bearbeitung ist zunächst zu schauen, welche Nachrichten zur Kommunikation und zur Lösung einer Situation notwendig sind. Im Falle des Fußgängerüberweges wäre eine Rückmeldung an den Fußgänger ausreichend, um zu signalisieren, dass dieser erkannt wurde.

Für die anderen Szenarien muss die Möglichkeit bestehen, einem anderen Verkehrsteilnehmer die Vorfahrt einzuräumen. Wie in Bild 5 zu sehen, besteht hier die Möglichkeit, durch das Geben einer Geste den anderen aufzufordern zu fahren.



Bild 5: Geste zur Anzeige des Verzichts auf die eigene Vorfahrt

Da es jedoch im Straßenverkehr kritisch ist, jemanden zu einer Aktion aufzufordern, kann diese Nachricht dahingehend abgewandelt werden, stattdessen den Verzicht der eigenen Vorfahrt zu erklären.

Diese Nachrichten sollten bereits ausreichend, um eine Kommunikation wie sie heute unter den Verkehrsteilnehmern stattfindet, zu ersetzen. Zusätzlich Nachrichten können jedoch sinnvoll sein, um die Intention bzw. Ankündigung eines Fahrmanövers des autonomen Fahrzeuges abzubilden. Ebenso Nachrichten, die durch das AV gesammelte Informationen weitergeben, oder das Vertrauen in das AV steigern können.

Tabelle 1: Übersicht der Nachrichten zur Kommunikation mit externen Verkehrsteilnehmern

<b>Art der Nachricht</b>	<b>Inhalt der Nachricht</b>
<b>Detektionsrückmeldung</b>	„Ich habe dich erkannt“
<b>Vorfahrtsverzicht</b>	„Ich warte“
<b>Fahrzeug verzögert</b>	„Ich bremse“
<b>Fahrzeug fährt an</b>	„Ich fahre los“
<b>Information</b>	„Achtung“
<b>Interaktion</b>	„Danke!“

Die Detektionsrückmeldung und der Vorfahrtsverzicht lassen sich als Nachrichten zusammenfassen, die notwendig sind, um den aktuellen Stand der Technik abzubilden. Die Ankündigung des eigenen Fahrmanövers, bremsen oder beschleunigen, können helfen, das Fahrmanöver des AVs besser abzuschätzen. Vor allem in den Dämmerungs- und Nachtstunden ist es schwierig, die Geschwindigkeit bzw. die Entfernung eines Fahrzeuges abzuschätzen [14]. Die oben genannten Nachrichten bezüglich des Manövers sind nutzbar, um dem Empfänger zusätzliche Informationen zu vermitteln bzw. um eine gewisse Art von Vertrauen zu vermitteln. Diese beschränkte Anzahl von Nachrichten muss nun für den Empfänger codiert und sichtbar dargestellt werden, damit dieser sie erkennen und interpretieren kann.

#### 4. Technologische Umsetzungsmöglichkeiten

Die lichttechnische Umsetzung bzw. Darstellung einer Nachricht auf einem HMI-System werden im Folgenden als Codierung bezeichnet. Dabei gibt es in Abhängigkeit des Systems und damit der Technologie verschiedene Arten, die Nachricht darzustellen. Der Aufbau jedes HMI-Systems lässt sich vereinfachen auf einen Lichtpunkt, im Folgenden Pixel genannt. Mehrere Pixel können geometrisch miteinander verschaltet und angeordnet werden.

Ein LED-Band ergibt sich somit aus der Verkettung mehrerer Pixel nebeneinander. Jedes Pixel besitzt zudem verschiedene Beschaltungszustände. Im einfachsten Fall, kann ein Pixel entweder im Zustand AN („1“) oder AUS („0“) sein. Durch die Verwendung beispielsweise einer Pulsweltenmodulation (PWM), ergeben sich zwischen den Zuständen 0 und 1 noch verschiedene Helligkeits- oder Dimmstufen DIM.

Durch die Ansteuerung mehrerer Zustände ist, wie in Bild 6 zu sehen, ein Muster realisierbar. Werden die Zustände jedoch nacheinander zu verschiedenen Zeitpunkten präsentiert, ist eine dynamische Darstellung einer Nachricht umsetzbar.

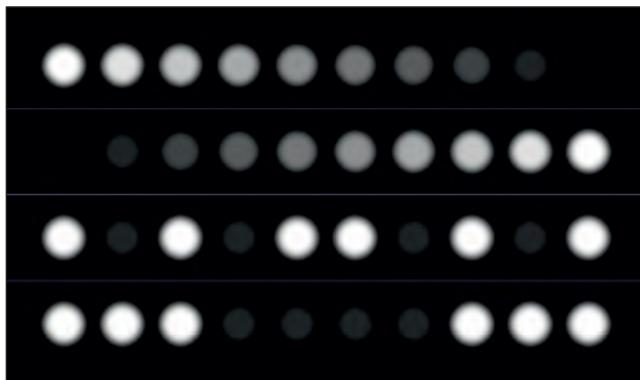


Bild 6: Gestaltungsmöglichkeiten verschiedener Nachrichten über ein LED-Band am Fahrzeug

Durch die Verwendung farbiger LEDs entstehen weitere Möglichkeiten zur Codierung von Nachrichten. Dabei hat die Wahl der Farbe Auswirkung auf die Erkennbarkeit und Verständlichkeit einer Nachricht [15]. Diese ist allerdings durch die Regelungen zur Farbe im Straßenverkehr eingeschränkt.

Um mit einem LED-Band eine der zuvor genannten, notwendigen Nachrichten zu codieren, gibt es mehrere Optionen. So ließ sich zeigen, dass z.B. ein langsames Blinken oder Pulsieren eines LED-Bandes durch Probanden intuitiver mit einer nachgebenden, defensiven Nachricht verknüpft wird, als eine wischende Animation. Die Farbwahl kann die Intention der Nachricht verstärken, so dass diese für einen Empfänger intuitiv verständlicher wird [15].

Durch die Verkettung von Pixeln nicht nur in eine, sondern in zwei Richtungen, entsteht eine Fläche aus Pixeln, im Allgemeinen als Display bekannt.

Somit ist die Realisierung zweidimensionaler Muster umsetzbar, was die Darstellung von Formen und Symbolen ermöglicht. Ein Vorteil von Symbolen ist, dass sie einen hohen Wiedererkennungswert haben. Dies bedeutet, ist ein Symbol einmal gelernt und verbunden mit einer Nachricht oder Bedeutung, fällt es dem Empfänger leichter dieses wieder zu erkennen. So sind zwar unbekannte Symbole nicht eindeutig und intuitiv mit einer Bedeutung verbunden [16], dies lässt sich aber lernen. Als bekanntes Beispiel lässt sich hier das STOP-Schild aus dem Katalog der Verkehrszeichen nennen, welches allein durch die besondere Form des Achteckes einen sehr hohen Wiedererkennungswert hat, vgl. Bild 7.



Bild 7: STOP-Schild aus der Bildtafel der Verkehrszeichen der Bundesrepublik Deutschland

Auch eine Codierung beispielsweise der Nachrichten „Danke“ oder „Achtung“ lässt sich durch eine Displaydarstellung einfacher realisieren als durch ein LED-Band. Die Nutzung bestimmter Symbole ist Stand heute nicht nur im Verkehr, sondern auch in allgemeinen Bereichen des täglichen Lebens weit verbreitet. So wird ein erhobener Daumen oder eine die Darstellung eines Herzens mit einer positiven, zustimmenden Bedeutung verknüpft. Somit könnten diese Symbole, ohne neu gelernt zu werden, direkt Anwendung in der Kommunikation im Straßenverkehr finden.

## 5. Zusammenfassung

Stand heute gibt es bereits sehr viele Möglichkeiten, eine Kommunikation zwischen einem autonomen Fahrzeug und Verkehrsteilnehmern zu realisieren. Unterschiedliche Technologien, wie LED-Bänder oder Displays, ermöglichen eine beliebig komplexe Darstellung von einfachen Mustern bis hin zu bekannten Symbolen. Dabei ist es nicht unbedingt notwendig, unzählig verschiedene Nachrichten zu kommunizieren. Zur Abbildung der bereits bestehenden Kommunikation zwischen Fahrer und Verkehrsteilnehmer durch eine lichtbasierte Kommunikationsschnittstelle sind wenige Nachrichten ausreichend. Die Wirksamkeit verschiedener Muster, farblicher Darstellungen oder auch Animationen wurde bereits innerhalb von Forschungsarbeiten untersucht. Eine Übertragung in ein reales Studiensetting, sowie die Untersuchung notwendiger Kontraste und Darstellungsgrößen, ist Bestandteil des Forschungsprojektes INITIA-TIVE.

## Literaturangaben

- [1] 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.Schaff(f)t - Grundlagen für Management & Kompetenzentwicklung. Tagungsband 64. Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. 2018
- [2] § 11 StVO 2013 - Einzelnorm, 2022. [https://www.gesetze-im-internet.de/stvo\\_2013/\\_11.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/_11.html), abgerufen am: 14.04.2022
- [3] Merten, K.: Kommunikation. Eine Begriffs- und Prozeßanalyse. Studien zur Sozialwissenschaft, Bd. 35. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften; Imprint 1977
- [4] BAUER, T. H., RISSEN, R., SOCHE, P., TESKE, W. u. VAUGHAN, C. H.: KOMMUNIKATION IM STRASSENVERKEHR (1. ZWISCHENBERICHT). LITERATURSTUDIE AUS JURISTISCHEM, KOMMUNIKATIONSTHEORETISCHEM UND PSYCHOLOGISCHEM BLICKWINKEL. 1980
- [5] Risser, R.: Behavior in traffic conflict situations. Accident Analysis & Prevention 17 (1985) 2, S. 179–197
- [6] SAE Levels of Driving Automation™ Refined for Clarity and International Audience, 2022. <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update>, abgerufen am: 12.04.2022
- [7] Eckert, M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr. Berlin: Verl. Technik 1993
- [8] interACT project: Home, 2022. <https://www.interact-roadautomation.eu/>, abgerufen am: 25.05.2022
- [9] @city: @CITY | Automatisiertes Fahren in der Stadt | Home, 2022. <https://www.atcity-online.de/>, abgerufen am: 25.05.2022
- [10] Shannon, C. E. u. Weaver, W.: The Mathematical Theory of Communication. Urbana: The University of Illinois Press 1964
- [11] 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
- [12] Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B. u. Winner, H.: Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2015
- [13] § 26 StVO 2013 - Einzelnorm, 2022. [https://www.gesetze-im-internet.de/stvo\\_2013/\\_26.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/_26.html), abgerufen am: 14.04.2022

- [14] COHEN, A. S.: MOEGLICHKEITEN UND GRENZEN VISUELLER WAHRNEHMUNG IM STRASSENVERKEHR. TEIL I: WAHRNEHMUNG UND SCHAEZTUNG VON GE-SCHWINDIGKEITEN. TEIL II: INFORMATIONSDEFIZITE WAEHREND NAECHTLI-CHER FAHRTEN. <>. 1986
- [15] 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 Pe-destrians. Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, NY, USA: ACM 04212020, S. 1–13
- [16] Reschke, J., Auburger, M.-T., Marichalar, R. u. Neumann, C.: Kommunikation zwischen automatisierten Fahrzeugen und Fußgängern. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 121 (2019) 9, S. 16–23



# Verbesserung der kameragestützten Objekterkennung im Straßenverkehr durch nahinfrarote Zusatzbeleuchtung

M. Sc. **Max C. Sundermeier**, M. Sc. **Hauke Dierend**,

Prof. Dr.-Ing. **Roland Lachmayer**,

Institut für Produktentwicklung und Gerätebau,

Leibniz Universität Hannover, Garbsen

## Kurzfassung

Durch bisherige Forschungen wird gezeigt, dass durch die Verwendung nahinfraroter Zusatzbeleuchtung die Gesamtbestrahlungsleistung im Verkehrsraum erhöht werden kann, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Im Gegensatz zum Stand der Technik wird in diesem Beitrag ein Ansatz vorgestellt, bei dem das generierte Kamerabild nicht dem Fahrer, sondern für die Unterstützung des maschinellen Sehens zur Verfügung gestellt wird. Da die in Kameras verwendeten CMOS-Sensors, anders als das menschliche Auge, für nahinfrarote Strahlung sensibel sind, kann durch den Einsatz einer entsprechenden Zusatzbeleuchtung der Informationsumfang des Kamerabildes erhöht werden. Mit dem Ziel, eine Verbesserung der kameragestützten Objekterkennung unter Verwendung nahinfraroter Zusatzbeleuchtung zu erreichen, werden in diesem Beitrag die spektrale Sensitivität von CMOS-Kameras, die Funktionsweise von Objekterkennungsalgorithmen und gesetzliche Grenzwerte zur NIR-Beleuchtung der Verkehrsumgebung untersucht. Basierend auf der spektralen Sensitivität des Sensors wird eine Wellenlänge festgelegt, ein Prototyp aufgebaut und der Einfluss der Bestrahlungsstärke auf das Kamerabild analysiert. Für die Auswertung der erhobenen Kamerabilder werden beispielhaft verschiedene bildbasierte Objekterkennungsalgorithmen vorgestellt. Anschließend wird der Einfluss nahinfraroter Bestrahlung auf die Objekterkennungsalgorithmen für unterschiedliche Beleuchtungs- und Einsatzszenarien untersucht.

## 1. Einleitung

Die Entwicklung von Fahrzeugbeleuchtung ist seit je her getrieben von der Optimierung der Ausleuchtung der Verkehrsumgebung für die menschliche Wahrnehmung. Durch Fortschritte in der Entwicklung von Lichtquellen und Beleuchtungstechnologie wird das menschliche Sehvermögen bei Nacht verbessert ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Die Verbesserung der Beleuchtungstechnologie wird insbesondere durch die Entwicklung von hochauflösenden Scheinwerfern vorangetrieben [1 bis 3]. Die Beleuchtung durch sichtbares Licht im Straßenverkehr ist allerdings durch die Gesetzgebung streng limitiert. Durch die gesetzlichen Einschränkungen wird neben dem menschlichen Sehvermögen auch die Erkennungsreichweite und -genauigkeit von Kamerasytemen, welche ihrerseits gleichermaßen auf die Beleuchtung des Verkehrsraumes angewiesen sind, beschränkt. Da die Entwicklung der Fahrzeuglichttechnik auf menschliches Sehen fokussiert ist, sind die Möglichkeiten des NIR-Beleuchtungsspektrums für das Kamerasehen nicht ausgeschöpft. Die voranschreitende Entwicklung von Anwendungen des automatisierten Fahrens verstärkt die Bedeutung der Umgebungserkennung und insbesondere der kamerabasierten Objekterkennung in Kraftfahrzeugen (KFZ) [4]. Daher sind bei der Entwicklung von Fahrzeugscheinwerfern die Eigenschaften von Kamerasytemen zu berücksichtigen, um die Erkennung der Verkehrsumgebung präzise zu ermöglichen. Aus den Eigenschaften der Kamerasyteme folgt die Möglichkeit ein über das sichtbare Licht hinausgehendes Spektrum für die Beleuchtung des Straßenverkehrs zu nutzen, um sowohl menschliches als auch maschinelles Sehen zu adressieren.

In diesem Beitrag werden Anforderungen an ein nahinfrarotes (NIR) Beleuchtungssystem unter Berücksichtigung der Funktionsweise von Objekterkennungsalgorithmen ermittelt. Dazu wird in Abschnitt 3 mathematisch die erforderliche NIR-Leistung beschrieben, um eine mit sichtbarem (VIS) Licht vergleichbare Kamerabildhelligkeit zu erzeugen sowie in Abschnitt 4 eine Versuchsreihe ausgelegt und durchgeführt, bei der der Einfluss der VIS und NIR Bestrahlungsstärke auf die Erkennungsgenauigkeit von Objekterkennungsalgorithmen untersucht wird. Im Folgenden wird zunächst auf die Kamera- sowie Objekterkennungstechnologie im Automobil sowie auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen eingegangen. Auf Basis der Quanteneffizienz von herkömmlichen Fahrzeugkameras wird die erforderliche Bestrahlungsstärke beschrieben und eine Wellenlänge für einen NIR-Scheinwerfer festgelegt. Anschließend werden der NIR-Scheinwerfer und die Versuche zur Bestimmung der von der Bestrahlungsstärke abhängigen Objekterkennungsgenauigkeit vorgestellt.

## 2. Technologie und Regularien

Für die Entwicklung eines Beleuchtungssystems für kameragestützte Objekterkennung im Straßenverkehr wird im Folgenden zunächst auf die in KFZ verwendeten Kameratechnologien, die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von nahinfraroter Strahlung im Kraftfahrzeug sowie auf die Funktionsweise von Objekterkennungsalgorithmen eingegangen. Anhand von Technologie und Regularien wird in Kapitel 3 ein Vorschlag für ein NIR-Scheinwerfersystem vorgestellt.

Üblicherweise werden in KFZ-Kameras monochrome CMOS Sensoren eingesetzt. Um Farberkennung der Kameras zu ermöglichen werden unterschiedliche Filtermuster vor den Pixeln des Sensors eingesetzt. Dabei wird eine Gruppe von vier Pixeln mit einer spezifischen Filterkombination versehen, deren Kombination die Berechnung eines Farbbildes ermöglicht. Zur Repräsentation des menschlichen Sehens wird üblicherweise ein Rot-Grün-Grün-Blau (RGGB) Filter verwendet, bei dem die erhöhte Sensitivität des menschlichen Auges im grünen Spektrum berücksichtigt wird. Da Roterkennung zur Erkennung von beispielsweise Rückleuchten und roten Ampeln einen zentralen Bestandteil der automobilen Kameraerkennungen darstellt, werden zur Steigerung der Sensitivität gegenüber RGGB-Kameras keine monochromen Sensoren verwendet, sondern Rot-Klar-Klar-Blau (RCCB) und Rot-Klar-Klar-Klar (RCCC) Filter [5]. RCCB und RCCC gefilterte Kameras werden in den letzten Jahren neben den klassischen RGGB Kameras vermehrt in der Automobilbranche eingesetzt [6]. Durch die Klarfilter wird die Sensitivität der Kamera bei Verlust der Farbinformation erhöht. Eine RCCC Kamera ermöglicht nur die Farberkennung von rotem Licht, mit den drei verbleibenden Pixeln können keine Farbinformationen ermittelt werden. Darüber hinaus sind die Objektive von RGGB-Kameras häufig mit IR-Filtern ausgestattet, wodurch die Detektion von IR-Strahlung verhindert wird. Neben der Transmissivität der Filter hat der Sensor der Kamera einen zentralen Einfluss auf die Möglichkeiten hinsichtlich der Verwendung von NIR Scheinwerfern. Durch die sogenannte Quanteneffizienz wird der Anteil an den auf dem Sensor auftreffenden Photonen, welche in Elektronen umgewandelt und durch das System erkannt werden können, beschrieben. Die Quanteneffizienz ist somit die zentrale Kenngröße für die Beschreibung der Kamerasensitivität. Eine beispielhafte Quanteneffizienz für einen CMOS Sensor ist in Abbildung 1 dargestellt.

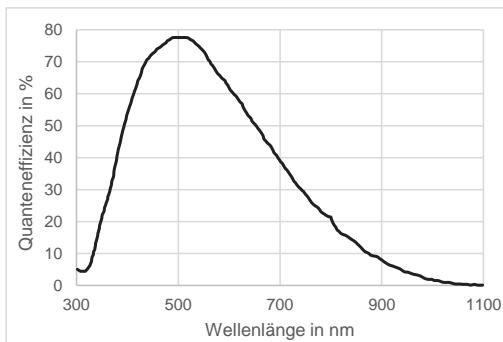


Abbildung 1: Quanteneffizienz eines beispielhaften CMOS-Sensors nach [7]

Für den beispielhaften Sony IMX 174 CMOS-Sensor wird eine maximale Quanteneffizienz bei einer Wellenlänge von etwa 500 nm erreicht. Im NIR-Bereich des elektromagnetischen Spektrums wird eine Effizienz von maximal 23% erreicht. Die Quanteneffizienz fällt auf unter 1% für Wellenlängen über 1020 nm.

Der Einsatz von nahinfraroter Strahlung in der Verkehrsumgebung wird in Europa durch die Vorgaben der UN/ECE reguliert. Nach UN/ECE Regulation Nr. 112 darf der Einsatz von Infrarotstrahlung nur in Kombination mit einer Hauptlichtquelle erfolgen. Dabei ist eine automatische Abschaltvorrichtung der Infrarotlichtquelle bei Ausfall der Hauptlichtquelle vorzusehen. Die zulässige infrarote Strahlungsleistung ist weder durch die UN/ECE noch im angloamerikanischen Raum durch die FMVSS reguliert, weshalb die Emissionsgrenzen für Augensicherheit zur Auslegung herangezogen werden können [8 bis 10].

Neben der Auflösung und der Quanteneffizienz des Kamerasensors haben insbesondere der Bildkontrast und die Bildhelligkeit Einfluss auf die Objekterkennung [14]. Der Bildkontrast wird als der Quotient zwischen dem maximalen und minimalen Pixelwert verstanden und beeinflusst, wie zuverlässig Kanten relevanter Objekte im Bild identifiziert werden. Bei einer geringen Bildhelligkeit liegen viele schwarze bzw. nahezu schwarze Bereiche vor, bei einer hohen Bildhelligkeit hingegen viele weiße Bereiche. In einem Fahrzeug werden Helligkeit und Kontrast in den Fahrzeugkamerabildern von den Fahrzeugscheinwerfern beeinflusst und damit die Qualität der Objekterkennung. Die Objekterkennung setzt sich aus der Lokalisierung und der Klassifizierung von Objekten zusammen. In der bildbasierten Objekterkennung werden bevorzugt maschinelle Lernverfahren eingesetzt, primär die Convolutional Neural Networks (CNN). Ein CNN besteht aus einer Reihe sogenannter Faltungs- und Pooling-Schichten, die wiederum jeweils durch künstliche Neuronen

repräsentiert werden. In den Faltungsschichten werden Merkmale, z. B. Kanten, Linien oder Texturen aus dem Eingangsbild bzw. der vorherigen Schicht extrahiert, während in den Pooling-Schichten die erkannten Merkmale verdichtet werden und somit die Auflösung reduziert wird. Den Abschluss bilden eine oder mehrere vollständig verknüpfte Schichten, bei denen jedes Neuron mit allen Neuronen der vorherigen Schicht verbunden ist und die berechneten Merkmale klassifiziert werden. Verbreitete CNN-Modelle sind das Region-based CNN (R-CNN), dessen Weiterentwicklungen Fast R-CNN und Faster R-CNN sowie YOLOv3 und CenterNet [11]. Bei Ersteren wird die Objekterkennung in zwei Schritte aufgeteilt. In einem ersten Schritt werden Regions of Interest (RoI) im Bild gesucht, in denen im zweiten Schritt Merkmale extrahiert und klassifiziert werden. In YOLOv3 wird das Bild in gleichgroße Zellen unterteilt und für jede Zelle mehrere Rechtecke (Bounding Boxes) zur Objektlokalisierung im gesamten Bild, inklusive Wahrscheinlichkeiten für die Objektklassen, berechnet [12]. Im Modell CenterNet werden Objekte detektiert, indem die oberen linken und die unteren rechten Ecken von Bounding Boxes auf Basis zweier Heatmaps geschätzt und parallel dazu die Mittelpunkte von Objekten anhand einer weiteren Heatmap prädiziert werden. Liegt ein Mittelpunkt in der Mitte einer Bounding Box gleicher Klasse, wird ein Objekt detektiert [13].

### 3. Nahinfrarote Beleuchtung für CMOS-Kameras

Zur Ermittlung der Anforderungen von Objekterkennungsalgorithmen hinsichtlich NIR-Bestrahlungsstärke wird ein optisches System ausgelegt, welches das Field of View (FoV) von typischen Fahrzeugkameras mit NIR-Strahlung beleuchtet. Für die Auslegung des optischen Systems werden zunächst die möglichen Wellenlängen sowie erforderliche Strahlleistungen in Abhängigkeit von der verwendeten Kameratechnologie diskutiert. Da die NIR-Quanteneffizienz von CMOS-Kameras zwar nur etwa  $\frac{1}{3}$  -  $\frac{1}{4}$  der Quanteneffizienz im VIS-Bereich entspricht, die gesetzlichen Grenzwerte für NIR-Strahlung jedoch deutlich weniger restriktiv sind, ist die Verwendung von NIR-Strahlung zur Erweiterung der kamerabasierten Objekterkennung bei Nacht vielversprechend. In [12] wird erläutert, dass die Verwendung einer möglichst kurzen NIR-Wellenlänge für den Einsatz in Fahrzeugscheinwerfern anzustreben ist und eine Wellenlänge von 810 nm als optimal ermittelt. Unter der Berücksichtigung der geringen Verfügbarkeit von infrarot emittierenden Dioden (IREDs) mit Strahlungsleistungen  $> 1$  W bei 810 nm wird die Wellenlänge des NIR-Scheinwerfers auf 850 nm angepasst. Zwar beträgt die Quanteneffizienz des in Abbildung 1 gezeigten Sensors bei 850 nm nur etwa 67% der Quanteneffizienz bei 810 nm, durch die Verfügbarkeit von IREDs mit mehr als 5-facher Strahlungsleistung bei 850 nm wird die

Verringerung der Quanteneffizienz allerdings kompensiert. Die zu berücksichtigende Halbwertsbreite beider IREDs unterscheidet sich nur geringfügig, weshalb die IREDs mit ihren Spaltenwellenlängen bezeichnet werden [13, 14]. Zur Auslegung eines NIR-Scheinwerfers wird zunächst das Verhältnis von NIR- zu VIS-Bestrahlungsstärke, die die im NIR-Bereich geringere Quanteneffizienz kompensiert, beschrieben. Zur Vergleichbarkeit von NIR und VIS Strahlung werden die photometrischen Größen für herkömmliche Fahrzeugscheinwerfer in radiometrische Größen umgerechnet. Dabei wird vereinfachend von einem Lichtstrom von 3200 lm einer Scheinwerferlichtquelle und dem Emissionsspektrum einer automotive-zertifizierten OSRAM OSTAR Headlamp Pro unter Laborbedingungen als Referenzlichtquelle ausgegangen [15, 16]. Die Vermessung der Lichtquelle bei einer Stromstärke von  $I = 1 \text{ A}$  in einer Ulbrichtkugel ergibt eine Strahlungsleistung von  $\Phi_{e,w} = 1,22 \text{ W}$  und einen Lichtstrom von  $\Phi_{v,w} = 365,4 \text{ lm}$ . In Bezug auf den Lichtstrom einer Scheinwerferlichtquelle von bis zu  $\Phi_v = 3200 \text{ lm}$  folgt eine übliche Strahlungsleistung von etwa  $\Phi_e = 10,48 \text{ W}$  für den sichtbaren Fahrzeugscheinwerfer [15]. In [12] wird ein Leistungs-Sensitivitäts-Faktor (Power-Sensitivity-Factor, PSF) als Zusammenhang zwischen Kamerasensitivität und Emissionsspektrum mathematisch bestimmt, um die erforderliche Strahlungsleistung einer NIR-Quelle zu beschreiben. Der PSF beschreibt in Abhängigkeit von der Wellenlänge das Produkt aus normierter Sensitivität eines CMOS-Sensors und dem normierten Emissionsspektrum der Quelle. Dabei werden sowohl Sensitivität als auch Emissionsspektrum Anteil am Maximum normiert. Der PSF ist definiert als

$$PSF_\lambda = P_{n,\lambda} \cdot S_{n,\lambda}.$$

Unter Verwendung des PSF für die oben genannte sichtbare Strahlquelle und eine bei 850 nm emittierende IRED kann ein Leistungsverhältnis (Power Ratio)

$$PR(850 \text{ nm}) = \frac{\int PSF_{\lambda,VIS\ LED} d\lambda}{\int PSF_{\lambda,IRED} d\lambda} = \frac{4673,3}{1038,5} = 4,5$$

bestimmt werden. Durch das Leistungsverhältnis PR (850 nm) wird beschrieben, um welchen Faktor die Leistung einer IRED mit einer Wellenlänge von 850 nm höher sein muss als die Leistung der OSRAM OSTAR Headlamp Pro. Unter Berücksichtigung der angenommenen Strahlungsleistung von VIS-Scheinwerfern kann eine erforderliche Leistung von

$$P_{erf} = PR(850 \text{ nm}) \cdot \Phi_e = 4,5 \cdot 10,48 \text{ W} = 47,16 \text{ W}$$

berechnet werden. Durch messtechnische Validierung in [12] wird den Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die erforderliche Leistung deutlich. So wird die erforderliche Leistung insbesondere durch die, im Verkehrsumfeld unbestimmte, Reflektivität der bestrahlten Objekte beeinflusst. Daher wird gegenüber PR(850 nm) ein Sicherheitsfaktor von 1,5 berücksichtigt. Daraus folgt eine erforderliche Strahlungsleistung von 70,74 W bei 850 nm. Mit dem Einsatz von Osram LZ4-00R608 IREDs, welche im Normalbetrieb 3,75 W als Lambertstrahler emittieren, folgt mit einer Effizienz der Strahlungsbündelung von ca. 60%, eine erforderliche Menge von 32 IREDs pro Scheinwerfer.

#### **4. Einfluss von nahinfraroter Beleuchtung auf kamerabasierte Objekterkennung**

In dem in Abschnitt 3 ermittelten mathematischen Faktor zur Bestimmung der erforderlichen Strahlleistung werden mögliche Anforderungen der kamerabasierten Objekterkennung nicht berücksichtigt, weshalb im Folgenden die Abhängigkeit der Erkennungsgenauigkeit von der Strahlungsleistung, beziehungsweise der Bestrahlungsstärke, untersucht wird. Der zuvor ausgelegte NIR-Scheinwerfer wird verwendet, um Objekte in unterschiedlichen Abständen zu beleuchten, sodass das Verhältnis zwischen Bestrahlungsstärke und Objekterkennungsgenauigkeit untersucht werden kann. Aufgrund der Filter der RGGB-Kamera, welche infrarote Strahlung nicht transmittieren, sind RGGB-Kameras nicht für einen Einsatz geeignet. Die unzureichende Transmission von NIR-Strahlung wird an einer IDS GV-5250CP-C-HQ RGGB-Kamera nachgewiesen. Daher wird eine Leopard Imaging RCCC Kamera mit einer Lensagon BM4018S118 Linse auf einer fahrzeugüblichen Höhe von 0,8 m über den Scheinwerfern verwendet, um die beleuchtete Szene aufzunehmen [17]. Die aufgenommenen Bilder werden mithilfe von drei beispielhaften Objekterkennungsalgorithmen ausgewertet und die Erkennungsgenauigkeit untersucht. Als Objekterkennungsalgorithmen werden Faster-RCNN, YOLOv3 und CenterNet, jeweils mit dem BDD100K-Datensatz trainiert, verwendet [18]. Da das Training für den Einsatz mit RGGB-Kameras ausgelegt ist, ist eine Abweichung der absoluten Erkennungsgenauigkeit zu erwarten. Durch die relative Änderung der Erkennungsgenauigkeit bei unterschiedlicher Bestrahlungsstärke können trotz der Abweichung des Absolutwertes Rückschlüsse auf erforderliche Bestrahlungsstärken gezogen werden. Zur Messung der Erkennungsgenauigkeit bei Abblend- und Fernlicht, als Vergleichswert zur NIR-Bestrahlung, werden die LED-Scheinwerfer eines Volkswagen Passat Baujahr 2018 verwendet. Für die Versuche werden entlang der optischen Achse der Kamera an Messpunkten in

unterschiedlichen Abständen zur Kamera je eine Person, ein Fahrrad und ein Volkswagen Touareg Baujahr 2012 mit eingeschaltetem Abblendlicht statisch positioniert. Die Versuchsperson ist ein weißer, 1,93 m großer, in schwarzer Winterkleidung gekleideter Mann. Das Fahrrad wird quer zu Scheinwerfer und Kameras positioniert, hat keinen Fahrer, keine Reflektoren und ist mit einer herkömmlichen Frontbeleuchtung ausgestattet. Die Versuche werden statisch in einer trockenen Nacht durchgeführt. An jedem der Messpunkte werden in unterschiedlichen Lichtkonfigurationen Bilder mit der RCCC-Kamera aufgenommen sowie die Bestrahlungsstärke gemessen. Für Fußgänger und Fahrradfahrer wird die Bestrahlungsstärke 1 m über dem Boden und für das Versuchsfahrzeug im unteren Bereich der Windschutzscheibe gemessen. Tabelle 1 zeigt die für die Versuche verwendeten Lichtkonfigurationen.

Tabelle 1: Lichtkonfigurationen

Konfigurationszahl	VIS	NIR	Anmerkung
1	Aus	Aus	Dunkelmessung
2-8	Aus	7 aufsteigende Leistungsschritte	
9	Abblendlicht	Aus	
10	Fernlicht	Aus	

Person und Fahrrad werden mit einem 5 m Inkrement in Abständen von 5 bis 25 m von der Kamera und das Fahrzeug in Abständen von 25 bis 175 m mit einem Inkrement von 25 m positioniert. Abbildung 2 zeigt ein beispielhaftes Bild von einem Fußgänger in 10 m Entfernung und der Erkennung durch den Faster R-CNN Algorithmus mit einer Erkennungsgenauigkeit von 100%.



Abbildung 2: Versuchsperson in 10 m Entfernung bei Lichtkonfiguration 4 (Ausschnitt, nachbearbeitet)

In den Abbildungen 3 und 4 sind beispielhaft unterschiedliche charakteristische Verläufe der Erkennungsgenauigkeit des Faster R-CNN Algorithmus in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke nach Tabelle 1 gezeigt.

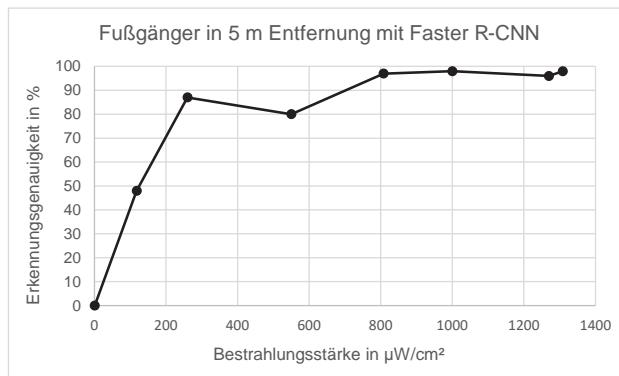


Abbildung 3: Erkennungsgenauigkeit Fußgänger in 5 m, Lichtkonfiguration 1-8,  
Dunkelmessung:  $0,85 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$

In Abbildung 3 wird gezeigt, dass bei der Erkennung der Versuchsperson bei steigender Bestrahlungsstärke eine steigende Erkennungsgenauigkeit verzeichnet werden kann. Dabei wird die maximale Erkennungsgenauigkeit von 98% bereits bei einer Bestrahlungsstärke von 1000  $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$  erreicht und auch bei höheren Bestrahlungsstärken nicht verbessert. Eine Erkennung des Fußgängers ist mit Abblend- und Fernlicht nicht möglich. Im Gegensatz dazu

steht die Erkennung eines Fahrzeuges in 100 m durch den Faster R-CNN Algorithmus, wie in Abbildung 4 gezeigt.

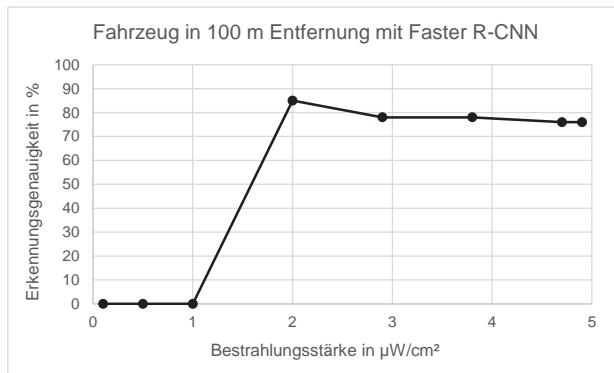


Abbildung 4: Erkennungsgenauigkeit Fahrzeug in 100 m, Lichtkonfiguration 1-8,  
Dunkelmessung:  $0,1 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$

Bei Dunkelheit kann trotz des eingeschalteten Abblendlichtes das Versuchsfahrzeug nicht erkannt werden. Bei einer Bestrahlungsstärke von  $2 \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$  wird eine maximale Erkennungsgenauigkeit von 85% erzielt, während sich höheren Bestrahlungsstärken die Erkennungsgenauigkeit verschlechtert. Eine Erkennung mit Abblend- und Fernlicht ist nicht möglich.

Anhand der in Abbildung 3 und 4 gezeigten beispielhaften Verläufe der Erkennungsgenauigkeit kann eine Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke nachgewiesen werden. Die Abhängigkeit der Erkennungsgenauigkeit von der Bestrahlungsstärke unterscheidet sich für unterschiedliche Algorithmen und Detektionsobjekte. Aufgrund der Objekterkennung durch Kantenerkennung anhand von Kontrasten kann eine Abhängigkeit der Erkennungsgenauigkeit von der vom Detektionsobjekt ausgehenden Beleuchtung, im Folgenden Eigenlicht genannt, angenommen werden. So wird, wie in Abbildung 3 gezeigt, bei einem Objekt ohne Eigenlicht mit höherer Bestrahlungsstärke auch eine höhere Erkennungsgenauigkeit erzielt. Im Gegensatz dazu wird die Erkennungsgenauigkeit eines Fahrzeugs mit eigener Beleuchtung durch steigende Bestrahlungsstärken reduziert, wie in Abbildung 4 gezeigt. Bei Detektionsobjekten ohne Eigenlicht wird durch zusätzliche Bestrahlung der Kontrast zur Umgebung erhöht, die Erkennung daher verbessert. Bei Detektionsobjekten mit Eigenlicht wird der Kontrast durch die zusätzliche Bestrahlung verringert und folglich auch die Erkennungsgenauigkeit. Kann die Abhängigkeit vom

Eigenlicht des Detektionsobjektes weiterführend nachgewiesen werden, unterscheidet sich die für die Objekterkennung erforderliche Lichtverteilung in Abhängigkeit von den zu detektierenden Objekten.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Fahrzeugscheinwerfer werden derzeit mit dem Fokus auf die visuelle Wahrnehmung des Fahrers ausgelegt. Vorangegangene Forschung zeigt die Möglichkeiten, die nahinfrarote Beleuchtung des Verkehrsraumes bietet. Durch die Verschiebung der Fahraufgabe vom Fahrer zum Fahrzeug mit steigendem Automatisierungsgrad der Fahrzeuge steigt die Relevanz der Erkennung der Umgebung durch das Fahrzeug. Durch Anpassung der sichtbaren Lichtverteilung und einer Erweiterung durch nahinfrarote Zusatzbeleuchtung kann die Umgebungswahrnehmung des Fahrzeuges zur Steigerung der Sicherheit von automatisierten Fahrzeugen optimiert werden. In diesem Beitrag wird ein Faktor zur Beschreibung der erforderlichen nahinfraroten Strahlleistung als Funktion der sichtbaren Strahlleistung, beziehungsweise des Lichtstromes eines Fahrzeugscheinwerfers definiert. Auf Basis der ermittelten nahinfraroten Strahlleistung wird ein nahinfraroter Scheinwerfer ausgelegt. Unter der Verwendung des Scheinwerfers und einer Auswahl von trainierten Objekterkennungsalgorithmen wird die Erkennungsgenauigkeit, mit welcher unterschiedliche Objekte bei infraroter Bestrahlung erkannt werden können, in Abhängigkeit von Bestrahlungsstärke, Objektart und -entfernung untersucht. Durch die Versuche wird eine Abhängigkeit des bestrahlungsstärkeabhängigen Verlaufes der Erkennungsgenauigkeit vom Eigenlicht des zu erkennenden Objektes indiziert, welche weiterführend zu untersuchen ist.

Aufgrund von Unsicherheiten in der Erkennung, kann der Zusammenhang zwischen Bestrahlungsstärke und Objekterkennungsgenauigkeit qualitativ bewertet aber nicht quantifiziert werden. Durch eine Ausweitung der Versuche auf weitere Detektionsobjekte des gleichen Typs, also mehrere Fahrzeuge, Fußgänger und Fahrräder, kann die Validität gesteigert werden. Zur Ausweitung der Versuche ist insbesondere auch der Einsatz einer simulativen Versuchsumgebung Nachbildung und Erweiterung der Szenarien zu untersuchen. Darüber hinaus ist eine, im Vergleich zur Erkennung von Fußgängern und Autos, schlechte Erkennung von Fahrrädern als Voreingenommenheit (*algorithmic bias*) des Trainings festzustellen, was in weiterführender Forschung zu untersuchen ist. Für optimiertes Mensch-Maschine-Sehen kann eine Kombination aus VIS und NIR-Strahlung erforderlich sein, weshalb die zuvor durchgeführten Versuche auf unterschiedliche Bestrahlungsstärken im VIS Spektrum zu erweitern sind.

## Literaturangaben

- [1] Li, Y., Knöchelmann, M. u. Lachmayer, R.: High-resolution headlamps: Innovative functionalities and the potential of using laser diodes as light sources
- [2] Knöchelmann, M., Held, M. P., Kloppenburg, G. u. Lachmayer, R.: High-resolution headlamps – technology analysis and system design. *Advanced Optical Technologies* 8 (2019) 1, S. 33–46
- [3] Ley, P.-P. u. Lachmayer, R.: Imaging and non-imaging illumination of DLP for high resolution headlamps. In: *Proceedings of SPIE 10932, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications XI*
- [4] Molenaar, R., van Bilsen, A., van der Made, R. u. Vries, R. de: Full spectrum camera simulation for reliable virtual development and validation of ADAS and automated driving applications. *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE 2015, S. 47–52
- [5] Weikl, K., Schroeder, D. u. Stechele, W.: Optimization of automotive color filter arrays for traffic light color separation. *Color and Imaging Conference 2020* (2020) 28, S. 288–292
- [6] Karanam, G.: Interfacing Red/Clear Sensors to ADSP-BF609® Blackfin Processors. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/EE358.pdf>, abgerufen am: 22.12.2021
- [7] Jacoby, M.: Sony Pregius Global Shutter CMOS Imaging Performance. *FLIR White Paper Series* (2017)
- [8] Economic Commission for Europe of the United Nations: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing beam or a driving beam or both and equipped with filament lamps and/or LED modules. Regulation No 112. 2010
- [9] U.S. Department of Transportation: Standard No. 108; Lamps, reflective devices, and associated equipment. 2004
- [10] European Parliament: Minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to risk arising from physical agents (artificial optical radiation). Directive 2006/25/EC. 2006
- [11] Ren, S., He, K., Girshick, R. u. Sun, J.: Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. Curran Associates, Inc 2015
- [12] Sundermeier, M. C., Dierend, H., Ley, P.-P., Wolf, A. u. Lachmayer, R.: Active NIR illumination for improved camera view in automated driving application. *Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XXVI*. SPIE 2022 - 2022, S. 25

- [13] OSRAM Opto Semiconductors GmbH: OSLUX®, SFH 4780S.  
[https://www.osram.com/ecat/OSLUX%C2%AE%20SFH%204780S/com/en/class\\_pim\\_web\\_catalog\\_103489/prd\\_pim\\_device\\_2219942/](https://www.osram.com/ecat/OSLUX%C2%AE%20SFH%204780S/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2219942/), abgerufen am: 07.12.2021
- [14] OSRAM Opto Semiconductors GmbH: LZ4-00R608. LED ENGIN LuxiGen, 2021.  
[https://www.osram.com/ecat/LED%20ENGIN%20LuxiGen%20LZ4-00R608/com/en/class\\_pim\\_web\\_catalog\\_103489/prd\\_pim\\_device\\_15918977/](https://www.osram.com/ecat/LED%20ENGIN%20LuxiGen%20LZ4-00R608/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_15918977/), abgerufen am: 28.04.2022
- [15] OSRAM GmbH: Xenarc Original D2S.  
[https://www.osram.de/appsj/pdc/pdf.do?cid=GPS01\\_1056953&vid=PP\\_EUROPE\\_DE\\_eCat&lid=DE&mpid=ZMP\\_4055061](https://www.osram.de/appsj/pdc/pdf.do?cid=GPS01_1056953&vid=PP_EUROPE_DE_eCat&lid=DE&mpid=ZMP_4055061), abgerufen am: 05.05.2022
- [16] OSRAM Opto Semiconductors GmbH: OSRAM OSTAR® Headlamp Pro, LE UW U1A2 01.  
[https://www.osram.com/ecat/OSRAM%20OSTAR%C2%AE%20Headlamp%20Pro%20LE%20UW%20U1A2%2001/com/en/class\\_pim\\_web\\_catalog\\_103489/prd\\_pim\\_device\\_2191153/](https://www.osram.com/ecat/OSRAM%20OSTAR%C2%AE%20Headlamp%20Pro%20LE%20UW%20U1A2%2001/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2191153), abgerufen am: 07.12.2021
- [17] Lensation GmbH: BM4018S118. <https://www.lensation.de/pdf/BM4018S118.pdf>, abgerufen am: 05.05.2022
- [18] BDD100K: A Diverse Driving Dataset for Heterogeneous Multitask Learning, Yu, F., Chen, H., Wang, X., Xian, W., Chen, Y., Liu, F., Madhavan, V. u. Darrell, T., 2018



# Stadtlicht mit hochauflösenden Scheinwerfern: Verbesserte Ausleuchtung, reduzierte Blendung und Energieeinsparung

Dr. rer. nat. **Carsten Wilks**, Dipl.-Ing. **Boris Kubitz**,  
HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt

## Kurzfassung

In diesem Beitrag stellen wir neue Ansätze für ein intelligentes Stadtlicht mit einem hochauflösenden Scheinwerfer vor. Dabei setzen wir bei den derzeitigen Schwächen in beleuchteten Städten auf und schlagen Lösungen für eine bessere Beleuchtung in der Stadt vor. Die Ziele der neuen Ansätze sind die Verbesserung der Erkennbarkeit von Objekten und Personen, die Verringerung der Blendung, die Einsparung von Energie und die Verbesserung der Sichtbarkeit des Fahrzeugs in städtischen Situationen. Die Funktion Intelligentes Stadtlicht wird anhand von exemplarischen Fahrten mit Hilfe eines SSL|HD-Testfahrzeugs vorgestellt und diskutiert.

## Abstract

In this paper, we present new approaches for an Intelligent Town Light with a high-resolution headlamps. We start from current weaknesses in illuminated cities and propose solutions for better illumination in the city. The goals of the new approach are improving the detectability of objects and people, reducing glare, saving energy and improving the visibility of the vehicle in town situations. The Intelligent Town Light function will be presented and discussed by means of exemplary drives with the help of an SSL|HD test vehicle.

## 1. Lichtbasierte Assistenzsysteme

Lichtbasierte Assistenzsysteme wurden in den letzten Jahren wesentlich weiterentwickelt. Startend mit den AFS-Systemen in den 90ern Jahren wurde Blendfreies Fernlicht 2010 erstmals in Serie gebracht. Mit der Einführung von hochauflösenden Pixelsystemen wurde auf der einen Seite Blendfreies Fernlicht weiter optimiert und somit die Sicherheit für den Fahrer erhöht und auf der anderen Seite neue zusätzliche Assistenzsysteme entwickelt. Aktuell werden in der Gesetzgebung folgende HD-Lichtfunktionen diskutiert: Warnsymbole (Schneeflocke, Kollisionswarnung, Falschfahrerwarnung, Spurhaltewarnung) und die Hervorhebung der eigenen Trajektorie (Abbildung 1).

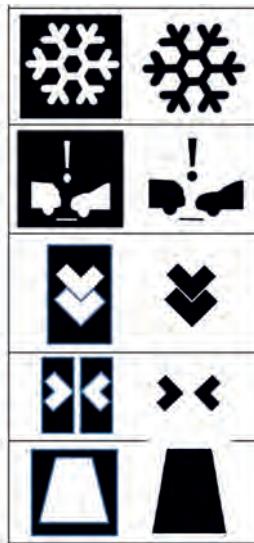


Bild 1: Vorschläge für HD-Symbolprojektionen

Diese Systeme unterstützen den Fahrer durch Projektion von Symbolen zusätzlich zur Lichtverteilung, d.h. die gezeigten Symbole und die bekannten Lichtverteilungen überlagern sich vor dem Fahrzeug.

## 2. Hochauflösende Lichttechnik SSL|HD

Zurzeit befinden sich hochauflöste Lichtquellen mit 15 bis 26 tausend Pixeln in der Entwicklung [1] [2] [3] [4]. Gespeist und gesteuert von einer intelligenten elektronischen Steuereinheit (HD-ECU) wird die lichtemittierende Fläche der SSL|HD-Lichtquelle direkt von einem effizienten und kompakten Objektivsystem projiziert, ohne zwischen liegende primär Optik.

Ein beispielhaftes Lichtquellenmodul ist in Abbildung 2 dargestellt und trägt die SSL|HD-Lichtquelle, die in der Mitte zu sehen ist. Deren applizierbare Lichtmuster werden von dieser Lichtquelle über eine Projektion direkt auf den Verkehrsraum abgebildet. HELLA's Intention bei der Entwicklung dieser SSL|HD-Lichtquellen war es, einen allgemeinen Industriestandard für SSL|HD-Lichtquellen zu setzen, um Kompatibilität, aber auch technischen und kommerziellen Wettbewerb zu erreichen. Dies wurde für viele technische Parameter der verschiedenen Lichtquellen erreicht. Insbesondere diese Errungenschaft ebnet den Weg für eine potentiell schnell wachsende SSL|HD-Evolution von der Premium- in die Mittel- und Einstiegsklasse des Automobils. Vor allem die Kompatibilität der elektrischen Schnittstellen, um diese Lichtquellen in

ähnlicher Weise anzusteuern und zu betreiben, ist ein Schlüssel, um die Durchdringung zu erhöhen. Aber auch die Gesamtsystemarchitektur des Fahrzeugs wird eine Schlüsselrolle spielen, um die notwendigen Daten (z.B. Sensorinformationen) bereitzustellen, damit diese fortschrittlichen Beleuchtungssysteme genutzt werden können und die Vorteile ihrer Fähigkeiten zum Tragen kommen.

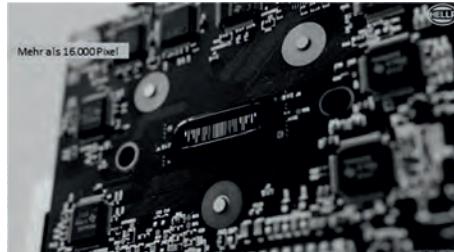


Bild 2: SSL|HD Lichtquellenmodul mit in der Mitte platziertem SSL|HD-Lichtquelle.

Die LED-Pixel der Lichtquelle werden direkt in den Verkehrsraum abgebildet.

Mit einem SSL|HD-Lichtmodul mit vorgesetzter Projektionsoptik ist man in der Lage einen Ausleuchtbereich von ca.  $24^\circ \times 6^\circ$  (horizontal x vertikal) mit einem EMax von ungefähr 130lx auf einer 25m Wand zu erzeugen. Aus thermischen Anforderungen ist eine vollständige Ausleuchtung des Bereiches nicht möglich. Dies ist jedoch für eine Lichtfunktion auch nicht nötig, da die Grundlichtfunktion auf einer Gauß-Verteilung basiert. Lokal kann die Lichtquelle das maximale EMax erzeugen. Diese Eigenschaft werden wir uns bei den folgenden Ansätzen für ein intelligentes HD-Stadtlicht zu Nutze machen.

### 3. Ansatz für ein HD-Stadtlicht

In dieser Veröffentlichung möchten wir neue Möglichkeiten einer hochauflösten Lichtquelle für den Einsatz in einer Stadt „beleuchten“. Die AFS-Reglung beschreibt schon eine Stadtlichtverteilung, jedoch nutzen die aktuellen Stadtlichtverteilungen nicht die Möglichkeiten der hochauflösten Lichtquelle. Der Verkehr in den Städten nimmt immer weiter zu und die Blendwirkung wird mit zunehmendem Alter immer relevanter. Auch wurde das Thema bessere Ausleuchtung und reduzierte Blendung in der Stadt in den letzten Jahren nicht aktiv weiterentwickelt. Daher sehen wir noch großes Potential in diesem Bereich.

Als Ziel werden 2 Ansätze verfolgt: durch die Erhöhung der Lichtintensität soll die Erkennbarkeit von Objekten verbessert werden, wobei gleichzeitig die Blendung anderer Fahrer reduziert werden soll. Die HD-Technologien bieten ideale Voraussetzung beide Ansätze gleichzeitig zu erfüllen, da eine hohe Beleuchtungsstärke räumlich stark begrenzt erzeugt werden kann. Dies

ist mit konventionellen Systemen nicht möglich, d.h. eine lokale Erhöhung der Beleuchtungsstärke erzeugt auch immer eine Erhöhung im Umfeld. Dadurch kann nicht gleichzeitig die Beleuchtungsstärke wesentlich erhöht werden, ohne die Blendwerte ebenfalls zu erhöhen.

Im Folgenden zeigen wir Verbesserungsmöglichkeiten in der Stadt auf und schlagen mögliche Stadtlichtverteilungen vor.

#### 4. Ansätze für ein HD-Stadtlicht

In diesem Kapitel werden Ansätze für ein HD-Stadtlicht vorgestellt, die die neuen Möglichkeiten der HD-Lichttechnologie nutzen und dadurch Verbesserungen bei den Themen Ausleuchtung und Blending erreichen.

##### HD-Stadtlicht bei vorausfahrendem Verkehr

Die konventionelle Stadtlichtverteilung verringert die Ausleuchtung in der Ferne durch eine symmetrische Lichtverteilung, indem der 15°-Anstieg (Zwickel) deaktiviert wird. Trotzdem tritt in bestimmten Situationen innerhalb einer Stadt Blending auf. Trifft das Licht z.B. auf ein Fahrzeugheck, das sich nur wenige Meter vor unserem eigenen Fahrzeug befindet, erzeugt das Scheinwerferlicht durch Reflexion auf dem Fahrzeugheck eine Eigenblendung des Fahrers. Diese Situation findet man in einer Stadt häufig, z.B. stehende Fahrzeuge an einer Ampel (Abbildung 3a) oder beim Fahren in einer Kolonne (Abbildung 4a). Durch die Eigenblendung kann auch das Adaptationsniveau des Auges vom Fahrer beeinflusst werden, was zu einer Verschlechterung der Erkennbarkeit von unbeleuchteten Objekten, wie z.B. Fußgängern, führen kann. Eine Möglichkeit diese Eigenblendung zu reduzieren ist die Anpassung der Stadtlichtverteilung an den vorausliegenden Verkehr. Hierbei können Fahrzeuge, die sich unmittelbar vor dem Fahrzeug befinden aus der Lichtverteilung ausgeschnitten (Abbildung 3b und 4b) oder reduziert angeleuchtet werden. In den Standzeiten der Fahrzeuge an Ampelanlagen kann auf diese Weise auch ein großer Teil der Energie eingespart werden. Zur Erhöhung der Sicherheit kann der Bereich um das Fahrzeug herum zielgerichtet heller ausgeleuchtet werden (Abbildung 3b und 4b).



Bild 3a: Konventionelles Stadtlicht



Bild 3b: HD-Stadtlicht mit aktiver Entblendung von vorausfahrenden Fahrzeugen an Ampeln und gleichzeitiger Optimierung der Beleuchtung im Seitenbereich links und rechts



Bild 4a: Konventionelles Stadtlicht



Bild 4b: HD-Stadtlicht mit aktiver Entblendung von vorausfahrenden Fahrzeugen im Kolonnenverkehr und gleichzeitiger Optimierung der Beleuchtung im Seitenbereich links und rechts

### **Reduzierung der Blendkeulen bei entgegenkommenden Fahrzeugen und im Kolonnenverkehr**

Auch bei der Benutzung von konventionellem Stadtlicht treten durch Reflexion an der Straßenoberfläche Blendkeulen für den Gegenverkehr auf. Diese sind natürlich bei nasser Fahrbahn besonders ausgeprägt, jedoch auch bei trockener Fahrbahn können sie den Gegenverkehr beeinträchtigen (Abbildung 5a und 6a). Aus Sicht des eigenen Fahrzeugs wird das Licht in diesem Bereich nicht benötigt, weil das entgegenkommende Fahrzeug diesen Bereich

ebenfalls ausleuchtet. Daher könnte man die Blendkeulen reduzieren, ohne einen Nachteil für den Fahrer zu erhalten.

In Abbildung 5b und 6b ist ein HD-Stadtlicht zur Blendungsreduktion vorgeschlagen, dass sich in Abhängigkeit des Gegenverkehrs an die jeweilige Situation dynamisch anpasst. Weiter könnten auch die Straßenbeschaffenheit (nass/trocken) und/oder die Umgebungshelligkeit mitberücksichtigt werden. So können die Bereiche der Lichtverteilung, die die Blendkeulen erzeugen, ausgeschnitten werden. Dadurch wird das Licht, das ins Auge des entgegenkommenden Fahrers fällt, deutlich reduziert. In den Abbildungen 5b und 6b sind diese Situation aus Sicht des entgegenkommenden Fahrers dargestellt. Im Vergleich zum konventionellen Stadtlicht, ist eine deutliche Reduktion der Blendkeulen zu erkennen. In der Kolonnensituation hat nur das zweite Fahrzeug das HD-Stadtlicht. Hier sieht man auch im direkten Vergleich die Vorteile.



Bild 5a: Konventionelles Stadtlicht



Bild 5b: HD-Stadtlicht mit aktiver Vermeidung von Blendkeulen für den entgegenkommenden Verkehr



Bild 6a: Konventionelles Stadtlicht



Bild 6b: HD-Stadtlicht mit aktiver Vermeidung von Blendkeulen für den entgegenkommenden Verkehr in einer Kolonnensituation

## Erkennbarkeit von Objekten am Straßenrand

In der Stadt werden die Straßen durch Straßenlaternen beleuchtet. Die Fahrbahn ist in diesen Situationen gut ausgeleuchtet. Jedoch werden die Fahrbahnräder (z.B. Bürgersteig) nicht mehr so gut von den Straßenlaternen erfasst. Sind Straßenlaternen nur auf einer Straßenseite installiert, trifft dies besonders auf die gegenüberliegende Straßenseite zu. Hinzu kommt noch, dass durch das Laub von Bäumen die Straßenbeleuchtung abgeschattet wird. Dadurch können Objekte, die sich am Straßenrand befinden vom Fahrer teilweise schlecht gesehen werden. Es bietet sich also an, die Seitenränder einer Straße stärker zu beleuchten. Für die Straßenmitte verhält es sich jedoch anders. Auf der Fahrbahn überlagern sich die Beleuchtung der Straßenlaternen mit der Beleuchtung des Scheinwerfers. Durch das Scheinwerferlicht wird der Negativkontrast eines Objektes, welches durch die Straßenbeleuchtung erzeugt wird, reduziert. Dies führt zu einer Reduktion der Erkennbarkeit des Objekts auf der Straße [5][6]. Daher bietet sich für das HD-Stadtlicht folgende Strategie an: Befindet sich das Fahrzeug auf einer beleuchteten Straße, so können die Ränder stärker ausgeleuchtet und gleichzeitig die Beleuchtung der eigenen Fahrbahn reduziert werden. Fährt das Fahrzeug hingegen auf einer unbeleuchteten Straße, so muss selbstverständlich auch die eigene Fahrbahn entsprechend ausgeleuchtet werden.

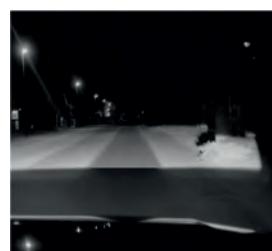
In Abbildung 7a ist eine konventionelle Stadtlichtverteilung dargestellt. In Abbildung 7b werden die Straßenränder stärker ausgeleuchtet und die eigene Fahrbahn wird durch die Scheinwerfer nicht beleuchtet. In der Abbildung 7c wird die eigene Fahrbahn im Vergleich zur seitlichen Beleuchtung reduziert angeleuchtet.



7a: Konventionelles Stadtlicht



7b: HD-Stadtlicht mit seitlich erhöhter Ausleuchtung,  
eigene Fahrspur ohne Ausleuchtung



7c: HD-Stadtlicht mit seitlich erhöhter Ausleuchtung,  
eigene Fahrspur mit reduzierter Ausleuchtung

Die Breite der Abdunklung der eigenen Fahrbahn in Abbildung 7b/7c entspricht der Breite des eigenen Fahrzeugs. Dadurch kann zusätzlich auch eine Führungsfunktion für den Fahrer erreicht werden. Die harten Gradienten in der Lichtverteilung müssen selbstverständlich nicht so stark ausgeprägt sein. In der Abbildung 7 ist dies nur zur Verdeutlichung der Funktion umgesetzt.

### **Spurführung / Orientierungsfunktion**

In Stadtsituation, in denen eine enge Fahrspur vorliegt (Abbildung 8a), kann die Unterstützung des Fahrers aus dem letzten Kapitel zusätzlich verstärkt werden. Die Visualisierung der Fahrzeugbreite kann noch durch helle vertikale Streifen verstärkt werden, so dass der Fahrer die eigene Fahrzeugbreite deutlicher wahrnehmen kann und somit diese in Engsituation abschätzen kann (Abbildung 8b). Diese Lichtprojektion auf der Straße kann auch von Fußgängern wahrgenommen werden (Abbildung 8c). Dadurch werden Fußgänger zusätzlich auf das kommende Fahrzeug aufmerksam gemacht. Auch in einer beleuchteten Situation ist auf diese Weise eine Kommunikation vom Fahrzeug zu den Fußgängern möglich.



8a: Konventionelles Stadtlicht



8b: HD-Stadtlicht mit Führungslinien in einer engen Straße



8c: Sicht auf Führungslinien vom Bürgersteig

In Abbildung 8 wird auf der einen Seite der Fahrer durch die Führungsunterstützung geleitet und auf der anderen Seite werden auch Fußgänger, seitlich am Straßenrand, auf das Fahrzeug aufmerksam gemacht.

### **Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern**

Wie im letzten Kapitel zu sehen, sind die Führungsstreifen auch gut vom Rand der Fahrbahn zu erkennen. Diese Eigenschaft kann zusätzlich als Kommunikation zu vorausfahrenden Fahrzeugen genutzt werden. Blickt der Fahrer, des vorausfahrenden Fahrzeugs, auf die benachbarte Spur, kann dieser schon frühzeitig wahrnehmen, dass sich ein Fahrzeug von hinten

annähert (Abbildung 9b). Zusätzlich ist in dieser Abbildung zu erkennen, dass im Vergleich zum konventionellen Stadtlicht die Blendung des Fahrers über die Außenspiegel reduziert ist.



9a: Konventionelles Stadtlicht



9b: HD-Stadtlicht mit Führungslinien als Kommunikationslicht für das vorausfahrende Fahrzeug

## 5. Anforderungen für zukünftige Technologien

Im letzten Kapitel haben wir mögliche neue Konzepte für eine HD-Stadtlichtfunktion vorgestellt. Ein HD-Stadtlicht benötigt neben der Lichttechnologie auch sensorische Information, um die Funktionen zu realisieren.

In den vorgestellten Beispielen lagen immer beleuchtete Situationen in der Stadt vor. Trotzdem waren die Lichtfunktionen deutlich zu erkennen. Daraus kann geschlossen werden, dass die benötigte Beleuchtungsstärke auf der Straße ausreichend hoch war. Dies bedeutet für das HD-Lichtmodul, dass der Lichtstrom pro Raumwinkel ausreichend ist. Auch die räumliche Auflösung der HD-Lichtquelle war stets ausreichend. Ein Optimierungspotential könnte im Ausleuchtungsbereich des HD-Lichtmoduls liegen. Abschließend kann die aktuell verfügbare Lichtquelle für ein HD-Stadtlicht als gut geeignet bewertet werden.

Als Sensorinformation werden folgende benötigt:

Position vorhandener Verkehrsteilnehmer in der Stadt, Position erkannter Straßenlaternen, und der vorausliegender Straßenverlauf. Alle diese Informationen werden bereits heute durch Sensoren ermittelt. Jedoch werden nicht alle Informationen dem Fahrzeug zu Verfügung gestellt. Weiter muss noch geklärt werden, ob die Qualität der Signale ausreichend ist, um eine robuste HD-Stadtlichtfunktion umzusetzen.

Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass sowohl die Lichttechnik als auch die Sensorik schon sehr gut für ein HD-Stadtlicht vorbereitet sind.

## 6. Zusammenfassung

In diesem Artikel haben wir neue Erweiterungen für die Scheinwerferbeleuchtung in einer Stadt vorgestellt. Ziel der Weiterentwicklung des Stadlichts ist die Erhöhung der Sicherheit für Verkehrsteilnehmer in der Stadt. Die Weiterentwicklungen umfassen auf der einen Seite sowohl Verbesserungen in der Ausleuchtung für den Fahrer als auch eine Reduktion der Blendung des Fahrers und ebenfalls anderer Verkehrsteilnehmer. Die gezielte Ausleuchtung kann zudem zur Einsparung von Energie und weiterer Führungs- und Kommunikationsfunktionen eingesetzt werden. Die Funktionsansätze sind exemplarisch erprobt worden, um das Potential aufzuzeigen. Alle hier vorgestellten Funktionen zeigen in der Wirkungswiese vielversprechendes Potential auf. Die Funktionen sollen eine Ausgangsbasis für zukünftige Diskussionen bezüglich der Scheinwerferbeleuchtung in einer Stadt sein und noch keine fertige Serienumsetzung darstellen. Die technischen Voraussetzungen für die Umsetzung des HD-Stadlichts sind sowohl aus lichttechnischer Sicht und auch aus Sensor-Sicht zum größten Teil gegeben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für eine Verbesserung der Beleuchtung in der Stadt, die HD-Technologie über ein großes Potential verfügt. Durch dieses intelligente HD-Stadlicht kann weiter die Blendsituation in der Stadt wesentlich reduziert und gleichzeitig Energie eingespart werden.

- [1] M. Kleinkes, W. Pohlmann, C. Wilks, "Boost Safety & Styling – New HD-LED Systems for front and rear", 13th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL 2019), Darmstadt, September 2019
- [2] Hiroaki Kuroda, Kinya Ichikawa, NICHIA, "Future of digital lighting technologies starts with Nichia", 21st DVN Workshop, Tokyo, December 2020
- [3] Stefan Grötsch, OSRAM Opto-Semiconductors, "Mockup and Demonstrator of a High Resolution Active Pixel-LED headlamp with 100k Pixel Performance", SIA VISION Digital 2021, Paris, March 2021
- [4] Mark Urlaub, LUMILEDS , "Micro-LED and Matrix-LED, a hybrid light source architecture for high resolution headlighting ", SIA VISION Digital 2021, Paris, 2021
- [5] S. Vogel, D. Peters, M. Niedling, S. Völker, "Shaping new light distributions for different road lighting scenarios", 14th International Symposium on Automotive Lighting ISAL (2022)
- [6] S. Vogel, S. Fiedelak, M. Niedling, S. Völker, "Influence of automotive headlamp systems on the visibility of targets under different road lighting conditions", Lighting Research & Technology (in press)

# Anforderungen an eine Scheinwerferkalibrierung für hochauflösende Systeme

M.Sc. Ridon Arifi, Dr. Ing. Melanie Helmer,  
Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann,  
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

## Kurzfassung

Hochauflösende Scheinwerfersysteme ermöglichen den Einsatz neuartiger Lichtfunktionen. Dazu zählen neben dem bereits bekannten blendfreien Fernlicht beispielsweise Projektionen auf die Fahrbahn vor dem Fahrzeug, welche den Fahrer während der Fahrt assistieren oder solche, die eine Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern ermöglichen können.

Diese Systeme können jedoch nur dann zuverlässig funktionieren, wenn die Lichtfunktionen an der korrekten Position und aus Fahrersicht verzerrungsfrei und eindeutig auf die Fahrbahn projiziert werden. Insbesondere dann, wenn beide Scheinwerfermodule zur Projektion der Lichtfunktion genutzt werden, ist es notwendig diese ausreichend präzise geometrisch zu kalibrieren.

Es existieren bereits verschiedene Methoden für die Kalibrierung von hochauflösenden Projektionsmodulen, welche vor allem in der Medientechnik Verwendung finden. Im Rahmen des folgenden Beitrags soll dargestellt werden, wie diese Methodiken auf die Projektionsmodule im Fahrzeug übertragen werden können und welche Herausforderungen und Anforderungen daraus resultieren.

## 1. Motivation

Scheinwerfersysteme erfordern eine genaue Einstellung, damit eine maximale Straßenausleuchtung bei minimaler Blendung anderer Verkehrsteilnehmer realisiert werden kann und somit optimale Sichtverhältnisse für die Verkehrsteilnehmer resultieren. Die Notwendigkeit einer Scheinwerfeinstellung bestätigt sich unter anderem durch die aktuellste Auswertungen des jährlich durchgeföhrten Licht-Tests. Diese zeigt auf, dass jeder neunte PKW Mängel in der Scheinwerfeinstellung vorweist und somit die eigene Sicht sowie die Sicht anderer Verkehrsteilnehmer beeinträchtigt [1].

Durch die stetig fortschreitende Scheinwerferentwicklung entstanden segmentierte Scheinwerfer sowie hochauflöste Scheinwerfermodule, wobei die Gesamtlichtverteilung durch die

Überlagerung aller Segmente bzw. Lichtpixel generiert wird. Diese ermöglichen die Umsetzung assistierender Lichtfunktionen, wie das blendfreie Fernlicht. Damit die Lichtfunktionen fehlerfrei agieren und bestmögliche Sichtverhältnisse ermöglichen, ist eine präzise geometrische Kalibrierung erforderlich. Vorausfahrende und entgegenkommende Verkehrsteilnehmer werden durch die integrierte Fahrerassistenzkamera erfasst und entsprechend entblendet. Die korrekte Zuordnung des Bereichs, welcher von den Lichtsegmenten beleuchtet und von der Kamera erfasst wird, erfolgt durch die Kalibrierung beider Komponenten zu einem gemeinsamen Bezugssystem.

Grundsätzlich erfolgt Einstellung und Kalibrierung am Ende der Produktionslinie und anschließend bei Bedarf in Werkstätten und beim Kundendienst. Die Einstellung und Kalibrierung erfolgt dabei meist durch Mitarbeiter mit Hilfe eines Scheinwerfereinstellgeräts (SEG), wobei inter- sowie intrapersonelle Toleranzen mit einfließen, d.h. Einstellungsgenauigkeiten durch individuelle Mitarbeiter. Zudem existieren Einflüsse, welche die Soll-Orientierung der Scheinwerfer über dessen Lebensdauer verändern. Folglich ist eine Rekalibrierung der Scheinwerfer notwendig, was sich in einem zeit- und kostenintensiven Verfahren widerspiegelt.

Die Verwendung der integrierten Fahrerassistenzkamera ermöglicht die Umsetzung einer automatischen Kalibrierung. Durch das daraus resultierende Stereosystem, bestehend aus Scheinwerfer und Kamera, können z.B. personelle Toleranzen reduziert bzw. idealerweise eliminiert werden. Durch die Verwendung der integrierten Hardware ist der Kalibervorgang schnell umsetzbar und die Verwendung eines SEG nicht mehr erforderlich.

Im Anschluss ermöglicht das kalibrierte System eine optimierte Ausführung der assistenzbasierten Lichtfunktionen. Dazu zählen die korrekte Entblendung anderer Verkehrsteilnehmer oder die verzerrungsfreie Darstellung der Projektionen.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Scheinwerfereinstellung

Am Ende der Produktionslinie jedes Fahrzeugs erfolgt die Einstellung der Scheinwerfer gemäß der gesetzlichen Vorgaben [2, 3]. Dabei wird die Hell-Dunkel-Grenze (HDG), welche aus einem horizontalen und einem ansteigenden Teil besteht, auf einen Messschirm in 10m Entfernung abgebildet. Das Abblendlicht wird mit Hilfe von Einstellschrauben so ausgerichtet, dass der horizontale Teil der HDG um 0.57° gegenüber der Fahrzeuglängsachse nach unten geneigt ist. Während der Einstellung sind vorgeschrriebene Randbedingungen, welche [2] entnommen werden können, zu berücksichtigen.

Für die horizontale Ausrichtung des Scheinwerfers wird der Knickpunkt der HDG verwendet. Eine maximale Toleranz von 0,5° in der Horizontalen ist einzuhalten [3].

Voraussetzung für eine korrekte Einstellung ist die präzise Ausrichtung des Fahrzeugs vor dem Messschirm. Zudem unterliegt der Boden bzw. die Prüffläche auf dem sich das Fahrzeug befindet Toleranzen, welche bei der Einstellung von Scheinwerfern berücksichtigt werden müssen.

Eine weit verbreitete Methode für die Einstellung von Scheinwerfern ist die Einstellung mittels eines SEG. Das SEG bildet die 10m entfernte Projektionsfläche über eine Fresnellinse auf einer 50cm Strecke im Gerät nach. Somit entfallen der hohe Platzbedarf und die zuvor erforderliche große Projektionsfläche.

## 2.2 Kalibrierung von segmentierten und hochauflösenden Scheinwerfern

Die Kalibrierung von Scheinwerfern beschreibt die Ermittlung der Position und Orientierung des zu kalibrierenden Moduls zu einem festgelegten Bezugssystem, beispielsweise dem Kamerakoordinatensystem oder dem Fahrzeugkoordinatensystem. Das segmentierte (< 100 Pixel) bzw. hochauflösende Modul (bis zu 1,3 Mio. Pixel) wird unter anderem für die Realisierung eines blendfreien Fernlichts verwendet. Vorausfahrende oder entgegenkommende Verkehrsteilnehmer werden durch die Kamera erfasst und der blendende Bereich entsprechend deaktiviert. Die bekannte Position und Orientierung des Scheinwerfers ermöglicht es gezielt Objekte, welche von der Kamera als detektiert werden, zu demaskieren.

Die Kalibrierung der genannten Scheinwerfermodule erfolgt grundsätzlich mittels eines SEG. Dazu werden die Referenzsegmente in den Scheinwerfern aktiviert und das SEG orthogonal auf die optische Achse zentriert. Anschließend ermittelt das Gerät kamerabasiert die Abweichung des Moduls von der bekannten Soll-Position und hinterlegt die Daten im Steuergerät.

## 3. Stand der Technik

### 3.1 Kalibrieransätze für Scheinwerfer im Fahrzeug

Grundsätzlich erfolgt die Kalibrierung der Scheinwerfer mittels SEG. Da die verbaute Sensorik im Fahrzeug alle notwendigen Komponenten für eine automatische Scheinwerferkalibrierung liefert, ist eine Umsetzung dergleichen realisierbar.

Die Vorteile einer automatisierten Scheinwerferkalibrierung, wie z.B. ausbleibende Toleranzen bei der Positionierung des SEG durch das Personal oder die Systemeffizienz durch Verwendung integrierter Hardware und somit der Verzicht auf zusätzliche Hardware (SEG), überwiegen und motivieren die Umsetzung der Gleichen.

Söhner beschreibt in seiner Dissertation [4] die Umsetzung einer automatischen Scheinwerferkalibrierung, welche auf der aktiver Triangulation basiert. Die genaue Methodik der aktiven Triangulation kann [4–6] entnommen werden. Für die Triangulation verwendet Söhner das Stereosystems, bestehend aus Scheinwerfer und Fahrerassistenzkamera. Die Hell-Dunkel-Grenze bildet dabei das charakteristische Merkmal, welches durch die Kamera erfasst und zur Weiterverarbeitung verwendet wird. Durch die mechanische Verlagerung der HDG werden weitere Punkte, welche zur Lösung des mathematischen Problems erforderlich sind, generiert. Die Lösung liefert die Fehlstellung der Scheinwerfer und somit die Orientierung der Scheinwerfer im Bezug zur Fahrerassistenzkamera. Söhner erreicht mit seinem Kalibrierverfahren eine vertikale Genauigkeit von  $0,1^\circ$ , welche der geforderten Einstellgenauigkeit für das Abblendlicht nach gesetzlichen Vorgaben genügt.

Aufbauend auf Söhners Ansatz erweitert Schneider in seiner Arbeit [5] das System, wobei das Stereosystem für eine Tiefenwahrnehmung Verwendung findet. Die erforderliche und vorausgehende Kalibrierung wird hierbei für ein 84-pixeliges System umgesetzt. Dabei findet ebenfalls das Prinzip der aktiven Triangulation Einsatz.

Für hochauflösende Systeme ist das Verfahren noch nicht angewandt bzw. untersucht. Zudem stehen noch Untersuchungen für die Anwendung unter Realbedingungen mit Berücksichtigung von Störgrößen im Fahrbetrieb aus.

### 3.2 Bekannte Ansätze aus anderen Fachgebieten

Die Kalibrierung von Stereosystemen, bestehend aus Kamera und Projektor, findet bereits in der Medientechnik weite Verbreitung. Folglich existieren entsprechende Kalibrieransätze. Meist wird hier im Gegensatz zum Fahrzeug ein statisch installiertes System ohne dynamische Einflüsse betrachtet. Wie im Fahrzeug, handelt es sich hierbei um ein Stereosystem, bestehend aus einem Projektor und einer Kamera. Die Kalibrierung des Stereosystems erfolgt durch bekannte Algorithmen, wobei der Projektor als inverse Kamera modelliert wird, d.h. nicht als erfassende, sondern bildgebende Einheit. Für die Kalibrierung werden die extrinsischen sowie die intrinsischen Parameter der Kamera und des Projektors bestimmt. Die extrinsischen Parameter beschreiben hierbei die Lage und Orientierung des Projektionsmoduls relativ zur Kamera. Die intrinsischen Parameter beschreiben die internen Eigenschaften der beiden Module, wie beispielsweise die Verzeichnung oder die chromatische Aberration.

Kubitz [7] stellt in seiner Veröffentlichung die existenten Kalibrieransätze im Fahrzeug dar. Zudem zeigt er erstmals das Potential hochauflösender Projektionsmodule in Scheinwerfern in Verbindung mit einer Scheinwerferkalibrierung und Tiefenbestimmung auf. Für die

Kalibrierung werden hochauflöste Prüfmuster projiziert, welche aus der 3D-Messtechnik bekannt sind. Periodische Streifenmuster stellen exemplarisch ein solches Muster dar.

Für die Kalibrierung eines Stereosystems ist die Lösung des sogenannten Korrespondenzproblems erforderlich. Dabei müssen Punktkorrespondenzen, d.h. Bildpunkte in beiden Komponenten des Stereosystems, eindeutig identifiziert und zugeordnet werden. Die korrekte Zuordnung der Korrespondenzen ist notwendig für die Lösung des mathematischen Gleichungssystems, welche die Kalibrierung beschreibt.

Weite Verbreitung findet hierzu die Anwendung von strukturiertem Licht (SL). Strukturiertes Licht, welches beispielsweise eine Streifenprojektion oder erkennbare Symbolprojektionen durch das zu kalibrierende System sein können, liefert eindeutige Korrespondenzen.

Salvi [8] beschreibt hierbei verschiedene Strategien bei der Verwendung von SL. Für die eindeutige Identifizierung der Punktkorrespondenzen kann die Projektion zeitlich binär- oder robuster Gray-kodiert werden. Dazu wird beispielsweise nacheinander ein Raster aus Punkten auf die Projektionsfläche projiziert. Die Kodierung entsteht durch die nacheinander wechselnden Zustände der projizierten Punkte (vgl. Abbildung 1 [9]). Das Verfahren eignet sich zwar hervorragend für den statischen Fall, d.h. in einem unveränderlichen Umfeld, da eine eindeutige Zuordnung möglich ist, ist aber durch die temporäre Abhängigkeit in Form einer zeitlichen Abfolge von Projektionen nicht für dynamische Szenen geeignet.

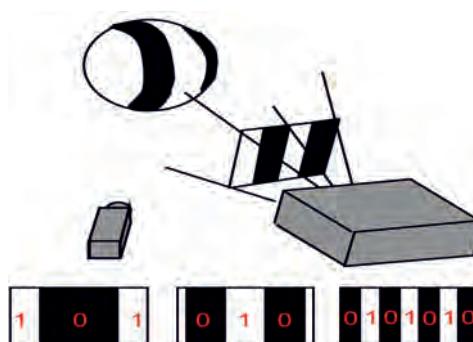


Bild 1: Zeitliche Kodierung der Projektion

Für dynamische Szenarien existieren sogenannte Single-Shot-Methoden, wobei lediglich eine einzige Aufnahme für die eindeutige Korrespondenzschätzung notwendig ist. Bei dieser Methode wird eine Menge eindeutig identifizierbarer Symbole, wie beispielsweise in Abbildung 2 dargestellt, auf die Projektionsfläche projiziert, sodass die Eindeutigkeit durch die optische Ausprägung der einzelnen Symbole gewährleistet ist. Als beispielhaftes Vorgehen sei hier auf die Veröffentlichung von Lei et. al. [10] verwiesen. Darin wird ein Raster von 62 x

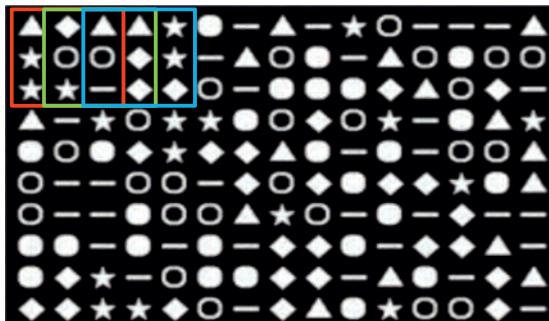


Bild 2: 3x3 M-Array mit sechs eindeutigen Symbolen

32 Symbolen angenommen. Somit wären 1984 unterschiedliche Symbole notwendig. Da die Generierung einer solchen Menge einzigartiger Symbole, welche durch die Kamera erfasst und klassifiziert werden muss, sehr komplex und nahezu unmöglich scheint, bietet sich die Verwendung von sogenannten M-Arrays an. In Abbildung 2 ist die Gesamtprojektion aus lediglich 6 verschiedenen Symbolen umgesetzt. Um die Mehrdeutigkeit der Symbole über die gesamte Projektionsfläche zu vermeiden, werden M-Arrays einer festgelegten Größe verwendet. Innerhalb jedes 3x3 Arrays befindet sich eine eindeutige Anordnung der sechs verwendeten Symbole. Somit kann mit einer geringen Anzahl an Symbolen eine eindeutige Zuordnung umgesetzt werden. Mit der Lösung des Korrespondenzproblems kann eine Kalibrierung des Stereosystems erfolgen. Da das hier vorgestellte System prinzipiell dem gleichen Aufbau, bestehend aus Kamera und Scheinwerfer, entspricht, ist eine Übertragung für die Anwendung im Fahrzeug denkbar.

#### 4. Anforderungen an eine Scheinwerferkalibrierung

Für den Einsatz der automatischen Kalibrierung im Fahrzeug werden Anforderungen definiert, denen das Gesamtsystem genügen muss. Basierend darauf, können die bekannten Kalibriermethoden aus der Medientechnik auf das Fahrzeug übertragen werden. Im Folgenden werden Anforderungen an eine Scheinwerferkalibrierung dargestellt:

##### Genauigkeit

Die erforderliche Kalibriergenauigkeit ist funktional begründet. Die flächige Ausleuchtung aus einem Scheinwerfermodul ist toleranter gegenüber einer Fehlstellung, als eine feinstrukturierte, überlappende Projektion aus zwei Modulen. Die Ausleuchtung der Spur – eine großflächige und gleichmäßige Projektion –, welche keine komplexe bzw. präzise Symbolik beinhaltet bedarf einer anderen Kalibriergenauigkeit also die Entblendung von Verkehrsteilnehmern.

Zu beachten ist jedoch, dass sich die Gesamtprojektion des Spurlights aus beiden Scheinwerfern zusammensetzt. Somit müssen beide Scheinwerfer hinreichend genau kalibriert werden, sodass die Abweichung zwischen den Scheinwerfern eine akzeptable Darstellung nicht beeinträchtigt. Die Festlegung der Akzeptanzschwelle für die optische Auslegung der Funktion kann durch Probandenstudien erfolgen.

Bei der Entblendung von Verkehrsteilnehmern ist das Ziel die Ausleuchtung und somit die Sichtverhältnisse des Fahrzeugführers maximal zu gestalten, sodass bei höchster Kalibriergenauigkeit für eine minimale Blendung von Verkehrsteilnehmern möglichst wenige Lichtpixel deaktiviert werden. Eine geringe Kalibriergenauigkeit würde dazu führen, den Toleranzbereich um die Verkehrsteilnehmer zu vergrößern und resultiert somit in einer Einbuße hinsichtlich der Sichtverhältnisse (vgl. Abbildung 3 [4]).

Die Umsetzung komplexer Coming Home/Leaving Home Animationen bedarf je nach Ausprägung einer hohen Kalibriergenauigkeit. Wird beispielsweise die Gesamtprojektion durch beide Projektionsmodule generiert, könnte eine geringe Kalibriergenauigkeit zu einer mangelnden Darstellung in Form von Überlappung oder Verzerrung resultieren. Auch hier muss die Genauigkeit anhand von Probandenstudien festgelegt werden.

Insgesamt wird deutlich, dass für jede Lichtfunktion je nach Komplexität individuelle Anforderungen zu definieren sind.

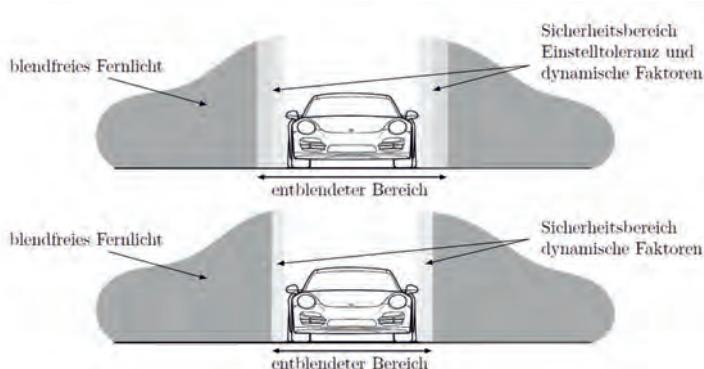


Bild 3: Sicherheitsbereich blendfreier Fernlichtsysteme

### Effizienz:

Die automatische Scheinwerferkalibrierung gilt als innovative Methode einer Scheinwerferinbetriebnahme. Folglich soll das Verfahren gewisse Ansprüche erfüllen, um einen Mehrwert gegenüber herkömmlichen Kalibrierverfahren zu gewähren. Durch die Verwendung der im Fahrzeug bereits integrierten Hardware (Fahrerassistenzkamera und Projektionsmodul), soll auf weitere externe Hardware verzichtet werden. Die Verwendung sowie Ausrichtung eines SEG soll vermieden werden, wodurch die Ausführung durch geschultes Personal entfällt. Die automatischen Kalibrierung soll beispielsweise am Ende der Produktionslinie Anwendung finden, wodurch die Produktionszeit optimiert wird. Das gesamte Kalibrierverfahren soll hierbei eine Dauer von 30s nicht überschreiten. Die Gesamtdauer des Kalibrierprozesse kann von der Fahrzeugklasse abhängen. Je höher das Produktionsvolumen des Fahrzeugs, desto weniger Zeit soll das Kalibrierverfahren in Anspruch nehmen. Insgesamt soll ein kosten- und zeiteffizienter Kalibrierablauf resultieren.

### Optische Ausprägung:

Wie bereits beschrieben, erfolgt der Kalibriervorgang mittels projizierter charakteristischer Merkmale, welche durch die Kamera erfasst und weiterverarbeitet werden. Die optische Ausprägung spielt für die Erkennung eine entscheidende Rolle. Folglich sollen Symbole verwendet werden, welche eindeutig durch die Kamera identifiziert werden können. Für die Kalibrierung im Stillstand außerhalb des öffentlich Verkehrs, wo nahezu beliebige Projektionen möglich und auch gesetzlich nicht geregelt sind, ist die Wahl der Symbolik kaum eingeschränkt. Der Kalibrierprozess kann somit als solcher wahrgenommen werden.

Für die Anwendung im freien Verkehr, beispielsweise im Stand vor einer Ampel, sind die Projektionen gesetzlich eingeschränkt. In diesem Fall soll die Kalibrierung als nicht wahrnehmbares Verfahren realisiert werden. Als Beispiel sei hier die Integration des Kalibrierprozesses in die Leaving Home Animation angeführt. Weiter könnten die charakteristischen Merkmale so in die Abblendlichtverteilung integriert werden, sodass sie vom Fahrzeugführer sowie anderen Verkehrsteilnehmern nicht wahrgenommen werden. Wichtig ist jedoch, dass die Kalibiermerkmale dennoch von der Kamera erfasst und durch den Algorithmus weiterverarbeitet werden können.

### Einsatzbereich

Das Kalibrierverfahren soll Anwendung am Ende der Produktionslinie zur Initialkalibrierung, beim Kundendienst sowie im Fahrbetrieb beim Kunden finden. Die Kalibrierung soll möglichst flexibel in unterschiedlichen Szenarien ausführbar sein. Dazu zählen beispielsweise die

Kalibrierung vor einer Wand, vor einer Garage, in einem Parkhaus, im Stillstand vor einer Ampel oder ähnlichen Szenarien. Als Kalibrierdistanz wird als Richtwert, die in der Literatur [4] genannte Entfernung von 10m festgelegt. Zu beachten ist, dass der Kalibervorgang unter realen Bedingungen mit verschiedenen Störeinflüssen einsetzbar ist.

#### Robustheit

Für die Kalibrierung bzw. den Kalibrieralgorithmus ist eine robuste Erkennung der projizierten Merkmale erforderlich. Zu einer robusten Erkennung zählen zum einen die Erkennung unter verschiedenen Umgebungsbedingungen, wie Witterungseinflüsse, Streulicht oder unebenen Projektionsflächen, aber auch die reproduzierbare Erkennung der Merkmale bei wiederholtem Kalibervorgang und gleichbleibenden Bedingungen. Im Gegensatz zur Verwendung in der Produktionslinie, wo eine nahezu immer identische Umgebung vorherrscht, können im Fahrbetrieb Störeinflüsse, wie unterschiedliche Beleuchtungen bzw. Streulicht, veränderte Reflexionseigenschaften durch das Wetter, unebene Projektionsflächen oder die Beschaffenheit der Projektionsfläche zu einer Verringerung der Kalibrierqualität führen. Ziel ist eine funktionsfähige Kalibrierung in den genannten Szenarien unter Berücksichtigung der Störeinflüsse.

### 5. Herausforderungen und Grenzen

Durch die Vorgabe diverser Anforderungen an die automatische Scheinwerferkalibrierung für hochauflösende Systeme ergeben sich Herausforderungen, welche die Umsetzung des Gesamtsystems beeinflussen. Einige Einflussfaktoren lassen sich hierbei bereits aus den Anforderungen herauslesen.

Zwar scheint beispielsweise die Methode der Streifenprojektion für das Fahrzeug im statischen Fall unter Laborbedingungen übertragbar zu sein (vgl. [7]), jedoch existieren für die Umsetzbarkeit im realen Fahrbetrieb dynamische Einflüsse, die zu berücksichtigen sind. Im statischen Fall sind die Positionen und Orientierungen von Scheinwerfer, Kamera und Fahrzeug zwar unverändert, jedoch nicht im dynamischen Fall. Die Lage des Fahrzeugs relativ zur Straße ist veränderlich und die Projektionsfläche vor dem Fahrzeug meist unbekannt. Störgrößen, welche die Orientierung des Scheinwerfers beeinflussen, sind unter anderem Temperatureinflüsse, mechanische Einflüsse oder die Veränderung der Lage des Gesamtfahrzeugs durch verschiedene Faktoren, wie Luftdruck oder Profiltiefe [11].

Weitere Einflüsse, welche die Reflexionseigenschaften der Projektionsfläche beeinträchtigen oder den Kontrast mindern, können die Merkmalserkennung erschweren und dadurch die Robustheit senken.

Die Erkennung der char. Merkmale wirkt sich auf die Laufzeit und das Resultat des Algorithmus aus. Da bei der Verwendung hochauflösender Systeme mehrere Kalibriermerkmale gleichzeitig projiziert und ausgewertet werden können, resultiert im Vergleich zu dem System nach Söhner ein zeitlich optimierter Kalibriervorgang. Jedoch ist auch hier zu beachten, dass eine Fehlerkennung der Merkmale bzw. keine Erkennung der Merkmale durch Umgebungs-einflüsse die Dauer des Kalibrierprozesses verlängert, sodass eine geforderte Kalibrierdauer im schlechtesten Fall nicht erreicht werden kann.

Zusätzlich ist die Genauigkeit und Umsetzbarkeit der automatischen Kalibrierung in der Hin-sicht eingeschränkt, da die bereits im Fahrzeug verbaute Hardware verwendet wird. Für den Algorithmus spielt nicht nur die erfassende Einheit mit ihrer Dynamik und Auflösung eine Rolle, sondern auch die Eigenschaften des Projektionsmoduls. Gerade für dynamische Szenen mit Störeinflüssen muss für eine gute Erkennbarkeit der Merkmale ein hoher Kontrast und je nach optischer Ausprägung eine hohe Auflösung garantiert werden.

## 6. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt, mit welchen Möglichkeiten Scheinwerfersysteme eingestellt und kalibriert werden können. Neben der Kalibrierung von segmentierten Scheinwerfern, liegt der Fokus vor allem auf hochauflöste Projektionssysteme. Dass die Kalibrierung mittels SEG alternativ durch eine automatische Kalibrierung mittels fahrzeugintegrierter Hardware umge-setzt werden kann, zeigen die Kalibrieransätze von Söhner [4] und Schneider [5], welche eine Genauigkeit von 0,1° liefern. Die Ansätze sind jedoch lediglich für grobaufgelöste Systeme untersucht und umgesetzt.

Mit dem Einzug hochauflösender Projektionsmodule in die Scheinwerfer ist eine neue Betrach-tung der Anforderungen erforderlich. Dazu zählen unter anderem die Kalibriergenauigkeit, die Dauer, der Einsatzbereich sowie die Robustheit des Gesamtsystems. Weiter müssen für die Anwendung des Kalibrierverfahrens Störgrößen aus realen Verkehrssituationen berücksichtigt werden.

Es existieren bereits Ansätze zur Kalibrierung eines Stereosystems, welche aus anderen Fachgebieten bekannt sind. Da es sich im Fahrzeug um den gleichen Aufbau, bestehend aus Kamera und Projektor handelt, ist eine Übertragung der Methoden in das Fahrzeug denkbar. Das zu lösende Korrespondenzproblem kann mit Hilfe zeitlich kodierter Projektionen oder ein-deutiger Symbolprojektionen erfolgen. Jedoch sind die dynamischen Einflüsse, welche ver-schiedenen Szenarien im realen Verkehr existieren bei der Umsetzung der Kalibrierung zu untersuchen und zu berücksichtigen.

## 7. Ausblick

Als erster Schritt des Kalibrierprozesses sind die exakten Anforderungen aus Sicht der Lichtfunktionen zu definieren. Hierzu müssen ggf. Probandenstudien durchgeführt werden. Basierend auf den Anforderungen, kann eine geometrische Kalibrierung der Scheinwerfer durchgeführt werden. Da die Kalibrierung zusätzlich im Fahrbetrieb erfolgen soll, müssen Störparameter und Einflussfaktoren aus realen Szenarien untersucht und berücksichtigt werden.

Das kalibrierte Stereosystem ermöglicht anschließend die Umsetzung einer Tiefenwahrnehmung mittels aktiver Triangulation. Die optische Ausprägung der Projektionen spielt dabei eine entscheidende Rolle, schließlich ist die Projektion im Fahrbetrieb durch die gesetzlichen Regelungen eingeschränkt. Entsprechend bedarf es Untersuchungen, welche eine Darstellung der Projektionen gesetzeskonform ermöglichen.

Das kalibrierte Stereosystem bietet neue Möglichkeiten hinsichtlich der Funktionsentwicklung. Bereits Schneider zeigt in seiner Dissertation [5] das Potential des Stereosystems als tiefenwahrnehmende Einheit. Das grobaufgelöste System erlaubt jedoch nur eine Anwendung im Nahbereich. Unter Berücksichtigung aktueller hochaufgelöster Systeme könnte hier auch eine Anwendung auf Distanzen über 18m in Frage kommen.

Mit Hilfe der Tiefeninformationen können bestehende Funktionen optimiert oder neuartige Funktionen wie eine prädiktive Leuchtweiteregelung implementiert werden. Dabei könnte die Topographie von dem Stereosystem erfasst und für die Anpassung der Leuchtweite verwendet werden.

## Literatur

- [1] Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe, *Licht-Test 2021: Weniger Mängel als im Vorjahr*. [Online]. Available: <https://www.kfzgewerbe.de/licht-test-2021-weniger-maengel-als-im-vorjahr>
- [2] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, “Regelung Nr. 48 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE): Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen,” in Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, Ed.
- [3] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, “Regelung Nr. 112 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE): Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen und/oder LED-Modulen ausgerüstet sind.,” in Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, Ed.

- [4] S. Söhner, "Entwicklung einer automatisierten Scheinwerferereinstellung mittels aktiver Triangulation," 2015.
- [5] C. Schneider, Entwicklung eines tiefenwahrnehmenden Scheinwerfer-Kamera-Systems, 1st ed. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2019.
- [6] M.Sc. Simon Mates, M.Sc. Jonas Stoll, Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, "Fusion zwischen Sensor- und Scheinwerfersystem - Abstandsmessung durch aktive Triangulation mit Laserlicht," in *VDI-Berichte*, vol. 2323, *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: 8. VDI-Tagung, Karlsruhe, 05. und 06. Juni 2018*, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2018.
- [7] Kubitz, Wilks, HELLA KGaA Hueck & Co., Schäfer, L-LAB, "Automatische Justage eines hochauflösenden Scheinwerfers," in *VDI-Berichte*, vol. 2221, *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik: 6. VDI-Tagung, Karlsruhe, 06. und 07. Mai 2014*, Düsseldorf: VDI-Verl., 2014.
- [8] J. Salvi, J. Pagès, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems," *Pattern Recognition*, vol. 37, no. 4, pp. 827–849, 2004, doi: 10.1016/j.patcog.2003.10.002.
- [9] Springer International Publishing, *Active Lighting and Its Application for Computer Vision: 40 Years of History of Active Lighting Techniques*, 1st ed.
- [10] Y. Lei, K. R. Bengtson, L. Li, and J. P. Allebach, "Design and decoding of an M-array pattern for low-cost structured light 3D reconstruction systems," in *2013 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2013): Melbourne, [Victoria], Australia, 15 - 18 September 2013 ; [proceedings]*, Melbourne, Australia, 2013, pp. 2168–2172.
- [11] Christian Hinterwälder, Michael Hamm, Jonas Kobbert, AUDI AG, "The Aiming of Headlamps and Resulting Influences on Bechmarks and Road Users," in *Darmstädter Lichttechnik, 14th International Symposium on Automotive Lighting - ISAL 2021 - Proceedings of the Conference: Volume 19*, T. Q. Khanh, Ed., München: utzverlag GmbH, 2022, pp. 371–380.

# Selbstlernende Produktionsmaschinen für die automatisierte Fertigung von Lichtsystemen

M.Sc. Maximilian Hoeren, M.Sc. Daniel Zontar,  
Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher,  
Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen

## Kurzfassung

Kernelemente moderner Produktionsmaschinen für die automatisierte Fertigung von Lichtsystemen sind komplexe Algorithmen, die Lichtverteilungen inline analysieren und aktiv korrigieren. Dadurch können Produkte höchster Qualität bei geringem Ausschuss gefertigt werden. Das Fraunhofer IPT forscht an dem Einsatz künstlicher Intelligenz für industriereife Lösungen, die in der Lage sind, komplexe Strahlanalysen und Justageprozesse automatisiert zu erlernen. Dies reduziert die Entwicklungsaufwände und ebnnet somit den Weg für innovative Produkte und Montageverfahren.

## Abstract

Core elements of modern production machines for the automated manufacture of lighting systems are complex algorithms that analyses light distributions inline and actively correct them. This enables products of the highest quality to be manufactured with minimal waste. The Fraunhofer IPT is researching the use of artificial intelligence for industry-ready solutions that are capable of learning complex beam analyses and alignment processes automatically. This reduces the development effort and thus paves the way for innovative products and assembly processes.

## 1. Aktive Justage Technologie

Die optischen Technologien in der Fahrzeugtechnik entwickeln sich rasant. Neuartige Komponenten wie hochauflösende Matrix-LEDs und diffraktive optische Elemente bieten völlig neue Möglichkeiten bei der Gestaltung von Scheinwerfern und Beleuchtungssystemen. Gleichzeitig erfordern diese eine hochpräzise Positionierung und Orientierung und stellen somit neue Herausforderungen für die Fertigungstechnik dar.

Ein Kernverfahren, welches sich speziell bei der Montage optischer Systeme etabliert hat, ist die sogenannte „aktive Justage“. Der Ansatz ist dabei einfach und elegant: Das optische System wird bei der Montage betrieben, um dessen Funktion durch die relative Positionierung und Ausrichtung (Justage) der Einzelkomponenten zu optimieren. Ist die Funktion in-

nerhalb eines gewissen Akzeptanzintervalls, dann wird der Zustand z.B. mittels eines UV-aushärtenden Klebstoffs fixiert. In einer automatisierten Fertigung, erfolgt dieser Vorgang vollkommen autonom durch einen Algorithmus, der anhand von Sensordaten und einer definierten Strategie die automatische Justage durchführt. Abbildung 1 verdeutlicht dies am Beispiel eines Reflektorschienwerfers.

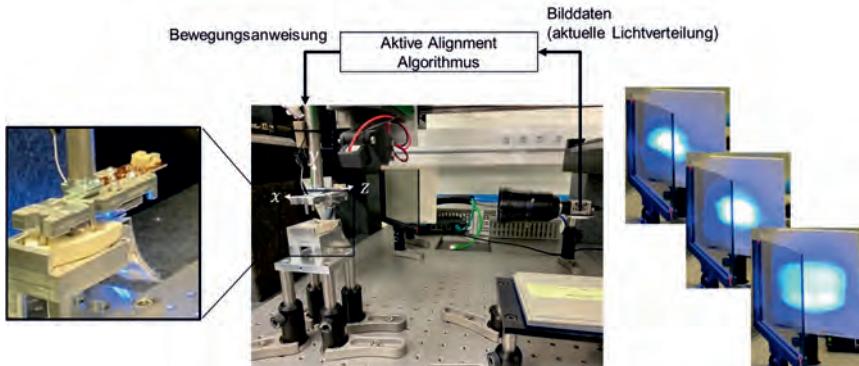


Bild 1: Links: eine von einem Manipulator gegriffene Wärmesenke mit kontaktierter Lichtquelle wird über einem zu montierenden Reflektor in Position gebracht. Mitte: Mittels eines bildgebenden Messsystems, kann die Lichtverteilung, gegeben durch die aktuelle relative Lage von Wärmesenke und Reflektor erfasst werden. Diese wird von einem Algorithmus ausgewertet, der daraus eine Bewegungsanweisung für den Manipulator bestimmt. Rechts: Die Lichtverteilung wird durch den Algorithmus iterativ korrigiert / optimiert. Anschließend werden Reflektor und Wärmesenke in der Ideal-lage gefügt.

Im Hinblick auf Qualität und Ausschuss bietet die aktive Justage folgende Vorteile:

- Direkte Optimierung der Produktfunktionalität / Qualität bei der Montage
- Inlinebewertung der Produktqualität und der Effekte des Fügeverfahrens
- Implizite Kompensation optischer Toleranzen (Brennweite, ...)
- Optische Funktion kann im Vergleich zu geometrischen Eigenschaften wie Oberflächenbeschaffenheiten robuster gegenüber Schwankungen der Komponentenqualität sein.

## 2. Grenzen der aktiven Justage

Trotz der Vorteile von aktiven Verfahren, werden an vielen Stellen noch anspruchsvolle geometrische Justagen eingesetzt, bei denen beispielweise LEDs und Lichtleiter vermessen und zueinander ausgerichtet werden [4]. Dies hat folgende Gründe:

- Eine aktive Justage erfordert immer eine produktspezifische Messtechnik die individuell entwickelt werden muss [4] [5]
- Die Entwicklung aktiver Justage Algorithmen erfordert ein Domäne-übergreifendes Fachwissen in den Bereichen Optik, industrielle Bildverarbeitung, Regelungstechnik und Robotik [4] [5]
- In vielen Fällen eignen sich die Qualitätskriterien nur für die finale Bewertung des Produkts nach der Justage, jedoch nicht um die Justage anhand dieser durchzuführen. (Beispiel Scheinwerfer: Vom Gesetz vorgegebene Kriterien wie z.B. die HDG-Schärfe, sind nicht über den gesamten Suchraum der Justage auswertbar / definiert, da sich die Lichtverteilung in den Grenzbereichen zu stark verformt)
- Letzteres bedingt, dass bei existierenden aktiven Justage Verfahren Brute-Force Ansätze als Algorithmen eingesetzt werden. Dies bedingt lange Taktzeiten und wirkt damit abschreckend auf Produktionsplaner.

## 3. Konzept der selbstlernenden aktiven Justage

Ausgehend von diesem Stand der Technik stellt sich die Frage wie die aktive Justage in einem größeren Einsatzgebiet Anwendung finden kann, bzw. welche Probleme gelöst werden müssten, um die aktive Justage einem größeren Anwendungsgebiet zugänglich zu machen. Eine der Kernaufgaben bei der Umsetzung einer automatisierten aktiven Justage ist die Entwicklung der notwendigen Algorithmik. Das Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie untersucht im Leitprojekt EVOLOPRO inwiefern maschinelles Lernen der Schlüssel zu einem effizienteren Entwicklungsprozess für aktive Justage-Algorithmik sein könnte und welche technologischen Verbesserungen im Hinblick auf die Adaptivität und Taktzeit möglich sind. Im Rahmen dieser Forschung wurde 2020 ein neuer Ansatz entwickelt, der speziell im Anwendungsfall Scheinwerfer-Montage deutliche Verbesserungen bringt.

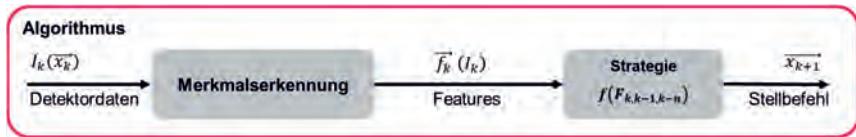


Bild 2: Verarbeitungspipeline zur Ermittlung eines Manipulator-Stellbefehls bei der automatisierten aktiven Justage

Um den Ansatz zu erläutern, soll zunächst die Verarbeitungspipeline eines Algorithmus für die aktive Justage näher betrachtet werden. Abbildung 2 zeigt die wesentlichen Elemente einer solchen Verarbeitungspipeline:

- **Merkmalserkennung:** Die Merkmalserkennung übernimmt im Algorithmus die Aufgabe einer Dimensionsreduktion. Nach der Aufnahme der Detektordaten (z.B. Lichtverteilung auf Schirm, die mit einer Kamera aufgenommen wurde), wird ein Merkmalsvektor bestimmt. Dieser enthält die wesentlichen, für die Positionierung und Orientierung relevanten Daten wie z.B. Iso-Flächen, Schwerpunkte, Maximal- / -Minimalintensitäten, etc. Diese werden durch die Strategie optimiert / in Ziel-Intervalle gebracht. Nicht alle Merkmale können in jeder Situation ermittelt werden, da nicht alle Merkmale über den gesamten Suchraum definiert sind oder Fehler wie Verunreinigungen auf den Komponenten auftreten können. Die Merkmalserkennung muss diese Umstände entsprechend abfangen und die übergeordnete Strategie informieren.
- **Strategie:** Die Strategie bestimmt die Reihenfolge, in der die Freiheitsgrade optimiert / geregelt werden. Sie ist abhängig von technologischen Parametern wie Kollisionsmöglichkeiten und Zykluszeit und vom Verlauf der Merkmale über dem Suchraum.

Aufgrund der hohen Strahlungsgeschwindigkeit, Abtastrate und Bewegungsgeschwindigkeit und unter Vernachlässigung von Temperaturdefekte (z.B. Wellenlängendrift durch Erwärmung der Strahlquelle), können optische Systeme wie Scheinwerfer oder Beleuchtungssysteme bei der aktiven Justage als statisch und zeitinvariant angenommen werden. D.h. eine bestimmte relative Position und Orientierung (Pose)  $\vec{x}_k$  der zu justierenden Komponente führt immer zu den gleichen Detektordaten  $I_k$ . Damit kann das Justage-Problem durch das Systemverhalten  $I_k = f(\vec{x}_k)$  beschrieben werden. [1][3]

Ausgehend von dieser Betrachtung und dem Ziel eine Justage in möglichst wenig Schritten durchführen zu können, lässt sich folgender (idealer) Algorithmus formulieren:

$$\text{Merkmalserkennung:} \quad \vec{f}_k(I_k) = \vec{x}_k$$

$$\text{Strategie:} \quad \vec{x}_{k+1} = -k \cdot \vec{f}_k(I_k) = -k \cdot \vec{x}_k \text{ mit: } 0 < k < 1$$

In diesem Algorithmus entspricht der Merkmalsvektor  $\vec{f}_k(I_k)$  dem aktuellen Justage-Fehler bzw. der aktuellen relativen Pose der zu justierenden Komponente  $\vec{x}_k$ . Die Strategie entspricht einem Proportional-Regler, welcher mit einer bestimmten Verstärkung  $k$  den Fehler iterativ oder mit einem Schritt ( $k = 1$ ) minimiert. Durch die Erweiterung des Verstärkungsfaktors  $k$  zu einer Diagonalmatrix, können die verschiedenen Freiheitsgrade bei der Justage unterschiedlich stark geregelt werden. Dies ermöglicht es auch technologische Randbedingungen, wie Kollisionsgefahren oder unplausible Merkmalswerte in bestimmten Regionen des Suchraums zu berücksichtigen indem nicht alle Freiheitsgrade simultan, sondern einzelne Freiheitsgrade sequenziell korrigiert werden. Die Strategie ist universal einsetzbar und der Aufwand der Implementierung reduziert sich auf die Merkmalserkennung.

Auf Basis dieses idealen Algorithmus wurden verschiedene Verfahren des maschinellen Lernens untersucht und evaluiert.

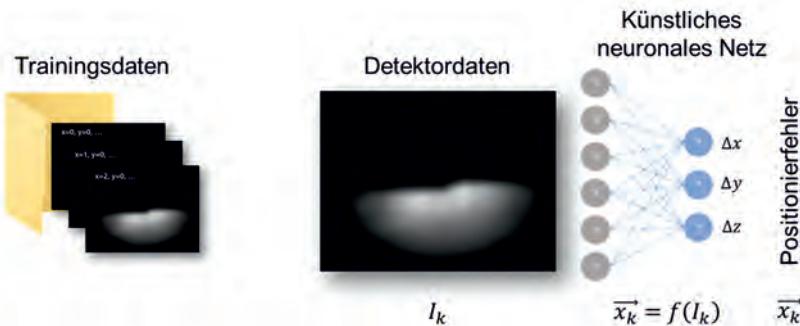


Bild 3: Selbstlernender Posenschätzer

Der neu entwickelte Ansatz basiert auf dem sogenannten „überwachten Lernen“ (engl. supervised learning). Beim überwachten Lernen werden gelabelte Daten verwendet, um ein künstliches neuronales Netz zu trainieren. Nach dem Training ist das Netz in der Lage, Label für unbekannte Daten zu schätzen. Typische Vertreter solcher Verfahren sind Klassifikato-

ren, die z.B. auf Bildern zwischen Hunden und Katzen unterscheiden können. Wie in Abbildung 3 dargestellt nutzt der neu entwickelte Ansatz gelabelte Detektordaten um das invertierte Systemverhalten  $\vec{x}_k = f(I_k)$  zu erlernen und damit die aktuelle Position  $\vec{x}_k$  auf Basis der aktuellen Detektordaten  $I_k$  zu schätzen. Unter der Voraussetzung eines statischen, zeit-invarianten Systems können die Trainingsdaten durch Abtastung des Arbeitsraums mit dem Manipulator aufgenommen werden. Dabei werden die Detektordaten mit den relativen Abweichungen zu einer vorher definierten Zielpose gelabelt.

Der beschriebene Ansatz wurde am Fraunhofer IPT an einem Demonstrator (siehe Abbildung 1) implementiert und evaluiert. Für die aktive Justage eines Reflektorschienwerfers in drei translatorischen Freiheitsgraden wurden 800 Bilder einer Lichtverteilung in ca. 3 min als Trainingsdatensatz aufgenommen. Das System ist nach dem Training in der Lage die Ziel-Lichtverteilung innerhalb von 3 Schritten aus beliebigen Positionen im Suchraum einzustellen.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Der entwickelte Ansatz besitzt das Potenzial, einige der Probleme des Stands der Technik zu lösen. Durch das maschinelle Lernen ist bei der Übertragung auf andere Anwendungen keine explizite Programmierung mehr erforderlich. Dadurch könnte die Entwicklung neuer Justage-Algorithmen zukünftig von Optik-Experten oder Produktdesignern ohne Automatisierungserfahrung durchgeführt werden. Der Posenschätzer erlernt beim Training selbstständig welche Features in den Detektordaten relevant für die Justage sind und ist somit in der Lage auch subjektiv definierte Ziel-Lichtverteilung einzustellen. Durch das überwachte Lernen können Datensätze beliebig erweitert oder sogar kombiniert werden und bestehende Netze neu- oder nachtrainiert werden. Dadurch kann sich der Algorithmus auf Schwankungen in der Komponentenqualität in der Produktion adaptieren. Das Potenzial für Verbesserungen der Taktzeit konnten mit dem Demonstrator gezeigt werden.

Diese Forschungsaktivitäten sind Teil des Fraunhofer Leitprojekts EVOLOPRO. Das Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie arbeitet aktuell daran, dass neu entwickelte Verfahren zu industrialisieren und sucht dafür Partner und weitere Anwendungsfälle.

## 5. Quellen

- [1] Zontar D. et. al.: "Offline development of active alignment based on empirical virtual environments", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Conference on High-Power Laser Materials Processing, 2 März 2020
- [2] Hoeren M. et. al.: "Performance comparison between model-based and machine Learning approaches for the automated active alignment of FAC-lenses", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Conference on High-Power Laser Materials Processing, 2 März 2020
- [3] Hoeren M. et. al.: "Offline development of active-alignment-algorithms by efficient interpolation of discrete databases", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Conference on High-Power Laser Materials Processing, 4 März 2019
- [4] <https://www.elekrotechnik.vogel.de/kamerasystem-zur-montage-von-led-matrix-scheinwerfern-a-852583/>
- [5] 2014 Westphalen, Thomas: Algorithmen zur automatisierten Justage mikrooptischer Komponenten (ILT)
- [6] 2018 Krappig, Reik: Hochgenaue wellenfrontbasierte Justage kleinaperturiger optischer Systeme (Prof. Schmitt)



# Weiterentwicklungen in der MLA Technologie

## Applikationen und technologische Umsetzungen

M. Sc. **Christopher Bremer**, Dr. rer. nat. **Wilfried Noell**,  
Dr. rer. nat. **Reinhard Völkel**,  
SUSS MicroOptics SA, Neuchâtel, Schweiz

### Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die MLA Technologie und der Herstellungsprozess vorgestellt. Weiterhin wird der Einfluss der Beleuchtung auf die Auflösung der Projektion evaluiert und gezeigt, dass die Eingangskollimation auf das jeweilige MLA-Konzept angepasst sein sollte. Bei einer Projektion mit größeren Öffnungswinkeln (verglichen mit dem aktuellen Standard von 11°), kann das Design der Einzelkanäle angepasst, wie auch eine Kombination aus MLA mit Prismen genutzt werden. Diese unterschiedlichen Ansätze werden miteinander verglichen und die Vorteile des jeweiligen Ansatzes aufgeführt.

### 1. Anwendungen von Mikrooptiken im Automobil

Durch die Einführung des Lichtteppichs im BMW 7er sind Mikro Linsen Arrays (MLAs) seit 2015 im automobilen Markt vertreten [1]. Durch die Miniaturisierung und Multiplikation der einzelnen Projektionskanäle kann eine sehr gute Abbildungsqualität und ein hoher Lichtstrom bei gleichzeitig geringem Bauraumvolumen des optischen Systems ermöglicht werden [2]. Insbesondere bei kleinen Einfallswinkeln der Projektion kommen die Vorteile des MLAs zum Tragen [3].

Seit 2021 ist das erste Fahrzeug (Lucid Air) mit MLA- Scheinwerfer auf dem Markt [4]. Neben der geringen Bauraumtiefe der MLAs kann auch eine extrem geringe Höhe der Elemente realisiert werden. Hierdurch ergeben sich neuartige Designoptionen, wie beispielsweise „linienförmige Scheinwerfer“. Weiterhin nutzt der Hyundai Genesis ebenfalls MLA-Elemente in seinem Scheinwerfersystem [5]. Auch in diesem Fall wird ein linienförmiges Erscheinungsbild der leuchtenden Flächen erzeugt.

## 2. MLA Konzepte und Herstellungsprozess

Bei den Bodenprojektionen besteht das MLA typischerweise aus einem Kondensorlinsenarray, einem Substrat mit Apertur und einem Projektionslinsenarray. Der Aufbau und typische Dimensionen sind in Bild 1 zu sehen.

Im Gegensatz zu den Lichtteppichmodulen bestehen die MLA-Module für die Scheinwerferanwendungen aus einem Waferstack mit zwei Substraten [6 – 8]. Dabei befindet sich die Apertur im Gegensatz zu dem Lichtteppich-MLA nicht direkt hinter den Kondensorlinsen, sondern in einem Abstand zu den Kondensorlinsen zwischen den beiden Substraten. Hierdurch ergeben sich zusätzliche Freiheitsgrade, wodurch sich beispielsweise AFS-Funktionen realisieren lassen [8].

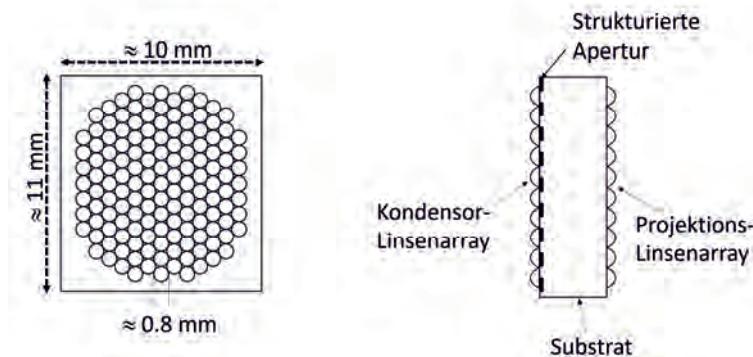


Bild 1: Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts) auf ein MLA-Design für Lichtteppichanwendungen.

Das Konzept für ein MLA, wie es aktuell für Scheinwerferanwendungen genutzt wird, ist in Bild 2 dargestellt.

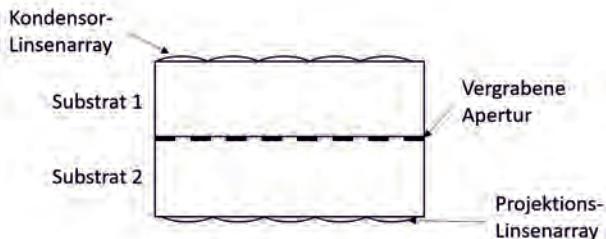


Bild 2: Seitenansicht auf ein MLA- Design für Scheinwerferanwendungen.

Um den hohen Anforderungen an die Qualität der Projektionsoptik und die Ausrichtung der einzelnen Elemente (Linsenarrays zum Substrat, zur Apertur) zu genügen, wird das Imprint-Verfahren zur Herstellung der MLAs genutzt. Dabei wird eine Metallschicht auf ein Glassubstrat aufgebracht und lithografisch strukturiert (Bild 3, links). Im nächsten Schritt wird ein Polymer auf dieses Substrat aufgetragen und anschließend durch einen Stempel die Linsen abgeformt. Das Material wird durch UV-Licht ausgehärtet (Bild 3, 2. und 3 Bild von links). Anschließend wird der Prozessschritt der Linsenabformung für die gegenüberliegende Seite des MLAs wiederholt (Bild 3, rechts).

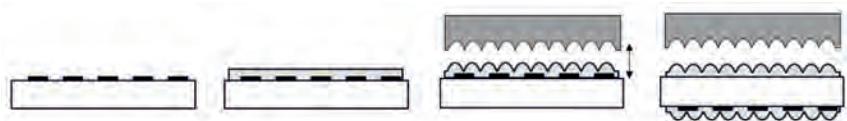


Bild 3: Imprint Prozess: Herstellung eines MLAs für Lichtteppichanwendungen. Beschreibung der Schritte im Text.

Durch dieses Herstellungsverfahren lassen sich verschiedene Kombinationen und somit unterschiedliche Optikdesigns realisieren. Die Apertur kann sich auf beiden Seiten des Substrates befinden, die Linsenparameter können unterschiedlich sein (siehe Bild 4 für die verschiedenen Möglichkeiten).

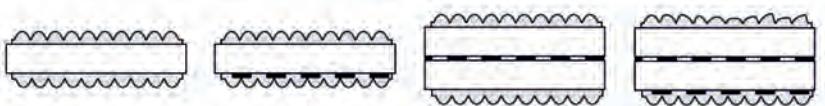


Bild 4: Designmöglichkeiten ermöglicht durch den Imprint Prozess, von links nach rechts:  
Kombination eines Glassubstrates mit Kondensor und Projektionslinsen; Kombination eines Glassubstrates mit Kondensor-, Projektionslinsen und Apertur; Apertur zwischen gestackten Wafern; Aperturen auf Linsenseite und zwischen den Wafern, kombiniert mit Freiformlinsenarray.

### 3. Einfluss der Beleuchtung auf die Auflösung

Jeder Kanal besteht aus einer Kondensorlinse, einer bildgebenden Struktur und einer Projektionslinse. Um keine Geister durch Kanalübersprechen zu erzeugen, muss das Licht der LED zunächst kollimiert werden. Im Folgenden wird der Einfluss des Kollimators auf die Auflösungsgrenzen des MLAs untersucht.

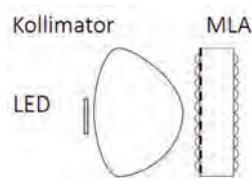


Bild 5: MLA Konfiguration für einen Lichtteppich. Der Kollimator muss für das MLA parallelisiertes Licht zur Verfügung stellen.

Das Standarddesign des Lichtteppichs verfügt über ein Field of View von  $\pm 11^\circ$ . Da Kondensor- und Projektionslinse die identischen Linsenparameter (Radius und konische Konstante) vorweisen, ergibt sich ein maximaler Akzeptanzwinkel von  $\pm 11^\circ$  für dieses Design. Da die Brennweite der Kondensorlinse im Medium dem Abstand zwischen Projektions- und Kondensorlinse entspricht, ergibt sich in der Ebene des Projektionslinsenarrays in jedem Einzelkanal eine Abbildung der Beleuchtungsquelle. Die Größe dieser Abbildung ist dabei proportional zur Divergenz des Lichtes nach der Kollimation. Die Ausdehnung X der in die

Projektionslinsen abgebildeten Lichtquelle lassen sich mit der Brennweite  $f'$  im Medium und dem Kollimationswinkel  $\beta$  über

$$X = f' \cdot \tan\left(\sin\left(\frac{\sin\left(\frac{\beta}{n}\right)^{-1}}{n}\right)\right)$$

berechnen.

Der unterschiedliche Abbildungsmaßstab lässt sich sehr gut durch eine Simulation zeigen. Das hierfür gewählte Simulationssetup ist in Bild 6 dargestellt. Da eine künstliche Lichtquelle verwendet wurde, die in diesem Fall eine runde Divergenz vorweist, ist dessen Abbildung ebenfalls rund. Bei der Verwendung einer rechteckigen LED ist die Divergenz nach der Kollimation im Regelfall ebenfalls rechteckig im Winkelraum. Dies führt zu einer rechteckigen Abbildung in der Ebene der Projektionslinsen. Die hier vorgestellten Konzepte lassen sich auf einen rechteckigen Formfaktor der Lichtquelle übertragen.

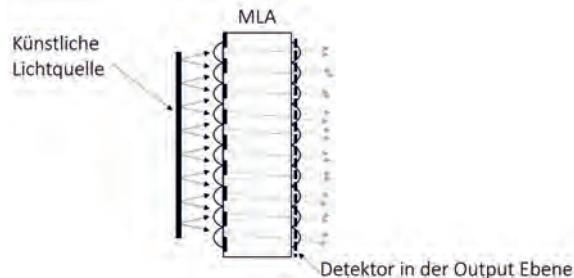


Bild 6: Seitenansicht des Simulationssetups. Die Divergenz der Quelle kann variiert werden, die Größe der abgebildeten Lichtquelle in den Projektionslinsen kann durch den Detektor bestimmt werden.

In Bild 7 sind die Beleuchtungsstärken auf der Detektorebene für einen Input mit einer Divergenz von  $\pm 2^\circ$  und  $\pm 10^\circ$  dargestellt. Die unterschiedliche Ausleuchtung ist sehr gut zu erkennen. Während bei  $\pm 2^\circ$  nur ein kleiner Teil der Apertur ausgeleuchtet wird, ist nahezu die volle Apertur bei einem Input von  $\pm 10^\circ$  ausgeleuchtet. Für die Bewertung des Auflösungsvermögens sind die Einflüsse durch die Beugung und durch Aberrationen zu beachten. Bei den minimal ausgeleuchteten Aperturen sind Beugungseffekte dominierend, bei

den maximal ausgeleuchteten Aperturen nimmt der Anteil der Abbildungsfehler zu und die Beugungseffekte ab.

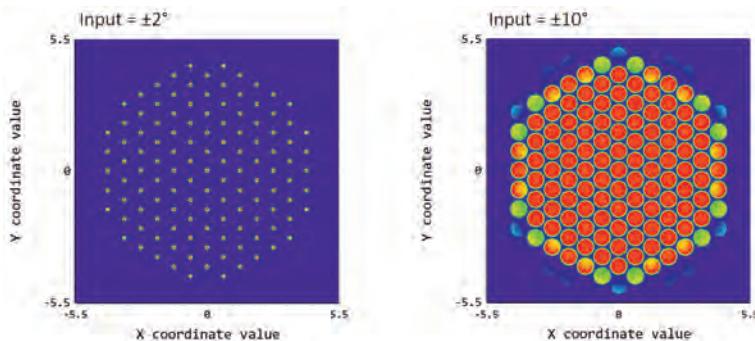


Bild 7: Beleuchtungsstärke auf dem Detektor in der Austrittspupille. Links: die Divergenz nach dem Kollimator beträgt  $\pm 2^\circ$ , nur ein kleiner Anteil der Apertur wird ausgeleuchtet. Rechts: die Divergenz nach dem Kollimator beträgt  $\pm 10^\circ$ , es wird ein Großteil der Apertur ausgeleuchtet.

Für das stark kollimierte Licht ergibt sich somit eine größere F-Zahl  $F/\#'$  für den Projektionskanal. Durch den Zusammenhang:

$$d = 1.22 \cdot \lambda \cdot F/\#'$$

lässt sich die beugungsbegrenzte Auflösung  $d$  mit der Wellenlänge  $\lambda$  bestimmen.

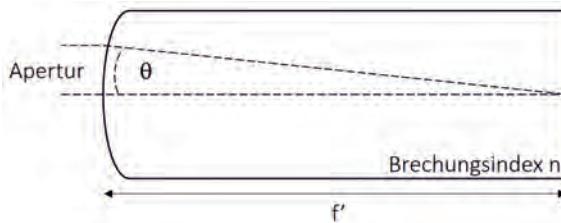


Bild 8: Seitenansicht eines Einzelkanals. Im generischen Modell weist der Kanal eine Länge von ca. 3 mm vor.

Wie aus Bild 8 ersichtlich, ergibt sich:

$$F/\#' = \frac{1}{2 \cdot n \cdot \sin(\theta)}$$

Bild 9 zeigt die beugungsbegrenzte Auflösung  $d$  sowie den simulativ ermittelten Spotradius, welcher sich bei verschiedenen Aperturen (für on-Axis Strahlen) aus den Aberrationen ergibt. Es ist direkt ersichtlich, dass der Einfluss durch Beugung für den gegebenen Parameterraum nicht vernachlässigt werden darf.

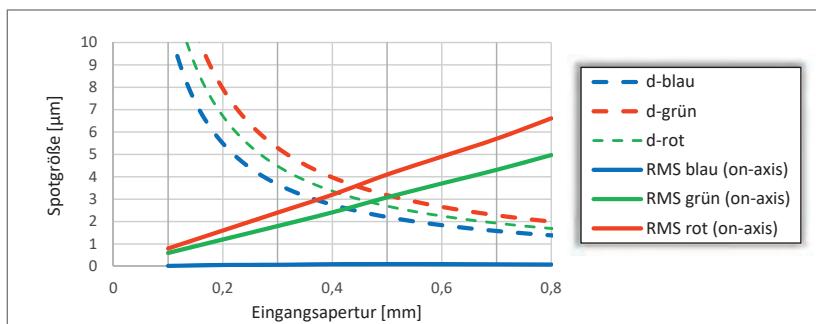


Bild 9: Größe des beugungsbegrenzten Spots  $d$  sowie die sich aus Aberrationen ergebende RMS Spotsize in Abhängigkeit von der Apertur.

Aufgrund des Einflusses der Beugung ist für die Bewertung dieses Systems die Point Spread Function die geeignete Wahl. In erster Näherung ist jedoch ebenso ersichtlich, dass eine

Addition des Diffraction Limits  $d$  mit der RMS-Spotsize ähnliche Ergebnisse zeigen wie der Radius der PSF, welcher 85% der Energie einschliesst (85% encircled energy). Dies kann in Bild 10 nachvollzogen werden.

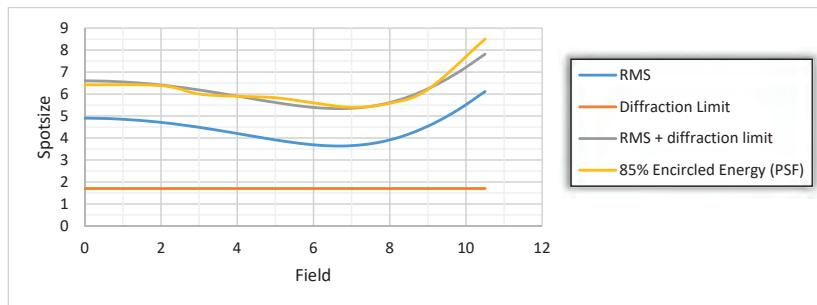


Bild 10: Vergleich der RMS-Spotsize, des diffraction Limits und des Radius, welcher 85% der Energie der PSF einschliesst für 550 nm. Es ist ersichtlich, dass der PSF Radius und die addierten Radien (Spotsize + diffraction Limit) sehr ähnliche Ergebnisse liefern.

In Bild 11 ist die Abhängigkeit der Spotsize von der Apertur aufgetragen. Die Größe der Spotsize wurde über die „85% Encircled Energy“ (analog zu oben) berechnet. Dabei wurde die Spotsize für die „on-Axis“-Strahlen mit einem Einfallswinkel von  $0^\circ$  und für die „off-Axis“-Strahlen mit einem Einfallswinkel von  $9^\circ$  berechnet. Im Bereich einer beleuchteten Eingangsapertur von ca. 0,4 mm ergibt sich ein Minimum.

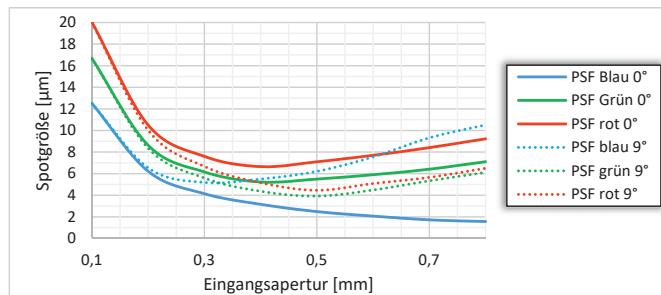


Bild 11: Die Spotgröße zeigt für grünes und rotes Licht eine minimale Spotgröße bei einer Apertur von 400  $\mu\text{m}$ . Für blau ist in diesem Design die maximale Apertur am geeignetsten.

#### 4. Vergrößertes FoV

Ein isotropes Field of View führt bei einer schrägen Projektion zu einem elliptischen Beleuchtungsbereich. Je nach Ausrichtung des MLAs kann die Länge der Ellipse um ein Mehrfaches größer sein als ihre Breite (siehe Bild 11, oben). In dem gezeigten Beispiel hat das MLA einen Öffnungswinkel von 21°. Entlang der x-Achse stimmen die Ausdehnung der gewünschten Projektion und das FoV (gestrichelte, rote Linie) überein. Jedoch ist das Muster in Bild 12 oben zu breit (in Richtung der y-Achse), um es mit dem gegebenen MLA zu projizieren.

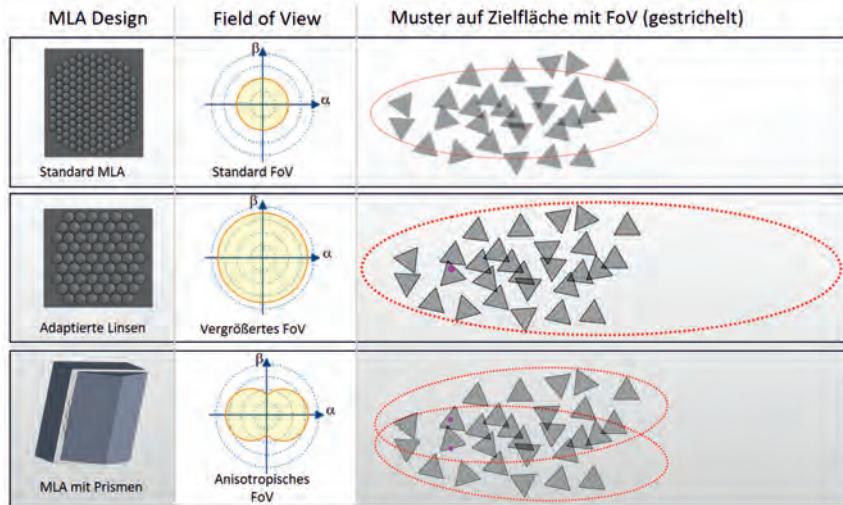


Bild 12: Mit einem gegebenen Field of View (mittleres Bild) lassen sich unter Umständen nicht alle gewünschten Inhalte projizieren. Insbesondere die Ausdehnung in y-Richtung ist bei einer Projektion entlang x kleiner.

Eine Möglichkeit, die gesamte Projektion (bei gegebenen Einbauparametern) zu ermöglichen, besteht darin, das Optikdesign des MLAs anzupassen. Durch eine (isotope) Vergrößerung des FoVs wird die Ellipse auf der Projektionsfläche sowohl in x- als auch in y-Richtung vergrößert. Dies bedeutet, dass ein großer Teil des FoV nicht genutzt wird (rot gestreifter Bereich, Bild 11, Mitte), was zu einer geringeren Effizienz und Beleuchtungsstärke führt. Die Anforderungen an die Bildqualität sind ebenso höher, da für große Winkel eine gute Auflösung gefordert ist.

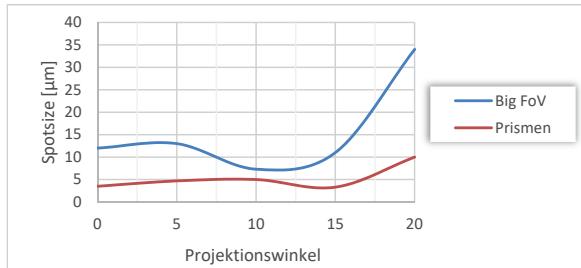


Bild 13: Die Spotsize für grünes Licht (550 nm). Für die adaptierten Linsen und die Prismen. Die Prismen zeigen nicht nur absolut, sondern auch relativ zur Apertur eine deutlich bessere Auflösung.

Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung eines zusätzlichen optischen Elements, z. B. eines Prismas. Auf diese Weise können verschiedene Teile des FoV umgelenkt werden, so dass die gesamte Projektion dargestellt werden kann. Außerdem wird ein größerer Teil des FoV genutzt, was die Effizienz und Beleuchtungsstärke erhöhen kann. In Bild 14 ist erkennbar, dass die Auflösung des großen Kanals sehr stark über den Projektionswinkel variiert. Ebenso ist die absolute (und in den meisten Fällen auch die relative Spotgröße zur Apertur) des adaptierten Designs größer und die Auflösung somit schlechter.

Hier ist jedoch zu beachten, dass der größere Kanal Vorteile bei polychromatischer Beleuchtung vorweist, wie auch weniger intensive Geisterbilder (bei gleicher Kollimation) erzeugt. Durch die Prismen ist es möglich, insbesondere für monochromatische Projektionen eine sehr gute Bildqualität zu erzielen. Beispiele hierfür sind in Bild 13 dargestellt. Dabei ist eine Farbe jeweils durch ein Prisma abgebildet.

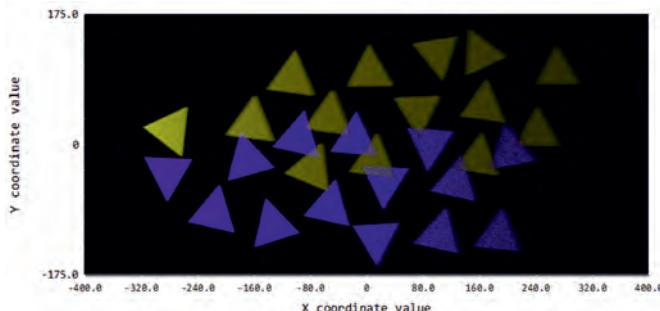


Bild 14: Sehr hohe Abbildungsgüte in x- als auch in y-Richtung bei der Projektion monochromatischer Strukturen mit den Prismen.

## 5. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die MLA-Technologie und der Produktionsprozess vorgestellt, sowie die Limits, die sich für MLAs ergeben. Es wurde gezeigt, dass der Einfluss der Beugung im MLA Design nicht vernachlässigt werden darf. Die Auflösungsgrenzen werden durch das MLA wie auch durch die Beleuchtungsseite beeinflusst. Die optimale Beleuchtung leuchtet im vorliegenden Design die halbe Apertur aus.

Für größere Öffnungswinkel gibt es diverse Designmöglichkeiten. Zum einen gibt es die Möglichkeit die Kanäle neu zu designen und ein großes Field of view zu generieren, zum anderen kann ein Standard-MLA mit einem Prisma verknüpft werden. Bei monochromatischer Beleuchtung, kann das Prismendesign hohe Beleuchtungsstärken und eine sehr gute Auflösung (in großen Teilen besser als die des adaptierten FoVs) bereitstellen. Für Sicherheitsprojektionen ist dieser Ansatz also sehr vielversprechend.

- [1] HELLA KGaA Hueck & Co., Lippstadt (2016): Das Fahrzeug weist den Weg Lichtteppich-Funktion leuchtet seitlichen Fahrzeugsbereich aus, Pressemitteilung
- [2] Fraunhofer IOF (2016): Kleine Projektoren mit großer Leistung, Pressemitteilung
- [3] Sieler, M. et al. (2012): Ultraslim fixed pattern projectors with inherent homogenization of illumination, Applied Optics, Vol. 51, No. 1, 64 – 74
- [4] Lucid Motors (2021): Lucid's Micro Lens Array lighting- A revolution in optical technology, Lucid Investor Deck
- [5] Hyundai Motor group (2021): Genesis unveils exterior images of the G90, Pressemitteilung
- [6] Bernhard Mandl, ZKW (2019): Mikroprojektions-Lichtmodul für Fahrzeugscheinwerfer, EP 3 365 593 B1, Patent
- [7] Hyo Jin Han, Joo Jin Chang, SL Corporation (2019): Lamp for Vehicle, EP 3 647 653 A1, Patentanmeldung
- [8] Wiebke Eckstein et al., Lucid Motors/ Atieva (2019): Solid state adaptive Headlight, EP 3 489 574 A1, Patentanmeldung



# Holografie – Neue Möglichkeiten in der Fahrzeugbeleuchtung

## Holography – New possibilities for vehicle lighting

Dipl.-Ing. **Martin Mügge**, HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt;  
**Christoph Erler**, Carl ZEISS Jena GmbH, Jena

### Kurzfassung

Signalfunktionen und die dafür eingesetzten Technologien unterstützen maßgeblich das Fahrzeugstyling. Fahrzeughersteller sind mehr denn je auf der Suche nach neuen Design-Optionen mit Abgrenzungspotential gegenüber ihren Wettbewerbern. Die Umsetzung von Signalfunktionen mit neuen Technologien, einem Wow-Effekt oder neuartigem Erscheinungsbild ist deshalb ein genereller Wunsch.

Holografie, eine an sich alte Technologie, bietet jedoch völlig neue Ansätze für Signalfunktionen mit hohem Innovationspotential. Um den gewünschten Neuheitslevel in vielfältiger Art und Weise zur Verfügung zu stellen und eine besondere Aufmerksamkeit zu erzeugen können sowohl grafische 3D-Hologramme als auch optische, funktionale Hologramme verwendet sein. 3D-Hologramme bieten ein neues Potential der Gestaltung. Aussagen wie „Licht aus dem Nichts“, „Shy-Tech“ oder „größere Tiefenwirkung als der physische Bauraum vorgibt“ können mit holografischen Systemen realisiert sein. Zudem können neuartige 3D-Lichtsignaturen umgesetzt werden. Optische Hologramme ersetzen heutige Optikkomponenten und reduzieren den Systemaufwand. Basierend auf einer holografischen Folie als Träger der Hologramminformation werden die dafür notwendigen Beleuchtungssysteme dargestellt, Randbedingungen erläutert, und insbesondere die Integration in kleine, typische automobile Bauräume betrachtet.

Prototypen mit unterschiedlichen Umsetzungen der holografischen Systeme zeigen die Integration und das Stylingpotential.

Die Prozesskette und Einbindung der Entwicklungspartner und Zulieferer für eine Nutzung der Holografie werden ebenso betrachtet.

### Abstract

Signal functions and the technologies used for them significantly support vehicle styling. More than ever, vehicle manufacturers are looking for new design options with the potential to

differentiate themselves from their competitors. The implementation of signal functions with new technologies, a wow effect or novel appearance is therefore a general desire.

However, holography, a technology that is old in itself, offers completely new approaches for signal functions with high innovation potential. In order to provide the desired level of novelty in a variety of ways and to generate special attention, both graphic 3D holograms and optical, functional holograms can be used.

3D holograms offer a new potential of design. Statements such as "light out of nowhere", "shy-tech" or "greater depth effect than the physical construction space provides" can be realised with holographic systems. Novel 3D light signatures can be realised. Optical holograms replace current optical components and reduce system complexity. Based on a holographic foil as the carrier of the hologram information, the necessary lighting systems are presented, boundary conditions are explained and, in particular, the integration into small, typical automotive installation spaces is considered.

Prototypes with different implementations of the holographic systems show the integration and the styling potential.

The process chain and integration of development partners and suppliers for the use of holography are also highlighted.

## 1. Holografie

Holografie ist bereits eine alte Technologie. Sie wurde von Dennis Gabor im Jahr 1948 erfunden, im Jahr 1971 erhielt er dafür den Nobelpreis für Physik.

Im Gegensatz zur Fotografie, bei der die räumliche Verteilung der Lichtintensität gespeichert und zweidimensional abgebildet wird, nutzt die Holografie zusätzlich die Aufzeichnung der Phaseninformation. In der Holographie wird bei der Aufnahme eines Hologramms mit einer Strahlungsquelle (Laser) eine kohärente, monochromatische Welle erzeugt, die in eine Referenz- und eine Objektwelle geteilt wird. Letztere beleuchtet ein Objekt und wird vom Objekt reflektiert, gestreut und mit der ungestreuten Referenzwelle auf dem zu belichtenden holographischen Material zur Interferenz gebracht, so dass sich ein der Phaseninformation der Objektwelle entsprechendes Interferenzmuster bildet. Beleuchtet man das entwickelte Hologramm mit einer identischen Referenzwelle, so wird aus dem im Hologramm gespeicherten Interferenzmuster das ursprüngliche Wellenfeld rekonstruiert und ein dreidimensionales virtuelles Bild des Objekts wird für den Beobachter am ursprünglichen Ort sichtbar.

Holografie ist eine Technologie, die in vielfältigen Varianten und Ausprägungen in unterschiedlichen Bereichen, z.B. Messtechnik, Sicherheitstechnik, Medizin, Datenspeicherung, Kunst &

Werbung, und als holografisch-optische Elemente (HOE) genutzt wird – und genau diese holografisch-optischen Elemente bieten Innovationspotential für die Fahrzeugbeleuchtung. Die Gestaltung und Betriebsbedingungen von Fahrzeugen definieren die Anforderungen an eine eingesetzte Technologie, ohne Frage sind die Anforderungen in der Automobiltechnik deutlich höher als beispielsweise in anderen Technikbereichen.

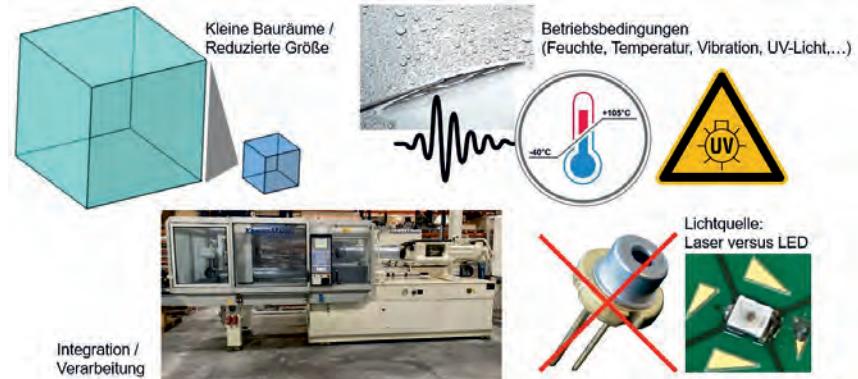


Bild 1: Anforderungen an Holografie für Automobiltechnik

Die Entwicklung und Anpassung der Holografie an die Automobilbedingungen ist eine anspruchsvolle Aufgabe, müssen doch verschiedenste Randbedingungen und Anforderungen betrachtet und erfüllt sein:

- Bauraum und Größe  
Die Einbaubedingungen in Scheinwerfern und Heckleuchten oder anderen Applikationen definieren den meist kleinen Bauraum und die begrenzte Größe der Hologramme, sowie Einschränkungen bei der Positionierung der Lichtquelle
- Lichtquelle: Laser versus LED  
Der Laser bzw. die Laserdiode ist für Hologramme eine bestens geeignete Lichtquelle! Leider stellt der Einsatzbereich im Fahrzeug bezüglich Farbe, Temperatur etc. hohe Anforderungen, für die nicht in jedem Fall Laserdioden zur Verfügung stehen; auch ist ihr Preis deutlich höher als für LED! Deshalb müssen holografische Systeme in der Automobiltechnik mit LED-Lichtquellen funktionieren!
- Betriebsbedingungen / Spezifikationsanforderungen / Lebensdauer  
Lichttechnische Systeme im Fahrzeug müssen einer Kombination von Umgebungs-einflüssen standhalten. Niedrige und hohe Temperaturen, Temperaturwechsel,

Feuchtigkeit, Vibration, Schock und UV-Licht sind nur einige Parameter, die es zu berücksichtigen gilt. Holografisches Material muss diesen Einflüssen standhalten, optimalerweise als Material selbst, oder integriert in ein Bauteil.

- Integration / Verarbeitung

Die Hologramme, in Form einer holografischen Folie (Volumenhologramm), müssen in lichttechnische Systeme integriert werden, dies kann auf unterschiedliche Weise geschehen. Standardverfahren, wie beispielsweise den Kunststoffspritzguss oder Klebeverfahren, die in der Fahrzeugtechnik üblich sind, müssen für die Integration von Hologrammen ebenfalls angewendet werden können. Sonderlösungen sind für eine erfolgreiche Technologienutzung zu vermeiden.

## 2. Hologramm-Ausführungen

Grundsätzlich kann ein Hologramm mittels zweier Ausführungen realisiert sein, als Oberflächenhologramm, durch Nutzung einer diffraktiven optischen Struktur auf der Oberfläche des Hologrammelements, oder als Volumenhologramm, vorzugsweise als holografische Folie mit einer Photopolymerschicht, in die die gewünschte Hologramminformation einbelichtet ist. Hierfür entwickelt die Covestro AG, gemeinsam mit HELLA (automotive Anforderungen, Spezifikationsprüfungen) und ZEISS (anwenderbezogene Anforderungen, Replikationsanforderungen), eine Automotive-Variante ihrer holografischen Folie Bayfol® HX. Die Bayfol® HX Folien basieren auf RGB-empfindlichen Photopolymeren für die Aufnahme volumenholografischer optischer Elemente (vHOE). Mögliche Anwendungen von vHOE reichen von Head-Mounted Displays, transparenten Kamerasyystemen, Hometech-Anwendungen, 3D-Brillen für die Unterhaltungsbranche, Head-up-Displays und der Beleuchtung in und an Fahrzeugen.

Bayfol® HX besteht aus einer transparenten Trägerfolie, einer photoreaktiven Schicht mit anpassbaren Eigenschaften und einer schützenden Deckschicht. Um für automotive-Anwendungen geeignet zu sein, ist eine PC-Trägerfolie und -Deckschicht vorgesehen.

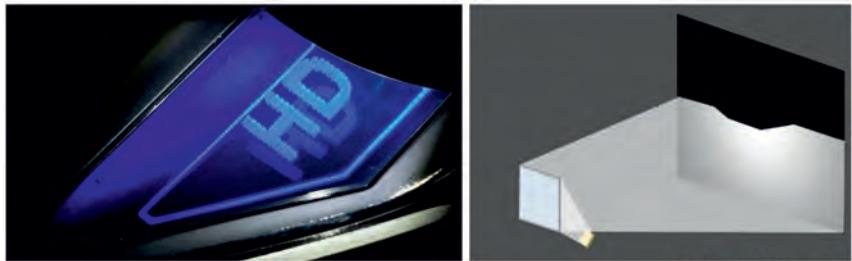
Bereits in der Früh-Phase der Zusammenarbeit von Covestro und HELLA erfolgte für die K2016 in Düsseldorf die Entwicklung und der Aufbau einer Prototyp-Heckleuchte mit holografischen Funktionen, der weltweit erste Demonstrator einer holografischen Heckleuchte. Die Hologramme realisieren eine Schlusslichtfunktion mit einer Anzahl im Raum schwebender Leuchtfächen (Flakes) auf unterschiedlichen Tiefenebenen.



Bild 2: Holografische Heckleuchte Covestro/HELLA für K2016, Weltpremiere

Die folienbasierten Volumenhologramme (vHOE) bieten Vorteile gegenüber den Oberflächenhologrammen, insbesondere die Transparenz der Hologrammfläche bei ausgeschalteter Beleuchtung ist hier hervorzuheben, des Weiteren sind komplexe dreidimensionale Hologrammbilder vorteilhafter mit einem Volumenhologramm realisierbar.

Hologramme können zur Darstellung dreidimensionaler Objekte und Szenen verwendet werden (Grafisches Hologramm) oder zur Lichtsteuerung, also als optisches Element zur Ablenkung, Streuung oder Fokussierung von Licht (Optisches Hologramm).



Grafisches Hologramm

Optisches Hologramm

Bild 3: Beispiele für grafisches Hologramm und optisches Hologramm

Beide Verwendungen bieten sich direkt an für eine Nutzung in der Fahrzeugbeleuchtung.

Grafische Hologramme zur Erzeugung dreidimensionaler Lichtsignaturen und Leuchteffekte setzen auf innovative Weise einen Trend fort, der sich bereits seit Einführung der LED-Technik etabliert hat, eine individuelle Licht-Gestaltung. Beispielsweise wurden Signalfunktionen mittels eines Spiegeltunnels gestaltet, der durch Mehrfachreflexion einer Lichtsignatur zwischen einem hinterem Vollspiegel und einem vorderen, halbtransparenten Spiegel eine virtuelle Tiefe erzeugt.



Bild 4: Citroen C4 Picasso Heckleuchte mit Spiegeltunnel

Auch die zweite bedeutende Anforderung der Fahrzeugdesigner für aktuelle Leuchtenausführungen, eine homogene Ausleuchtung der Signalfunktionsfläche, kann durch eine holographische Umsetzung einer Lichtsignatur realisiert werden.

Vorteile grafischer Hologramme für eine Signalfunktion sind:

- Dunkles oder schwarzes Erscheinungsbild bei inaktiven Hologramm  
(Licht aus dem Nichts; Shy-Tech; Black-Panel-Appearance)
- Beliebige, freie Gestaltung einer zwei- oder dreidimensionalen Lichtsignatur
- Nutzung eines Hauptobjekts und zusätzlicher Nebenobjekte
- Integration eines Hintergrunds, zur Verstärkung des Tiefeneindrucks
- Mehrere Sichtwinkel mit unterschiedlichen holografischen Inhalten

- Beliebige Anpassung der Helligkeit von Flächen, Linien, Objekten
- Homogene Leuchtpläne
- Als Add-On zu einer LED-Signalfunktion nutzbar
- Als Informations- oder Welcome-Hologrammfunktion nutzbar
- Als Innenraum-Applikation nutzbar
- Als holografisches Logo nutzbar
- Kombiniert mit konventioneller Lichttechnik auch als Signalfunktion nutzbar

Die Gestaltung des Hologramms, also der Objekte, Symbole, Texte oder beliebiger anderer Strukturen, die im holografischen Bild sichtbar sein sollen, kann vollkommen beliebig geschehen. Die Generierung und Platzierung der Objekte erfolgt in gängigen Design- oder CAD-Programmen, beispielsweise Alias, Blender oder CATIA.

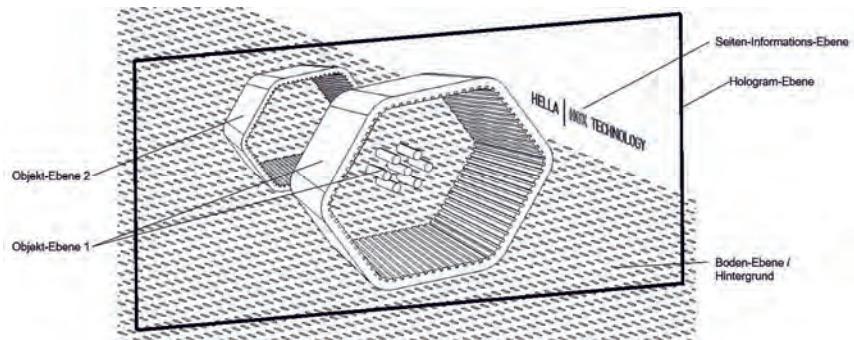


Bild 5: Designbeispiel für ein grafisches Hologramm

Trotzdem sind bei der Gestaltung des holografischen Bildes Randbedingungen zu beachten, um eine optimale und gelungene Bildkomposition und Qualität der Rekonstruktion zu realisieren. Objekte in der holografischen Ebene oder mit Durchdringung der holografischen Ebene können in höchster Qualität rekonstruiert werden, Objekte mit Abstand zur holografischen Ebene (davor bzw. dahinter) werden mit zunehmenden Abstand immer unschärfer. Ein gutes stilistisches Mittel zur Erzielung eines 3D-Eindrucks ist ein Hintergrundmuster vor dem das Objekt schwebt. Aus speziellen Blickrichtungen, beispielsweise von der Seite betrachtet, können auch zusätzliche Informationen und Texte oder Symbole integriert sein, die aus der Rückansicht nicht sichtbar sind. Objekte sind nur vor der holografischen Fläche abbildbar, d.h. bei größeren Abstand zur Hologrammebene und perspektivischer Betrachtung wandern Objekte

schnell zum Rand der Hologrammfläche und darüber hinaus und sind dann teilweise beschnitten oder gänzlich unsichtbar.

Optische Hologramme besitzen meist keine grafischen Inhalte, sondern wirken rein funktional als holografisch-optisches Element (HOE). Sie dienen dazu Licht in gewünschter Weise zu lenken, zu verteilen oder zu fokussieren und können somit konventionelle optische Bauteile ersetzen. Dadurch ergeben sich systembedingte Vorteile:

- Gewichtsreduzierung durch das Hologramm, z.B. wenn eine holografische Folie als Ersatz einer massiven Linse genutzt ist
- Erzeugung einer beliebigen Lichtverteilung
- Lichtumlenkung in definierte und extreme Winkel
- Erzeugung einer Lichtprojektion

### **3. Beleuchtungssysteme für holografische Systeme**

Holografische Funktionen können prinzipiell mit unterschiedlichen Systemen realisiert sein.

Als wesentliche Systeme sind vier Varianten zu benennen:

- Transmissions-Hologramm
- Reflexions-Hologramm
- EdgeLit-Hologramm
- Waveguide-Hologramm

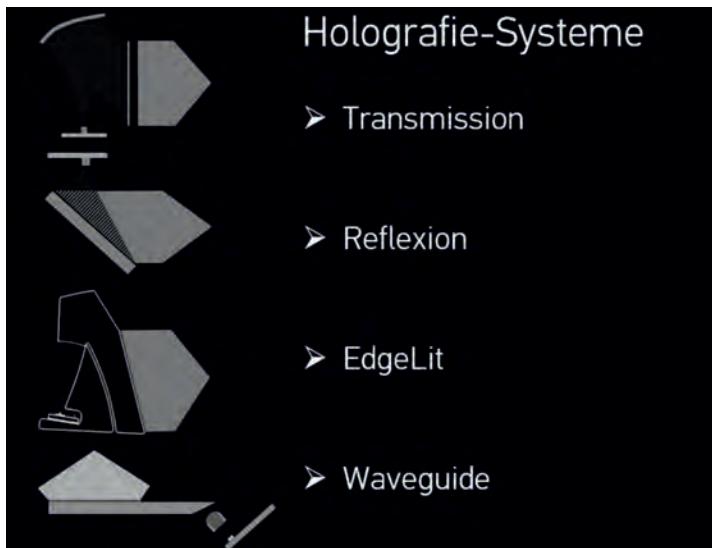


Bild 6: Prinzipdarstellungen von Holografie-Systemen

Die Namen weisen bereits auf die optische Eigenschaft des holografischen Systems hin, wenngleich natürlich in jedem System – angepasst an vorhandene Randbedingungen – Variationsmöglichkeiten vorhanden sind.

Die Wahl des Holografiesystems für eine spezifische Anwendung ist die Basis für den weiteren Entwicklungsprozess, ggf. sind mehrere mögliche Systeme zu bewerten und das optimale auszuwählen, welches den technischen Anforderungen (Größe, Integration in einen Bauraum, gewünschte Farbe, Sichtbarkeitsbereich, etc.) und den Anforderungen an die Abbildungsqualität und -umsetzung am Bestens entspricht. Es können auch Mischformen der Systeme verwendet sein, die in der Regel aber eine zusätzliche Komplexität aufweisen.

Unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen, wie Komplexität des Systems, Wahrnehmbarkeit der Oten-Ordnung, der umsetzbaren spektralen Wiedergabe und des Bauraumvolumens, kann eine Empfehlung bzw. Priorisierung festgelegt werden für eine entwicklungsseitige Beurteilung:

#### Transmissions-System

- Komplexität mittel
- Ote-Ordnung in Transmission und Reflexion sind zu berücksichtigen

- Wiedergabespektrum monochrom / polychrom
- Bauraumvolumen für Hologrammelement mittel (abhängig von der Größe), aber Position der entfernten Lichtquelle oder vom Kollimationselement ist zu berücksichtigen

#### Reflexions-System

- Komplexität gering
- Ote-Ordnung in Transmission und Reflexion sind zu berücksichtigen
- Wiedergabespektrum monochrom / polychrom
- Bauraumvolumen für Hologrammelement gering (abhängig von der Größe), aber Position der entfernten Lichtquelle oder vom Kollimationselement ist zu berücksichtigen

#### EdgeLit-System

- Komplexität hoch
- Ote-Ordnung an Kante des Lichtleiters, in der Regel nicht sichtbar und störend für einen Betrachter
- Wiedergabespektrum monochrom / polychrom
- Bauraumvolumen mittel (abhängig von Größe der Hologrammfläche)

#### Waveguide-System

- Komplexität sehr hoch
- Ote-Ordnung an Kante des Lichtleiters, in der Regel nicht sichtbar und störend für einen Betrachter
- Wiedergabespektrum monochrom / polychrom
- Bauraumvolumen gering bis mittel, Position einer entfernten Lichtquelle und Kollimationselement ist zu berücksichtigen

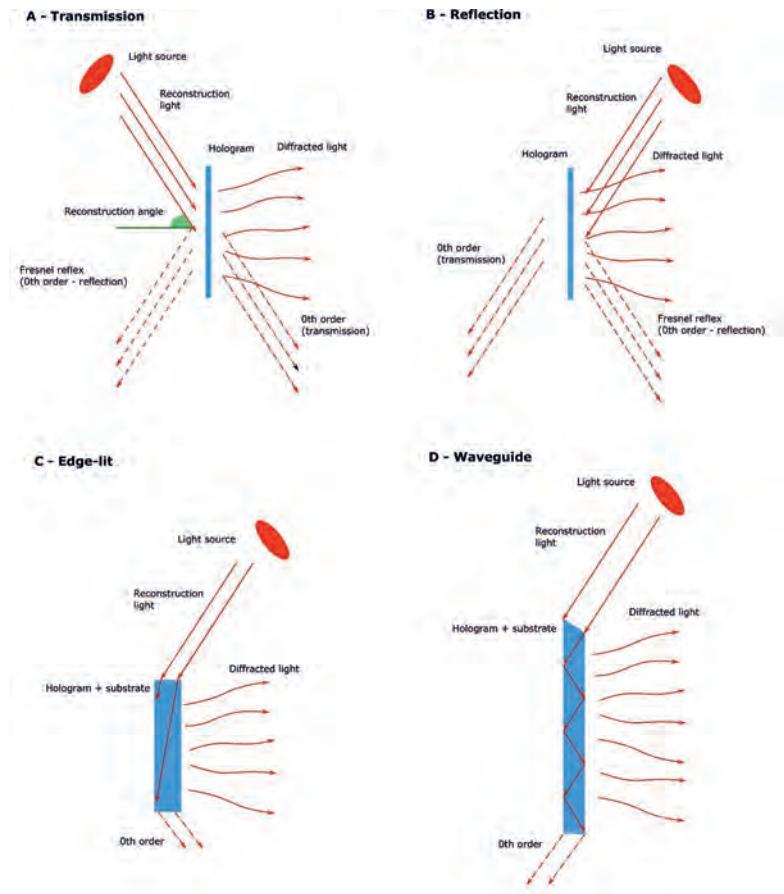


Bild 7: Wirk-Prinzipien von Holografie-Systemen

Die holografischen Systeme beinhaltet für ihre konkrete Gestaltung und Definition in einem Anwendungsfall immer die Frage ihrer Ausführung mit einer Punktlichtquelle (divergente Welle) oder einer kollimierten Welle (Planwelle).

Die Realisierung mit einer Punktlichtquelle ohne strahlformendes optisches System (Linsen oder Spiegel) ist sehr einfach und kann meist dort eingesetzt werden, wo nur wenig Platz zur Verfügung steht oder der Einsatz zusätzlicher optischer Elemente nicht möglich ist. Ein solches System besteht im Wesentlichen nur aus zwei Elementen - der Lichtquelle (LED) und

dem Hologramm selbst. In einigen Fällen kann ein zusätzlicher Planspiegel verwendet werden, um das Licht auf das Hologramm umzulenken. Diese einfache Realisierung hat viele Vorteile aber auch einige Nachteile. Da es keine optischen Elemente zwischen der LED und dem Hologramm gibt, ist nur eine begrenzte Freiheit zur Beeinflussung der Rekonstruktion vorhanden. Diese Grenzen werden z.B. aufgezeigt durch die Größe des LED-Chips, die Abstrahlcharakteristik der LED, die Position der LED, den Abstand/Winkel zwischen LED und Hologramm und die Größe des Hologramms.

Insbesondere der Abstand zwischen LED und Hologramm ist eine wichtige Größe. Einerseits soll ein System kompakt und effizient sein, weshalb der Abstand eher klein gewählt wird, andererseits soll die Rekonstruktion des Hologramms in allen Objekten und Tiefenebenen des 3D-Hologramms eine hohe Qualität besitzen und die Fresnel-Reflexe möglichst nicht zu große Unterschiede aufweisen, weshalb ein größerer Abstand sinnvoll ist, um das Winkelspektrum, mit dem das Hologramm rekonstruiert wird, zu verkleinern. Ob ein größerer Abstand in automotiv-Anwendungen realisiert werden kann, hängt jedoch von bauraum- und systemtechnischen Randbedingungen ab.

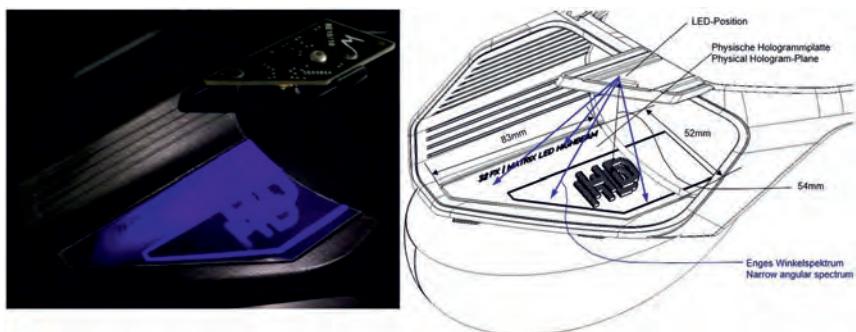


Bild 8: Beispiel und Beschreibung eines Holografie-Systems mit Punktlichtquelle

Die Verwendung einer kollimierten Welle ist für die Rekonstruktion eines Hologramms bezüglich der aufgezeigten Grenzen der beste Ansatz, da das Hologramm und auch die kollimierte Welle für alle Punkte des Hologramms etwa die gleichen Eigenschaften besitzen (z.B. Winkelspektrum, Rekonstruktionswinkel usw.).

Nachteil bei der Verwendung einer kollimierten Welle ist die Notwendigkeit eines optischen Systems zur Realisierung dieser Kollimation. Jedoch können die Eigenschaften jenes Systems (z.B. Restwinkelspektrum) auch zu einer Verschlechterung der Bildqualität führen. Es entsteht bei der Rekonstruktion für jede Winkelkomponente im Winkelspektrum ein neues Bild, welches

nicht perfekt mit dem gewünschten Originalbild überlappt, da das Licht unter einem anderen Winkel gebeugt wird. Das entstehende Gesamtbild erscheint verschmiert und unscharf. Je tiefer die Objektpunkte im 3D-Hologramm liegen, desto stärker ist dieser Effekt ausgeprägt. Eine Reduktion dieses Fehlerbildes kann durch eine höhere Selektivität des Hologramms erreicht werden, ist aber stark abhängig von verschiedenen Eigenschaften des für die Hologrammaufnahme verwendeten Materials.

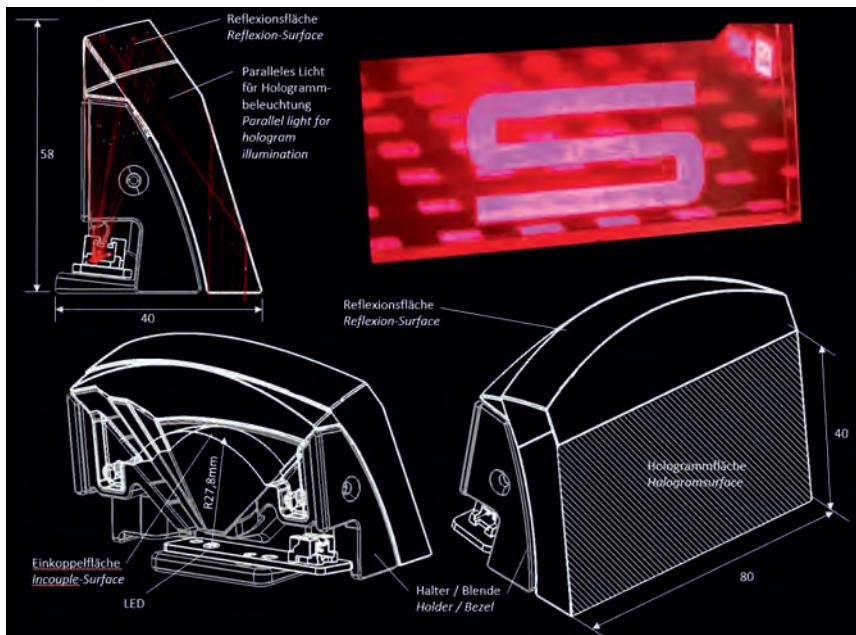


Bild 9: Beispiel und Beschreibung eines EdgeLit-Holografie-Systems mit kollimierter Welle

Ein weiterer Nachteil bei Systemen mit kollimierten Wellen kann die geringere Gesamteffizienz des Systems sein, da ein großer Teil des Lichts entfernt werden muss. Dies kann notwendig sein aufgrund der Anforderungen an die Kollimation (Winkelspektrum) oder aufgrund der Homogenität der Rekonstruktionswelle. Im obigen Beispiel ist dies gegeben durch die kugelförmige Lichteintrittsfläche des Lichtleiters mit ihrem Abstand von 27,8mm zur LED-Lichtquelle.

#### 4. Entwicklung, Mastering, Replikation und Integration – Die Prozesskette

Holografie ist eine komplexe Technologie.

Die Komplexität der Technologie und deren Umsetzung in Produkte fordert die Zusammenarbeit von unterschiedlichen Experten und Partnern für eine erfolgreiche technische Umsetzung und Automotive-Industrialisierung. Dies startet bei der Entwicklung und Produktion der holografischen Folie (Covestro AG), setzt sich fort in der Hologrammentwicklung und dem Mastering (Carl ZEISS Jena AG), sowie der Replikation der Masterhologramme und der Hologrammintegration in das vorgesehene Bauteil (DOCTER OPTICS), entwicklungs- und projektseitig begleitet und unterstützt durch HELLA bezüglich der Entwicklung holografischer Konzepte und Systeme und Tests zur Serienabsicherung. Auch Wettbewerber von HELLA können die Technologie mittels dieser Prozesskette und direkten Zugriff auf DOCTER OPTICS für Projekte nutzen. DOCTER OPTICS und ZEISS kooperieren eigenständig für den Automotive-Markt, unter Nutzung des von HELLA eingebrachten Knowhows.

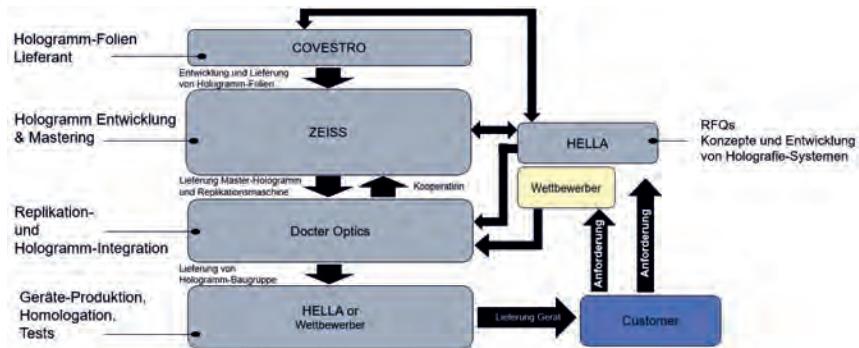


Bild 10: Prozesskette

Über Covestro wird ZEISS ein photosensitives Material zur Funktionalisierung zur Verfügung gestellt. Dieses Material findet sowohl in der Hologrammentwicklung zur Masterherstellung, als auch später zur industriellen Vervielfältigung der Hologramme in der Replikation Anwendung. Individuell auf jedes Projekt bezogen erarbeitet ZEISS zusammen mit HELLA ein für den Kunden angepasstes Konzept, um dessen Anforderungen holografisch umzusetzen. Nach Einigung mit dem Kunden auf ein Designkonzept und einer potentielle Umsetzung erfolgt bei ZEISS die Herstellung eines Masterhologrammes, welches abhängig vom ausgewählten Optikkonzept unterschiedliche Komplexität aufweist. Dabei werden gezielt Wellenlängen, Belichtungszeiten und Belichtungsaufbauten ausgelegt, um das bestmögliche Ergebnis zu erlangen. In einem iterativen Verfahren wird so bis hin zum finalen Hologramm das System

optimiert. Im Anschluss daran erfolgt die Überführung der Masterhologramme in die Replikationsanlage, welche in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren und einem speziell ausgelegten Optik-Setup die Vervielfältigung der vorab einzeln gefertigten Hologramme ermöglicht.



Bild 11: Erste ZEISS-Replikationsanlage zur Replikation von Volumenhologrammen

## 5. Prototypen, Use-Cases, Beispiele

Wofür und wie kann Holografie zum Einsatz kommen? Holografie ist ein universelles „Werkzeug“ zur Realisierung unterschiedlicher Funktionen und Erscheinungsbilder. Diese Vielfältigkeit stößt in der Umsetzung dann an die konkreten Rahmenbedingungen der gewünschten Anwendung und führt zur angepassten finalen Entwicklung des holografischen Konzepts.

Die Einsatzmöglichkeiten holografischer Systeme sind für den mit der Thematik erstmals konfrontierten Entwickler oder Stylisten ohne Erfahrung nicht vollständig überschaubar. Beispiele in Form von Entwicklungsmuster und Prototypen, die einzelne Funktionen und Anwendungen veranschaulichen und begreifbar machen, aber gleichzeitig nur die Basis bilden, von der Varianten und andere Applikationen abgeleitet werden können, stellen eine wichtige und entscheidende Grundlage dar zum Verständnis dessen, was Holografie leisten und wofür Holografie genutzt werden kann.

Die Use-Cases sind entsprechend vielfältig:

- Welcome-Goodbye-Hologramm
- Informationshologramm (Technik, Warnungen, Sicherheit)
- Holografisches Logo (Exterior, Interior)
- Einstiegs-/Ausstiegs-Hologramm
- Grafisches Add-On-Hologramm zu Signalfunktionen im Scheinwerfer
- Grafisches Add-On-Hologramm zu Signalfunktionen in der Heckleuchte
- Holografische Lichtprojektion
- Holografisches Display
- Funktionale Hologramme (mit Erfüllung einer Signalfunktion)
- Holografisches Scheinwerfermodul (Forschungsgegenstand LLAB)

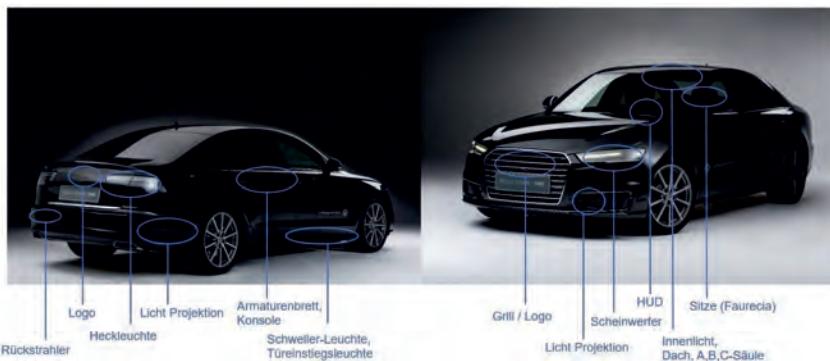


Bild 12: Mögliche Einsatzmöglichkeiten von Holografie in einem Fahrzeug

Ein Use-Case ist die Nutzung einer holografischen Funktion als Informationsdarstellung oder Welcome-Goodbye-Funktion. Diese kann an unterschiedlichen Positionen am Fahrzeug vorgesehen sein, vorteilhaft integriert in eine Heckleuchte oder einen Scheinwerfer. Ein Prototyp eines Scheinwerfers nutzt hierfür eine Fläche im Abdeckrahmen vor dem Fernlicht-Modul. Das Hologramm ist als Reflexionshologramm realisiert und integriert auf einem schwarzen Bauteil. Unbeleuchtet ergibt sich somit ein schwarzes Erscheinungsbild, beleuchtet zeigt sich ein 3D-Hologramm mit unterschiedlichen Objekten.



Bild 13: Scheinwerfer mit Informations-Hologramm (Welcome- / Goodbye-Funktion)

Das Hologramm ist als einfaches Reflexionshologramm für eine unkollimierte LED-Lichtquelle ausgeführt. Die LED ist oberhalb der Hologrammfläche im Abdeckrahmen positioniert. Es wird eine qualitativ hochwertige Rekonstruktion des Hologramms erzeugt, jedoch mit teilweise, abhängig vom Betrachtungswinkel, sichtbaren direktem Oberflächenreflex der LED. Dies ist in einer Serienumsetzung durch eine geeignete Wahl der LED-Position zur Hologrammfläche zu optimieren.



Bild 14: Hologramm, 3D-Objekte „HD“ mit virtueller Glasscheibe und Seiten-Text

Ein Hersteller-Logo oder eine spezielle Fahrzeug-Bezeichnung können als Hologramm gestaltet ebenfalls ein besonderes Herausstellungsmerkmal sein. Am Beispiel des Schriftzugs PORSCHE, den der Hersteller immer als Schriftzug auf der Heckleuchte führt, ist ein Prototyp für eine holografische Funktion entwickelt und gebaut.



Bild 15: Heckleuchte mit PORSCHE-Schriftzug als Hologramm

Das Hologramm, als EdgeLit-Hologramm realisiert und ausgeführt in sieben geometrisch identischen Hologrammodulen, zeigt den jeweiligen Buchstaben, sowie ein Hintergrundmuster durchbrochener Linien für eine Dreidimensionalität.

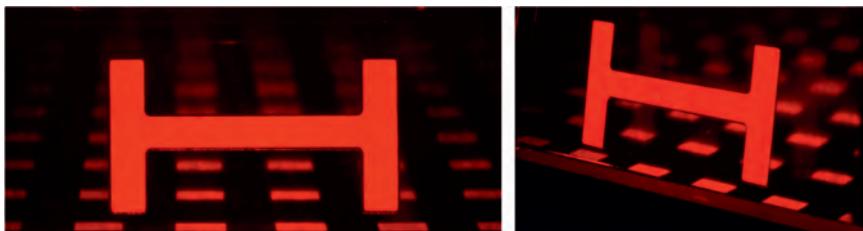


Bild 16: Detail PORSCHE-Schriftzug-Hologramm (Ansicht frontal und von rechter Seite)

Mit Einblick von der linken Seite in das Hologramm wird ein seitlich platziertes Schriftzug HGX, gefolgt von einer Nummer, sichtbar, der in der Rückansicht nicht zu sehen ist.



Bild 17: Detail PORSCHE-Schriftzug-Hologramm (Ansicht von linker Seite)

Der Buchstabe des PORSCHE-Schriftzugs ist „inplane“, also in der Hologrammebene platziert und verändert somit nicht seine Lage in unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen. Das Hintergrundmuster verschiebt sich dagegen und bewirkt damit einen guten 3D-Eindruck.

Hologramme können die Gestaltung einer Funktion durch ihre Positionierung unterstützen. Sind zwei Hologramme, als Baugruppe, winklig zueinander angeordnet, so sind beispielsweise die holografischen Bilder beider Hologramme in der Rückansicht zu sehen; aus seitlichen Betrachtungsrichtungen ist dann jedoch nur das dem Beobachter zugewandte Hologramm sichtbar. Dies Prinzip ist für einen Prototypen einer Motorrad-Heckleuchte verwendet. Vorteilhaft ist dadurch eine Sichtbarkeit des Hologramms im 90°-Bereich von Rückansicht bis in die Seitenansicht gegeben.



Bild 18: Motorrad-Hologramm-Heckleuchte (Rückansicht, links, und seitliche Ansicht)

Auch hier ist das oben beschriebene Prinzip der Hologrammgestaltung mit dreidimensionalen Objekten im Vordergrund und einem Hintergrundmuster verwendet, um einen 3D-Effekt zu generieren.

Mehrfach-Hologramme können auch mit identischer Grafik für eine gewünschte 3D-Erscheinung verwendet sein, beispielsweise nebeneinander angeordnet, um eine größere Fläche zu nutzen. Die bisher gezeigten Hologramme nutzen eine planare Fläche, dies mag in vielen Konzepten auch umsetzbar sein, jedoch sind planare Flächen in Scheinwerfern oder Leuchten in der Regel nicht vorhanden oder schwierig zu integrieren. Da jedoch das Mastering und die Replikation der Hologramme in der Ebene stattfindet, ist eine darauffolgende Integration der Hologramme auf einer gekrümmten Fläche eine Herausforderung, die es zu meistern gilt.



Bild 19: Dreifach-Hologramm-Anordnung auf einer gekrümmten Fläche

Abbildung 19 zeigt einen Prototypen mit drei Hologrammen auf einer gekrümmten Fläche. Die Reflexionshologramme sind jeweils von einer darüber positionierten LED beleuchtet. Leuchtende, dreidimensional angeordnete Leuchtpläne, getrennt durch schwarze Linien, sind mit einem Linien-Hintergrundmuster und seitlichen Elementen ergänzt.

Neben Anwendungen im Automotive-Bereich ergeben sich auch viele andere Einsatzmöglichkeiten der Volumenholografie zum Beispiel in den Bereichen Consumer und Hometec. So besteht durch die Integration von Volumenhologrammen in transparente Medien auch die Möglichkeit Glasscheiben in u.a. Elektrogeräten, Haustüren oder Fenstern zu funktionalisieren. Im Rahmen der Funktionalisierung ist dabei neben anzeigenenden Systemen auch ein System zur Bilderfassung umsetzbar, welches als transparente Kamera ebenfalls direkt in die Scheibe integriert werden kann. Eine Anwendung dieser Technologie in Kombination mit einer holografischen Anzeige zeigt der Demonstrator einer Zugangskontrolle der ZEISS Microoptics. Hierbei wird mittels Gesichtserkennung und keyless-go (doppelte Authentifikation) die Berechtigung eines Zugangs abgefragt, worauf folgend über die holografische Anzeige dem Nutzer das entsprechende Feedback gegeben wird und die Tür durch Anbindung an das Schließsystem automatisch entriegelt werden kann.

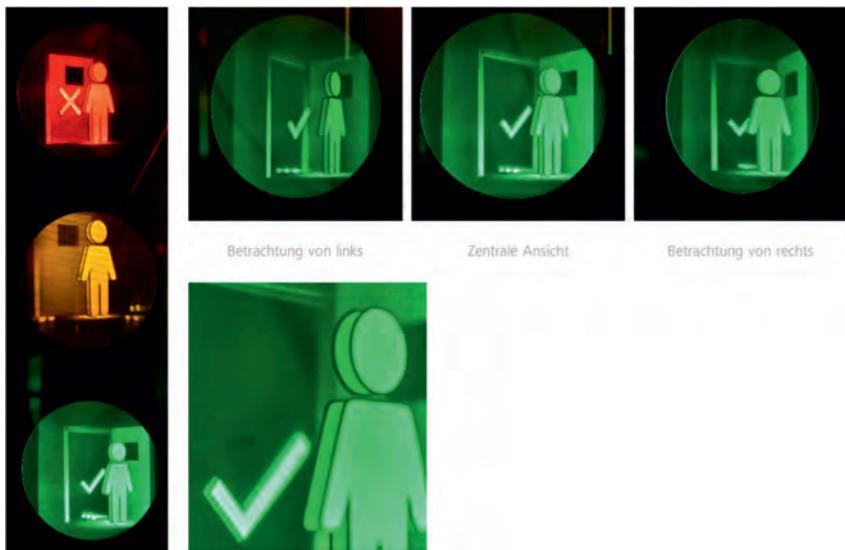


Bild 20: Demonstrator Holografische Zugangskontrolle (ZEISS Microoptics)

## 6. Ausblick

Die Anpassung holografischer Systeme für automobile Anwendungen mit ihren speziellen Anforderungen für das holografische Material und für die Ausführung der holografischen Systeme, sowie die Zusammenarbeit der Covestro AG, der Carl ZEISS Jena GmbH, der HELLA GmbH & Co. KGaA und der DOCTER OPTICS GmbH für die Entwicklung der Hologramme und die Serienfertigung in größeren Stückzahlen, eröffnet die Möglichkeit jederzeit eine Serienentwicklung mit einer holografischen Funktion, bzw. einem holografischen Effekt zu starten.

Hierbei können und werden ganz neue Ideen für Lichtfunktionen oder Lichteffekte entstehen, die mittels Hologramm umgesetzt werden können.

Insbesondere im Fahrzeuginnenraum bieten sich vielfältige Möglichkeiten zur Nutzung von Hologrammen für einen besonderen Wow-Effekt oder einen speziellem Erscheinungsbild für ein Einstiegs- und Ausstiegsszenario (Welcome-Goodbye-Funktion). Zwei Konzepte sind nachfolgend in Renderings dargestellt.



Bild 21: Sitzblende mit holografischen Logo

In Sitzen, beispielsweise von Sportfahrzeugen oder besonderen Baureihen, gibt es im Nackenbereich des Insassen oft eine eingesetzte Blende. Im einfachsten Fall zeigt diese das Herstellerlogo, in einigen Varianten ist dieses auch hinterleuchtet. Einen Wow-Effekt durch eine besondere Tiefenwirkung und Dreidimensionalität kann jedoch mit einem Hologramm erreicht sein.

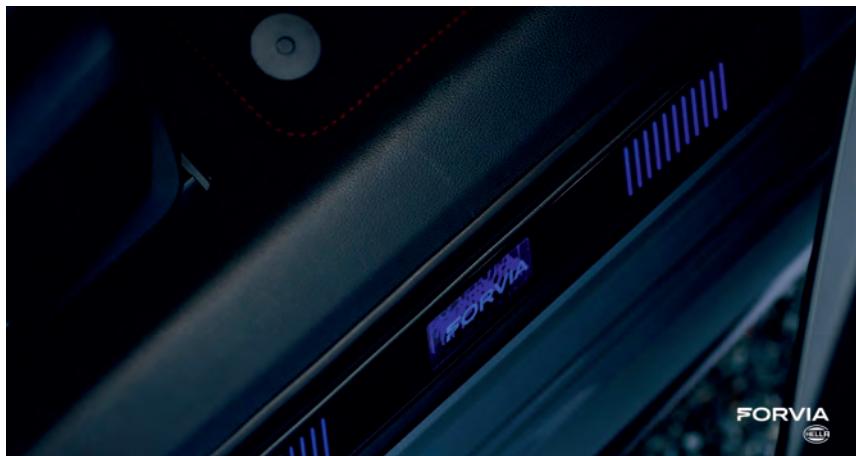


Bild 22: Türeinstiegsleiste mit holografischen Logo

Öffnet man die Tür seines Fahrzeugs, fällt der Blick meistens auch auf die Türeinstiegsleiste oder Schwellerleiste. Oft ist dies nur eine einfache dekorative Schutzabdeckung, bei höherwertigen Fahrzeugen kann auch eine Bedruckung mit dem Herstellerlogo oder eine hinterleuchtete Türeinstiegsleiste vorhanden sein. Trotz oft sehr begrenzter Einbausituationen, sind auch hierfür Konzepte mit holografischen System für eine besondere Gestaltung mit dreidimensionaler Wirkung möglich.

Mit den gezeigten Informationen und Prototypen ist das Ende der Entwicklung holografischer Systeme jedoch noch lange nicht erreicht. Dynamische Hologramme, also Hologramme deren Grafik sich mit der Betrachtungsrichtung ändert, oder mehrfarbige Hologramme, sei es mit einem Umschalten von einer Farbe zu einer anderen Farbe oder mit einem mehrfarbigen Bild, bis hin zur Realisierung weißer Hologramme, bieten noch genügend Entwicklungspotential. Zusätzlich können und werden Hologramme auch als optische, funktionale Hologramme zum Einsatz kommen. Für die automobile Lichttechnik bedeutet das, dass Hologramme auch genutzt werden können, um die Lichtintensität der Signalfunktion direkt zu erfüllen und/oder eine gewünschte Lichtverteilung zu liefern.

Hologramme sind ein Instrument, welches vielfältig eingesetzt werden kann und sich anbietet, wenn besondere Effekte, Individualisierungen oder einfach eine neue Umsetzung einer

Lichtfunktion gewünscht sind. Auch durch die Integration der Systeme in transparente Medien eröffnet die Holografie Möglichkeiten, die konventionelle Systeme nicht bieten können.

- [1] Advanced Optical Technologies, 2016, Signal Lights – Designed light for rear lamps and new upcoming technologies: Innovations in automotive lighting
- [2] ISAL, 2017, New technologies shift 3D-Lighting onto a higher level
- [3] ISAL, 2019, Challenges of the illumination of holograms with narrow-band LED in automotive applications

# Die Mobilität der Zukunft – Spielwiese für gesundheitsfördernde Lichtfunktionen beim autonomen Fahren?

**Bayram Balkan, Sven Bogdanow,**

IAV GmbH, Gifhorn;

**Benedikt Kleinert,**

Hochschule Magdeburg-Stendal

## Abstract

Future mobility will lead to a change of the driver's role. This offers the possibility to think about new interior concepts.

The following contribution will show future mobility concepts as well as available solutions in market. Additionally, questions will be asked, the automotive industry is confronted with. First, a study, conducted at IAV, will be presented. It shows blue light inside a car will raise the driver's awareness during a night drive. Furthermore, a concept of a passenger centered lighting function combined with a driver monitoring system will be introduced as well as some use cases. Lastly, a concept for virtual verification will be mentioned.

To sum up, the contribution gives an outlook on interior lighting of autonomous vehicles in 2050, focused on lighting and its effect.

## Kurzfassung

Die Mobilität der Zukunft wird zu einem Wandel der Rolle des Insassen führen. Dies bietet die Möglichkeit, den Innenraum und dessen Nutzung neu zu denken.

Im folgenden Beitrag werden zukünftige Mobilitätskonzepte und verfügbare Serienlösungen angeführt. Zudem wird auf unterschiedliche Fragen eingegangen, mit denen die Automobilindustrie konfrontiert ist. Einleitend wird eine von IAV durchgeführte Studie aufgegriffen. Diese zeigt, dass die Aufmerksamkeit des Insassen bei Nacht durch den gezielten Einsatz blauen Lichts im Kontext „Automobil“ gesteigert wird. Des Weiteren wird ein Konzept vorgestellt, wie insassenzentrierte Lichtfunktionen in Verbindung mit heute verfügbaren Monitoring Systemen aussehen könnten und welche Anwendungsfälle dankbar wären. Abschließend wird die Fragestellung beleuchtet, wie solche Systeme virtuell abgesichert werden können.

Zusammenfassend liefert der Beitrag einen Ausblick auf die Innenbeleuchtung autonom fahrender Transportmittel der Mobilität 2050. Licht und dessen Wirkung stehen dabei im Mittelpunkt.

## Einleitung

Die Mobilität der Zukunft wird zu einem Wandel des Transportmittels führen. Ein mögliches Lösungskonzept hat IAV auf der ITS in Hamburg 2021 mit dem autonom fahrenden Shuttle „HEAT“ gezeigt. Mit Blick auf die künftigen SAE-Level 3 und 4 und insbesondere Level 5 des autonomen Fahrens wird sich die Rolle des Insassen enorm wandeln. Das eröffnet die Möglichkeit, den Innenraum des Automobils und dessen Nutzung neu zu denken. Diese Möglichkeit, sowie ein erstes Konzept und Anwendungsfälle werden im folgenden Beitrag näher beleuchtet. Abschließend wird auf die virtuelle Absicherung solcher Konzepte eingegangen.

### 1 Mobilität der Zukunft – Quo vadis?

Wie wird die Mobilität der Zukunft aussehen? Welche Verkehrswägen werden wir nutzen und werden wir diese kombinieren, um energie- und zeiteffizient von A nach B zu kommen? Wichtige Fragen, mit der die Automobilindustrie konfrontiert ist.

Das autonome Fahren wird umstritten dazu führen, dass sich die Rolle des Fahrers ändert. Die eigentliche Fahraufgabe wird mehr und mehr vom Fahrzeug selbst übernommen. Je nach Grad der Automatisierung (SAE-Level) wird es dennoch erforderlich sein, den Fahrer auf Gefahrensituation hinzuweisen und ihm die Fahraufgabe zurückzugeben. Welche Systeme sind dafür erforderlich und wie ist der Innenraum zu gestalten? Welche Anforderungen gilt es zu erfüllen?

Die Überwachung des Innenraums sowie die Zustandserkennung der Insassen, insbesondere des Fahrers, werden dabei besonders wichtig. Driver-Monitoring-Systeme (DMS) sind zur Realisierung unumgänglich. Welche Anforderungen muss diese Mensch-Maschine-Schnittstelle allerdings erfüllen und wie lassen sie sich realisieren? Eine Schnittstelle, die besonderes Potential bietet, um weitere Funktionen in die Mobilität der Zukunft zu integrieren.

Die Gestaltung des Innenraums muss ebenfalls neu gedacht werden. Durch die geänderte Rolle der Insassen werden neue Anwendungsfälle entstehen. Welche sind denkbar?

Der Wirkung des Lichts (visuell und nicht-visuell) wird dabei ein besonderer Stellenwert beigemessen, um auf das Wohlbefinden der Menschen einzuwirken. Inwiefern lässt sich Licht gezielt im Kontext Automobil einsetzen? Welche gesundheitsfördernden Lichtfunktionen sind in Kombination mit der Neugestaltung des Innenraums und DMS denkbar?

Alle zuvor aufgeführten Fragestellungen bieten Ansatzpunkte, um das Automobil neu zu denken und es als Art „Spielwiese“ für künftige Funktionen zu sehen. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Bereiche näher beleuchtet.

## 2 Bisherige Forschungsergebnisse

Die nachfolgende Recherche gibt einen groben Überblick über Studien verschiedener Bereiche, die den Einfluss von Licht, z.B. auf den circadianen Rhythmus des Menschen und die Ausschüttung des Melatonin-Anteils untersucht. Abschließend wird auf aktuelle Studien aus dem Bereich Automotive eingegangen.

In der Studie von Lockely, et al [1] wurde der Einfluss von monochromatisch blauem und grünem Licht während einer Nachschicht untersucht, wo gezeigt werden konnte, dass das Licht die Reaktionsfähigkeit der Probanden steigerte und gleichzeitig die subjektive Müdigkeit reduzierte. Des Weiteren stellte Dawson, et al [2] in einer Studie eine gesteigerte Leistungsfähigkeit von Krankenschwestern während einer Nachschicht bei hellerer Umgebungshelligkeit fest. Lowden, et al [3] untersuchte den Einfluss einer 20-minütigen Beleuchtungsdauer auf die subjektive Müdigkeit von Krankenschwestern, wo ebenfalls die subjektiv wahrgenommene Müdigkeit in der Nacht reduziert werden konnte. K. Tanaka, et al, [4], Lowden, et al, [5] und Chellappa, et al, [6] kommen in weiteren Studien zu demselben Ergebnis.

Taillard, et al [7] untersuchte in seiner Studie den Einfluss des Lichts im Fahrzeuginneren auf die Fahrleistung und zeigte, dass das Licht das Spurhalteverhalten positiv während der Nacht verbesserte. Auch Schüler, et al [9][10] untersuchte die melanopische Wirkung des Lichts auf die Fahrzeuginsassen.

In der Studie von Jomaa [8] wurde in einem Fahrsimulator der Einfluss von monochromatisch blauem Licht auf die Aufmerksamkeit untersucht. Er kommt ebenfalls zu dem Schluss, dass das Licht einen positiven Einfluss auf die empfundene Müdigkeit hat und belegt dies u.a. mit einigen Zitaten der Probanden. Jedoch konnte innerhalb dieser Studie keine Verbesserung des Reaktionsvermögens des Fahrers nachgewiesen werden.

Niedling, et. al [11] untersuchte in einer weiteren Studie nicht-visuelle Effekte einer zusätzlichen Lichtquelle, die im Fahrzeug oberhalb der Sonnenblende verbaut ist. Er zeigt, dass bis zu einer bestimmten Beleuchtungsstärke die zusätzliche Lichtquelle eingesetzt werden kann, ohne den Fahrer während einer Nachtfahrt abzulenken oder zu blenden und gleichzeitig die Aufmerksamkeit zu erhöhen.

## 3 Verfügbare Serienlösungen

Bereits heute sind verschiedene Systeme zur Überwachung des Fahrers auf dem Markt. Dieses Kapitel soll einen kleinen Auszug der aktuell verfügbaren Serienlösungen und Konzepte geben.

2010 führte Volkswagen die Funktion Müdigkeitserkennung erstmals im Passat ein [12], welches das Lenkverhalten des Fahrers permanent analysiert und bei Abweichungen zu Beginn

der Fahrt den Fahrer optisch und akustisch warnt [13]. Nach und nach haben diese kleinen Assistenzsysteme bei verschiedenen Automobilherstellern Einzug gefunden. Mittlerweile setzen diese auch kamerabasierte Fahrerzustandsüberwacher ein. Der DS 7 CROSSBACK beispielsweise überwacht neben der Fahrspur den Fahrer mit Hilfe einer Fahrerbeobachtungskamera und warnt bei Anzeichen von Müdigkeit und Ablenkung [14].

Die enorme Bedeutung von DMS unterstreicht Mercedes-Benz in einem kürzlich veröffentlichten Kurzfilm „Awake“ in Zusammenarbeit mit der Hochschule Fernsehen und Film München. Hier wird die Gefahr des Sekundenschlafs am Beispiel des Fahrassistentenzsystems „Microsleep Detection“ im EQS gezeigt und veranschaulicht, „*wie innovative Fahrassistentenzsysteme und Sicherheitsfeatures einen wertvollen Beitrag für die Vision vom unfallfreien Fahren leisten können*“ [15].

Neben Überwachungssystemen wird bereits heute viel Wert auf den Innenraum eines Fahrzeugs gelegt, die mit vielen Ausstattungsmöglichkeiten vor allem den Komfort steigern. So fördert Mercedes-Benz in seiner neuen S-Klasse mit seiner aktiven Ambientebeleuchtung und Klimaanlage den Wellness-Faktor während der Fahrt, um ein „*entspannendes oder vitalisierendes Reisen*“ zu unterstützen [16].

Auch AUDI stellt den Innenraum in seiner neuesten Konzeptstudie *urbansphere* in den Mittelpunkt. Als „*ein vielseitiger High-Class-Erlebnisraum mit persönlichem Komfortbereich für jede Person*“ soll dieses Konzeptfahrzeug zukünftig neben der eigenen Wohnung und dem Arbeitsplatz einen dritten Lebensraum bieten, während es die Insassen hochautomatisiert chauffiert [17].

Neben einer Stress-Erkennung auf Basis eines Gesichtsscans und einer Stimmanalyse, wo- rauhfhin individuell eine Entspannung vorgeschlagen wird, kann im Innenraum das Cockpit sowie weitere Informationen oder Entertainmentfunktionen auf die innere Holzverkleidung und außerhalb des Fahrzeugs ein roter Leuchtteppich zum Ein- bzw. Aussteigen projiziert werden [17][18].



Bild 1: Roter Leuchtteppich vom AUDI urbansquare [18]

#### 4 Konzept

Das autonome Fahren ist kein Novum. Bereits im Jahr 2014 wurde die SAE Norm J3016 zur Klassifizierung und Definition der SAE Level des autonomen Fahrens herausgegeben [19]. Seitdem gibt es aufgrund der rasanten Entwicklung regelmäßige Ergänzungen. Neben der SAE Norm ist zudem die UN ECE R157 zu berücksichtigen [20]. Im Dezember 2021 erreichte Mercedes-Benz einen wesentlichen Meilenstein mit der Freigabe ihres Level-3-Systems Drive Pilot gemäß UN ECE R157 [21]. Unabhängig davon ist auf das Angebot von Waymo zu verweisen, wo selbstfahrende Fahrzeuge als Serviceleistung zu kaufen bzw. mieten sind, wie beispielsweise als Taxi für den Personentransport [22]. Die genannten Beispiele zeigen, dass dem autonomen Fahrzeug ein besonderes Potential beigemessen wird, aber warum? Es vereint drei wesentliche Vorteile: Erhöhte Sicherheit, Effizienz und Mobilität. Diese werden nachfolgend näher betrachtet.

##### **Sicherheit**

Laut GIDAS-Datenbank (GIDAS = German in Depth Accident Study) sind mehr als 90% der Unfallursachen im Straßenverkehr auf menschliches Versagen zurückzuführen [23]. Ein autonomes Auto kann rund um die Uhr zuverlässig und ohne Ablenkung den Verkehr beobachten und sicher fahren. Laut Tesla wurden im vierten Quartal 2021 ein Unfall pro 4.310.000 Meilen mit aktivierten Autopilotfunktionen aufgezeichnet. Im Vergleich dazu gab es in den USA nach

der US-Behörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit NHTSA einen Autounfall pro 484.000 Meilen [24].

### ***Effizienz***

Staus sind kräftezehrend. Der Navigationshersteller TomTom analysiert jährlich die Geschwindigkeiten der Nutzer:innen und ermittelte für 2018 folgende Zahlen: in Hamburg ist die Fahrtzeit ungefähr 33% höher als die optimale Fahrtzeit, in Berlin 31% und in Nürnberg 30% [25]. Eine Vielzahl an Staus sind sogenannte Phantomstaus. Die Ursache liegt im individuellen Fahrstil der Autofahrer im dichten Verkehr. Durch das immer stärkere Abbremsen der nachfolgenden Verkehrsteilnehmer entsteht eine Stauwelle, die bis zum Stillstand führen kann. Die Kommunikation unter autonomen Fahrzeugen ermöglicht eine Optimierung des Verkehrsflusses. Da kein Fahrer mehr nötig ist, eröffnen sich neue Designmöglichkeiten des Innenraums. Die Bedürfnisse der Passagiere rücken in den Fokus. Das Ziel ist eine individuelle Nutzung des Innenraums während der Fahrzeit.

### ***Mobilität***

Kostengünstige, autonome Taxis können Orte bedienen, die durch öffentliche Verkehrsmittel, wie Bus und Bahn, spärlich befahren werden. Durch neue Innenraumkonzepte können auch körperlich behinderte Menschen berücksichtigt werden, die bis jetzt auf spezielle Transporter angewiesen sind.

Die zuvor aufgezählten Vorteile des autonomen Fahrens zeigen das enorme Potential und den Markt für die Mobilität der Zukunft und die Neugestaltung des Innenraums. Der ADAC sieht die Verbreitung dieser Technologien erst in den 2030er Jahren und das voll autonome Reisen von Tür zu Tür erst nach 2040 [26]. Die folgenden Überlegungen zielen daher auf einen Einsatz ab dem Jahr 2050. Das Konzept unterteilt sich in die Bereiche Mobilität, Monitoring, Innenraum und Lichtfunktionen.

#### **4.1 Mobilität**

Das Mobilitätskonzept resultiert aus einer Brainstroming-Phase. Im ersten Schritt wurden Verkehrswege ermittelt. Für die Mobilität der Zukunft werden der Straßen-, Schienen- und Luftverkehr als relevant erachtet.

Im nächsten Schritt wurden den einzelnen Verkehrswegen Mobilitätslösungen zugeordnet. Als Vertreter des Straßenverkehrs sind Auto und Bus zu nennen. Vertreter des Luftverkehrs sind die Drohne und das Lufttaxi. Dem Schienenverkehr wurden die Bahn und der Hyperloop zugeordnet.

Die einzelnen Verkehrsmittel wurden anschließend stufenweise anhand objektiver Kriterien verglichen. Nicht zielführende Mobilitätskonzepte wurden aussortiert. Gegen Bus und Bahn sprechen beispielsweise die festen Zeiten sowie die gebundene Infrastruktur. Die Reisezeit verdoppelt sich oftmals oder verdreifacht sich im schlechtesten Fall im Vergleich zum Fahrzeug. Zudem müsste ein massiver Ausbau des Nahverkehrs erfolgen oder alternativ die Kosten beim Parken um 50% erhöht werden, um den ÖPNV attraktiver zu gestalten [27]. Unabhängig davon resultiert aus einer Umfrage der PricewaterhouseCoopers GmbH, dass 53% der Befragten aufgrund der Corona-Pandemie weniger oder gar nicht Bus und Bahn nutzen [27]. Das Lufttaxi wurde ausgeschlossen, da es der Drohne ähnelt und der Hyperloop, da dessen Entwicklung am Anfang steht und eine teure Infrastruktur, in Form von Tunnelsystemen, erforderlich ist.

Die übrigen Mobilitätslösungen Auto und Drohne wurden anhand einer Pro- und Contra-Liste gegenübergestellt. Tabelle 1 zeigt die ermittelten Vor- und Nachteile. Am meisten Sinn macht es, die Vorteile beider Lösungen zu kombinieren, um deren Nachteile gleichzeitig zu reduzieren.

Tabelle 1: Pro (+) und Contra (-) Liste der beiden Mobilitätslösungen Drohne und Auto

Mobilitätslösung	Drohne	Auto
Pro (+) und Contra (-)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Futuristisch (+)</li> <li>- Kurze Wege (Luftlinie) (+)</li> <li>- Rein autonom (+)</li> <li>- Teuer (-)</li> <li>- Neue Infrastruktur erforderlich (-)</li> <li>- Symbol für Luxus (-)</li> <li>- Flugangst (-)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etabliert (+)</li> <li>- Vorgegebenes Straßennetz (-)</li> <li>- Mischverkehr (-)</li> <li>- Erschwinglich (+)</li> <li>- Vorhandene Infrastruktur (+)</li> <li>- Symbol der Individualität (+)</li> <li>- Sicherheitsgefühl (+)</li> </ul>

Das Ergebnis ist die, in Bild 2 dargestellte, transportable Reisekapsel. Die Form der Kabine soll den Passagieren ausreichend Platz im Innenraum bieten. Zudem sind Kabine und Gestell symmetrisch geformt, da es beim autonomen Fahren nicht erforderlich ist, Vorder- und Rückseite zu unterscheiden. Die x-förmigen Seitenwände stellen eine optische Trennung dar. Die

Panorammascheiben sollen eine bessere Sicht bieten und eine Vergrößerung des Innenraums bewirken.



Bild 2: Konzept der transportablen Reisekapsel, die über verschiedene Verkehrswägen (Luft, Straße, Wasser, Schiene) transportiert werden kann.

#### 4.2 Monitoring

Als zweiter Schritt der Konzeptphase wurde mit Hilfe einer Kreativitätsmethode das Konzept des Monitoring-Systems entwickelt. Bild 3 zeigt die zu detektierenden Zustände. Das Konzept besteht aus den vier Kategorien Health, Safety, Wellbeing und Interaction und berücksichtigt damit die ermittelten Bereiche des Mobilitätskonzepts der Zukunft (siehe Kapitel 4). Durch die Interaktion zwischen den einzelnen Bereichen ist eine getrennte Betrachtung nur bedingt möglich (siehe Bild 3). Beispielhaft sei die Detektion eines Schlaganfalls genannt, die neben der Health-Funktion gleichzeitig eine Safety-Funktion darstellt. Die grundsätzliche Zustandsdetektion ist, ähnlich wie in bereits verfügbaren Systemen (siehe Kapitel 3), über einen Regelkreis unter Einsatz eines Kamerasystems geplant. Weitere Details werden im Rahmen des Beitrags nicht aufgegriffen.

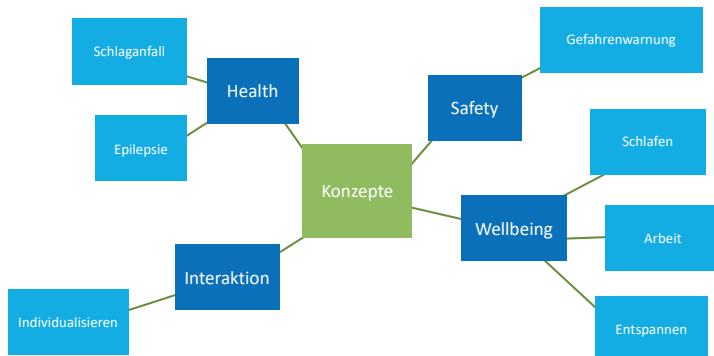


Bild 3: Konzept des Monitoring-Systems mit zu detektierenden Zuständen

#### 4.3 Innenraum

Das Innenraum-Konzept basiert auf der in Bild 2 gezeigten Reisekapsel und greift die in Bild 3 dargestellten, zu detektierenden Zustände auf. Folgende Aspekte stehen dabei im Fokus:

- Gesundheit
- Sicherheit
- Individualisierbarkeit / Interaktion
- Monitoring
- Wohlbefinden

Bild 4 zeigt das Innenraum-Konzept mit einzelnen Details. Ein hervorzuhebendes Detail des Konzeptes sind die Sitze. Diese sind an das Konzept „Coquille“ von IAV angelehnt und bieten unabhängig von der Sitz- oder Liegeposition ein sicheres Reisen [28].

Um sowohl dem Aspekt Sicherheit als auch Gesundheit Rechnung zu tragen, sind Luftfilter vorgesehen. Diese sorgen für ein entsprechendes Raumklima und tragen zur Eindämmung von Pandemien bei.

Zur Individualisierbarkeit kommen flexible Trennwände zum Einsatz. Die Trennwände schaffen in der Kabine separate Bereiche. Gleichzeitig können sie als interaktive Displays genutzt werden oder einen großen Gemeinschaftsraum schaffen. Die Sitze sind zudem drehbar, wodurch die Reisekapsel in einen Konferenzmodus versetzt werden kann, bei dem alle Insassen zueinander zugewandt zusammensitzen können.

Die Zustandserkennung der einzelnen Insassen erfolgt durch die an der Decke verbauten Monitoring Einheiten mit integrierten Kameras. Im Automatik-Modus reagiert das System auf die vordefinierten Zustände bzw. Anwendungsfälle „Schlafen“, „Arbeiten“, „Lesen“ und „Gefahr“.

Unterstützend kommen gezielt Lichtfunktionen zum Einsatz. Diese werden entweder über das Monitoring-System automatisch aktiviert oder im Sinne der Individualisierbarkeit zonenweise durch die Insassen selbst. Die Funktionen und deren Auslegung werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.



Bild 4: Details des Innenraum-Konzepts (Sitze, Trennwände, Luftfilter, Monitoring Einheiten, Lichtbänder)

#### 4.4 Lichtfunktionen

Licht beeinflusst unser tägliches Leben. Expositionsduauer, Art, Intensität und Spektrum sind unter anderem Parameter, die Einfluss auf den circadianen Rhythmus haben. Menschen verbringen teilweise viel Zeit in Verkehrsmitteln. Daher spielt Licht in der Mobilität der Zukunft eine wichtige Rolle. Um eine gezielte Lichtwirkung zu erreichen, müssen die Anwendungsfälle genau spezifiziert werden.

Tabelle 2 listet zu jedem definierten Zustand/Anwendungsfall die geplante Lichtfarbe und Beleuchtungsstärke auf. Zusätzlich sind Beschreibungen angeführt, welche Wirkung durch die jeweilige Einstellung erzielt werden soll.

Tabelle 2: Spezifikation der Lichtszenarien je nach Anwendungsfall in der Reisekapsel

Zustand / Anwendungs-fall	Lichtfarbe	Beleuchtungs-stärke(lx)	Beschreibung
Standard	Warmweiß (ca. 4000K)	0 - 500	
Arbeiten	Warm- bis Kaltweiß	≥ 500	Erhöhung der Farbtemperatur zur gezielten Steigerung der Konzentration (Bereich 4000K bis 6000K)
Lesen		> 500	Identisch zu Standard, allerdings mit partiell erhöhter Beleuchtungsstärke im Lesebereich
Schlafen	< 4000K	< 50	Reduzierung des Blauanteils, Unterstützung der Melatoninproduktion
Gefahr	Rot	>> 500	Pulsierende Signal-Beleuchtung, um Insassen auf Gefahren hinzuweisen.

Zusätzlich müssen die Lichtfunktionen folgende Anforderungen erfüllen:

- Homogene Ausleuchtung der einzelnen Zonen bzw. des gesamten Innenraums
- Homogene bzw. fließende Übergänge der Ausleuchtung zwischen den Zonen
- Vermeidung direkter Blendung
- Langlebigkeit des Systems (> 60000h)
- Gesteuerung in Anlehnung an das Konzept AVATAR von Mercedes-Benz [29]
- Individuelle Einstellung der Zustände zur Erzielung individueller Wohlfühl-Zonen in Verbindung mit einem selbstlernenden System

Zur Realisierung des Konzepts ist ein umlaufendes LED-Lichtband geplant (siehe Bild 4). Das Konzept wurde abstrahiert mit Hilfe der Lichtplanungssoftware RELUX simuliert. Der Simulation liegen folgende Parameter zugrunde, die auf der Abmessung des Innenraums eines Volkswagen T6 Bus basiert.

#### Simulationsparameter:

- Raumgröße: 2,6m x 2,0m x 1,4m (LxBxH)
- Trennwände: 1,2m (Höhe)
- Nutzungshöhe: 0,4m
- Lichtquelle: 24V RGB + Tuneable White CRI80 (Hersteller Aurora)

Um insbesondere die Minimal- und Maximalanforderungen hinsichtlich der benötigten Beleuchtungsstärke abzusichern, werden die Anwendungsfälle „Schlafen“ (Minimal) und „Arbeiten“ (Maximal) untersucht.

Beim Anwendungsfall „Schlafen“ ist die Lichtquelle auf 41% gedimmt und erreicht auf der definierten Nutzungshöhe eine mittlere Beleuchtungsstärke von 33lx. Im Zustand „Arbeiten“ bei einer 100% Dimmung wird eine mittlere Beleuchtungsstärke von 82lx erreicht.

Die initial geplante Beleuchtung ist daher nur bedingt für die Anwendungsfälle „Standard“ und „Schlafen“ geeignet. Zur Absicherung der anderen Anwendungsfälle mit höheren Beleuchtungsstärken sind weitere Beleuchtungseinheiten erforderlich, die spezifisch für den jeweiligen Anwendungsfall zu definieren sind.

## 5 Virtuelle Absicherung

Neben der Konzipierung ging es bei dem interdisziplinären Projekt zwischen der IAV GmbH und der Hochschule Magdeburg-Stendal um die virtuelle Absicherung. Wegen der steigenden Komplexität künftiger lichttechnischer Systeme wird es immer wichtiger, diese bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess abzusichern, ohne dafür physische Prototypen zu benötigen.

Für die virtuelle Produktabsicherung wird an der Hochschule Magdeburg-Stendal aktuell ein Prüfplatz konzipiert. Herzstück des Prüfplatzes ist die in Bild 5 gezeigte Mixed Reality Brille Varjo XR3. Die Brille besitzt zwei Besonderheiten. Zum einen ist die Auflösung der Brille vergleichbar mit der des menschlichen Auges. Zum anderen hat sie ein 115° breites und natürliches horizontales Sichtfeld. Das zentrale Sichtfeld ( $27^\circ \times 27^\circ$ ) besitzt dabei eine Auflösung von 1920 x 1920 Pixel je Auge. Aus diesem Grund setzen diverse Hersteller, unter anderem aus der Automobilindustrie, zur Absicherung auf diese Technologie [30].



Bild 5: Mixed Reality Brille Varjo XR3 zur virtuellen Produktabsicherung lichttechnischer Systeme an der Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich IWID

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Automobilindustrie mit vielen Fragen konfrontiert ist. Diese fordern dazu auf, die Mobilität der Zukunft neu zu denken.

Aus den bisherigen Forschungsergebnissen geht hervor, dass Licht im Kontext Automobil einen positiven Effekt auf die Insassen erzielt. Die bei der IAV GmbH durchgeführte Studie ergab, dass die Aufmerksamkeit des Fahrers durch den gezielten Einsatz blauen Lichts erhöht wird [8]. Eine weitere Studie mit optimierten Set-Up unter reellen Bedingungen ist aktuell in Planung.

Anhand der bereits verfügbaren Serienlösungen wird deutlich, dass Driver Monitoring Systemen und intelligenten Lichtfunktionen ein großes Potential beigemessen wird. Dieses Potential gilt es bei der „Neugestaltung“ der Mobilität der Zukunft zu berücksichtigen, um gesundheitsfördernde Lichtfunktionen einzubinden.

Das vorgestellte Konzept stellt eine erste Vision dar. Hintergrund ist die geänderte Rolle der Insassen. Die Bereiche Mobilität, Monitoring, Innenraum und Lichtfunktion wurden dabei separat betrachtet. Das Mobilitäts-Konzept sieht die Kombination verschiedener Verkehrswege (Straße und Luft) vor, um möglichst schnell und effizient von A nach B zu gelangen. Das Monitoring ist ähnlich wie bei bereits verfügbaren Serienlösungen kamerabasiert geplant. Das Innenraumkonzept beruht auf einer Reisekapsel, die den Insassen in den Fokus rückt. Gleichermaßen gilt für die gesundheitsfördernden Lichtfunktionen. Die definierten Anwendungsfälle, wie z.B. Arbeiten oder Schlafen, werden mit Hilfe des DMS selbstlernend auf die Bedürfnisse der Insassen angepasst. Die einzelnen Lichtfunktionen müssen im nächsten Schritt für die Anwendungsfälle ausgearbeitet werden.

Zur Visualisierung des Konzeptes kommt an der Hochschule Magdeburg-Stendal die vorhandene Mixed Reality Brille Varjo XR3 zum Einsatz. Diese Technologie ermöglicht eine frühzeitige Absicherung von Konzepten und macht diese zudem erlebbar. Der Prüfplatz zur virtuellen Produktabsicherung befindet sich aktuell in der Entwicklung. Die Ausweitung auf weitere Anwendungsfälle rund um das Thema „optische Technologien in der Fahrzeugtechnik“ ist geplant. Die Zielsetzung des Prüfplatzes ist es, die Lichtwirkung frühzeitig ohne physische Prototypen abzusichern.

Die Vision einer Mobilität mit gesundheitsfördernden Lichtfunktionen ist noch in weiter Ferne. Die Potentiale liegen allerdings auf der Hand. Im nächsten Schritt müssen sie zielgerichtet Einzug in die Mobilität der Zukunft finden. Die vorhandene Spielwiese mit all den verfügbaren Technologien lädt regelrecht dazu ein.

## 7 Danksagung

Die Autoren möchten sich abschließend bei den Projektgruppen, deren Mitglieder und dem studentischen Mitarbeiter bedanken. Sie haben sich im Rahmen eines interdisziplinären Projektes zwischen der IAV GmbH und der Hochschule Magdeburg-Stendal ein Semester intensiv mit diesem Thema auseinandergesetzt und die Idee abschließend visualisiert. Unser Dank gilt Hannes Hoppen, Justus Mentzel, Fabian Tietzsch, Zewen Xue, Tony Nguyen, Lucas Mendel, Elias Bongartz, Siwen Tian und Benjamin Plehn. Vielen Dank!

## 8 Literaturquellen

- [1] **S.W. Lockley, et al**, "Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans", 2006
- [2] **D. Dawson, et al**, "Timed exposure to bright light improves sleep and alertness during simulated night shifts", 1991
- [3] **A. Lowden, et al**, "Suppression of sleepiness and melatonin by bright light exposure during breaks in night work", 2004
- [4] **K. Tanaka, et al**, "Brief morning exposure to bright light improves subjective symptoms and performance in nurses with rapidly rotating shifts", 2011
- [5] **A. Lowden, et al**, "Assessment of a new dynamic light regimen in a nuclear power control room without windows on quickly rotating shiftworkers--effects on health, wakefulness, and circadian alignment: a pilot study", 2012
- [6] **S. L. Chellappa, et al**, "Non-Visual Effects of Light on Melatonin, Alertness and Cognitive Performance: Can Blue-Enriched Light Keep Us Alert?", Paper, Basel, 2011
- [7] **J. Taillard, et al**, "In-Car Nocturnal Blue Light Exposure Improves Motorway Driving: A Randomized Controlled Trial", Université Bordeaux, Paper, Bordeaux, Oktober 2012
- [8] **Jomaa, M.**, „Evaluierung des Lichteinflusses auf die Fahreraufmerksamkeit im Rahmen der Konzeptionierung einer Teststrategie für Driver Monitoring Systeme“, Master Thesis, TU Berlin, 2021
- [9] **S. Schüler, et al**, „Integration of a Melanopic-Light-Unit in a Truck and Investigation of its Impact on Truck Drivers Under Real-Life Conditions“, ISAL 2017, 2017
- [10] **S. Schüler, et al**, „Integration of a melanopic-light-unit into a passenger car – initial results from a field study“, ISAL 2019, 2019
- [11] **M. Niedling, et al**, "Non-Visual Effects of Light for Vehicles Interior – Realistic Chance or Disturbing Feature?" 14th International Symposium on Automotive Light, 2022
- [12] **Volkswagen Passat (2010-2014)**, <https://www.angurten.de/is/assistenzsysteme/1285-Passat+VII+2010-2014%29>, aufgerufen am 27.05.2022
- [13] **Volkswagen Müdigkeitserkennung**, <https://www.volkswagen-news-room.com/de/muedigkeitserkennung-3932>, aufgerufen am 27.05.2022
- [14] **DS7 Crossback**, <https://www.dsautomobiles.de/modelle/ds-7-crossback/praesentation.html>, aufgerufen am 27.05.2022
- [15] **Mercedes-Benz Kurzfilm „Awake“**, <https://group-media.mercedes-benz.com/mars-MediaSite/de/instance/ko/Einen-Augenblick-mehr-Aufmerksamkeit-Mercedes-Benz-praesentiert-Awake.xhtml?oid=53022098>, aufgerufen am 27.05.2022

- [16] **Mercedes-Benz S-Klasse**, <https://www.mercedes-benz.de/passengercars/mercedes-benz-cars/models/s-class/saloon-wv223/comfort/interior-comfort.module.html>, aufgerufen am 27.05.2022
- [17] **Audi urbansphere concept (1)**, [https://www.progress.audi/progress/de/a-new-sphere-of-life-for-megacities.html?pid=bc:conceptB22\\_DE:audi.country:p-teaser:n:o:ai~new-sphere-of-life\\_](https://www.progress.audi/progress/de/a-new-sphere-of-life-for-megacities.html?pid=bc:conceptB22_DE:audi.country:p-teaser:n:o:ai~new-sphere-of-life_), aufgerufen am 27.05.2022
- [18] **Audi urbansphere concept (2)**, <https://www.progress.audi/progress/de/yuan-yuan-tan-about-body-and-mind.html>, aufgerufen am 27.05.2022
- [19] **Sae.org**, "J3016\_202104 – Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles", aufgerufen am 23.05.2022
- [20] **Unece.org**, "UN Regulation No. 157 – Automated Lane Keeping Systems (ALKS)", aufgerufen am 23.05.2022
- [21] **Zeit Online**, „Mercedes-Benz Drive Pilot – Auto fährt, Fahrer spielt“, 07.05.2022, zuletzt aufgerufen am 30.05.2022
- [22] **Handelsblatt**, Autonomes Fahren – Waymo-Produktchef: „Jetzt gibt es einen autonomen Taxidienst, den jeder nutzen kann““, 30.04.2022, zuletzt aufgerufen am 30.05.2022
- [23] **Gründl, M.**, Fehler und Fehlverhalten als ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotential und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, Dissertation, Universität Regensburg, 2005
- [24] **Teslamag.de**, Tesla mit Unfall-Daten für Q4 2021: Autopilot-Systeme erneut sicherer als vor einem Jahr, 16.01.2022, zuletzt aufgerufen am 30.05.2022
- [25] **Zeit Online**, Die Stau-Hauptstädte Deutschlands, 04.06.2019, zuletzt aufgerufen am 30.05.2022
- [26] **ADAC**, Autonomes Fahren: So fahren wir in Zukunft, 08.09.2022, zuletzt aufgerufen am 30.05.2022
- [27] **Süddeutsche Zeitung**, Mobilität - Mit dem Auto doppelt so schnell wie mit Bus und Bahn, 30.08.2022, zuletzt aufgerufen am 30.05.2022
- [28] **IAV GmbH**, Reisen in der Muschelschale – IAV Coquille: ein sicherer und komfortabler Raum für personalisierte autonome Mobilität, CES 2019, zuletzt aufgerufen am 30.05.2022
- [29] **Mercedes-Benz**, Inspiriert von der Zukunft: Das VISION AVTR, zuletzt aufgerufen am 30.05.2022
- [30] **Varjio**, <https://varjio.com/products/xr-3/>, aufgerufen am 30.05.2022

# Ist automatisiertes Fahren mit kamera-optimierten Lichtfunktionen besser möglich?

## Top-Down-Entwicklung optimierter Lichtverteilungen für das automatisierte Fahren

**Dr.-Ing. R. Kauschke,**

HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt;

**M. Waldner, N. Müller, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. T. Bertram,**

Technische Universität Dortmund;

**M. Grünke,**

3D Mapping Solutions GmbH, Holzkirchen

### Kurzfassung

Das Projekt „Optimal Adaptive Headlights to Improve Environment Perception for Automated Driving“ (AHEAD) erforscht eine Steigerung der Verkehrssicherheit beim (hoch-) automatisierten Fahren durch eine Kombination von mehreren hochauflösten und optimierten Lichtverteilungen von SSL|HD-Matrix-Scheinwerfermodulen, einer verbesserten Umfeldwahrnehmung der Fahrzeugkamera, die mittels dieser speziellen Lichtverteilung unterstützt wird, und einem hochgenauen 3D-Umgebungsmodell, welches der Scheinwerfersteuerung neue Informationen liefert. Durch eine Selbstlokalisierung per optischer Triangulation mithilfe von Landmarken und GPS-Signalen kann eine exakte Positionierung des (teil-) automatisierten Fahrzeugs erfolgen. Diese wird für eine präzise Umfeldausleuchtung, eine optimierte Erkennung des Fahrwegs, eine Reduzierung von heutigen Lichtverteilungsdefiziten, eine Fahrintentionsdarstellung für andere Verkehrsteilnehmer und eine gesteigerte Effizienz durch z.B. eine auf die Fahrbahn reduzierte Ausleuchtung sowie eine optimierte Ausleuchtung zur Objekterkennung genutzt. Die Effektivität der Testergebnisse mit einem Kamera- & Multi-Scheinwerfer-Versuchsträger werden im Verlauf des AHEAD-Projekts sowohl in einer neuartigen Rapid-Prototyping Lichtsimulations-Umgebung als auch in einem realen Versuchsträger hinsichtlich der Verbesserung der Sicherheit erforscht und nachgewiesen.

### Abstract

The AHEAD Project has the targets to increase traffic safety, acceptance and efficiency by light. This is done for highly automated driving by the combination of several high performance

SSL|HD Light distributions, an improved camera environment and driveway detection and a highly precise 3D mapping of different test roads and scenarios. The optical self localisation by triangulation of landmarks and GPS signals allows for a very precise localisation of the automated test vehicle inside the real world. This exact position is used for a very detailed road specific illumination, the reduction of today's lighting safety risks, a driving intention visualization by light for other traffic participants and an increased energy efficiency by e.g. a reduced road pathway or object illumination. A Rapid Prototyping Light Simulation Tool and the validation by a camera & multi-headlamp test vehicle will demonstrate the improvements in safety by simulation and by real world test setups.

## 1. Motivation

Teil- bzw. voll automatisierte Fahrzeuge werden in Zukunft deutlich veränderte Anforderungen an zukünftige Lichtverteilungen stellen, da deren Selbstlokalisierung und Objektdetektion bei Nacht bzw. verminderter Umgebungsbeleuchtung maßgeblich durch die Kamera und die Lichtverteilung des Fahrzeugs (neben ggf. RADAR- und LiDAR-Sensorik) bestimmt werden und nicht mehr von der visuellen Wahrnehmung des Fahrers abhängen. In dem AHEAD-Projekt, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert wird, werden die Anforderungen an zukünftige Lichtverteilungen für hoch automatisiertes Fahren erarbeitet, in einem Rapid-Prototyping Lichtsimulations-Tool für Matrix-Scheinwerfer optimiert und verifiziert. Anschließend erfolgt mit einem Multi-Scheinwerfermodul ausgestatteten Testfahrzeug auf realen Teststraßen und in realen Szenarien die Validierung der Konzepte. Dazu werden zahlreiche Teststrecken und Straßensituationen ausgewählt, exakt vermessen und in einem hochgenauen 3D-Umgebungsmodell von 3D-Mapping Solutions aufgebaut. Dieses Umgebungsmodell dient sowohl in der Simulation der TU Dortmund, als auch in der realen Validierung als Referenzwelt für ortsfeste Objekte und zur Selbstlokalisierung mittels in



Bild 1: Projektpartner und Hauptarbeitspakete mit den 3 Hauptzielen des AHEAD-Projekts

ihrer Lage bekannten Landmarken. Mit diesen Simulationsmöglichkeiten, Datensätzen und dem Erprobungsträger der HELLA kann der Sicherheitsgewinn, die Erhöhung der Akzeptanz von automatisiert fahrenden Fahrzeugen, deren Fahrintentionsdarstellung durch die Projektion dynamischer Symbole und die Steigerung der Effizienz durch eine auf kamera-, fahraufgabe- und sehobjekt-optimierte, reduzierte und dynamisch variable Lichtverteilung erforscht werden, siehe Bild 1.

## 2. Use-Cases für das automatisierte Fahren

Das kamerabasierte, automatisierte Fahren erfordert eine ebenso automatisierte Entscheidungsfindung des Fahrzeugs bezüglich einer sicheren Fahrstrecke. Dazu ist es u.a. erforderlich, dass der Fahrweg und damit der Bremsweg des Fahrzeugs vor dem Fahrzeug frei ist und vor allem zuverlässig von der Fahrzeugsensorik überwacht werden kann. Die Überwachung erfolgt über die Projektion eines Vorfeld-Licht-Fächers [1] und dessen Analyse mit einer Fahrzeugkamera, wobei z.B. verlorene Ladung auf dem Fahrweg mittels eines Kantenfilters in der Bildverarbeitung erkannt werden soll, siehe Bild 2.

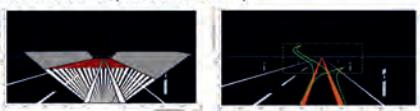
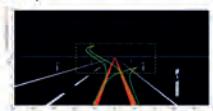
- Streifen-Muster Vorfeld (Ist der Fahr- / Bremsweg frei?) 
- Streifen-Muster an der Seite (Gefahren seitlich?) 
- OLA-Streifen im Nahfeld und im Fernfeld / Abgleich 3D-Karte und Realität (Baustelle voraus?) 
- Sensor-Unterstützung Kamera (Entfernungs-Detektion) 
- LWR nur noch digital eingestellt (MVP Squad High Tech Light) 

Bild 2: Use-Case-Darstellung mit mehreren Lichtstrategien zur Erkennung von Gefahren, dem freien Fahrweg, dem Abgleich des 3D-Umgebungsmodells in den Kartendaten mit der Realität und weiteren Sonderfunktionen

Über Streifenmuster im Seitenbereich der Lichtverteilung sollen mögliche Gefahrenquellen von der Seite (z.B. Fußgänger hinter Autos bzw. in dunkler Kleidung oder am Zebrastreifen oder kreuzende Fahrzeuge) und die Landmarken zur Selbstlokalisierung besser erkannt werden. Dabei dient das 3D-Umgebungsmodell als Lage- und Geometrierefenz für zu erwartende ortsfeste Objekte, die mit einer optimierten Ausleuchtung schneller und ggf. interaktiv gemäß ihres Reflexionsgrades und des Kontrastes vor dem Hintergrund eindeutig erkannt werden. Mittels Projektion von Optical Lane Assist (OLA)-Streifen im Nahfeld kann die seitliche Lage des eigenen Fahrzeugs relativ zu den Fahrbahnmarkierungen bestimmt werden. Über OLA-Streifen im Fernfeld und dem erwarteten weiteren Straßenverlauf im 3D-Umgebungsmodell kann ein Abgleich zwischen der HD-Karte und dem 3D-Umgebungsmodell und der Realität erfolgen, sodass Baustellen oder kurzzeitig varierte Verkehrsführungen erkannt werden und das Fahrzeug auf einen reinen Eigensor-Modus bei reduzierter Geschwindigkeit zurück schaltet bzw. die Fahrverantwortung beim automatisierten Fahren in Level 3 oder bei ungünstigen Umweltbedingungen an den Fahrer zurückgibt.

Die Sensorunterstützung der Kamera für eine verbesserte Entfernungserkennung und die nur digital eingestellte Leuchtweitenregulierung (LWR) mittels Software-Anpassung der SSL|HD Lichtmodule-Ansteuerung sind weitere mögliche Sonderfunktionen des Konzepts.

Die verbesserte Akzeptanz von automatisiert fahrenden Fahrzeugen soll nicht nur über cyanfarbige Signalfunktionen sondern auch ergänzend über die Hauptlichtverteilung als Darstel-

lung des realen Fahrwegs auf der Fahrbahn erfolgen. Damit kann die Fahrintention des automatisierten Fahrzeugs in mehreren Verkehrssituationen eindeutiger und unterstützend zum heutigen Blinker-Einsatz des Fahrers bzw. des Fahrzeugs gegenüber den anderen Verkehrsteilnehmern eingesetzt werden. Der Verkehrsfluss kann über die Lichtverteilung damit zusätzlich verbessert werden und Fußgänger können z.B. an Zebrastreifen das Fahrverhalten des (teil-) automatisierten Fahrzeugs besser einschätzen. In der Literatur werden Ansätze für die Kamera-Witterungs-Erkennung [2], für optimierte Lichtverteilungen des hochautomatisierten Fahrens [3] und die optimierte Kantendetektion von Objekten [4] vorgestellt, auf deren Erkenntnisse das AHEAD-Projekt aufbauen kann.

### 3. HD-Karte und hochgenaues 3D-Umgebungsmodell

Als eine wesentliche Grundlage für die Lichtsimulation, wie auch als A-Priori-Wissen für die Scheinwerfersteuerung und Lokalisation des Testfahrzeugs dient eine speziell für das Projekt AHEAD erzeugte HD-Karte. Die nötige kinematische Vermessung von geeigneten Straßenabschnitten, die Generierung der HD-Karte im OpenDRIVE-Format (siehe Bild 3) und die daraus resultierende und um weitere Informationen angereicherte Umsetzung eines hochgenauen 3D-Umgebungsmodells wird vom Projektpartner 3D Mapping Solutions durchgeführt.

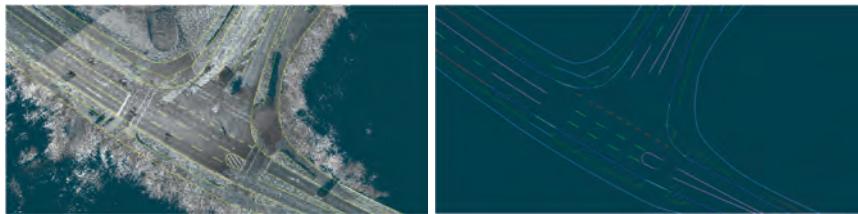


Bild 3: Auswertung der Punktfolge zur Erzeugung einer hochgenauen HD-Karte

In einem ersten Schritt wurden unterschiedliche Straßen-Szenarien ausgewählt, die auch ein breitgefächertes Maß an Straßenkategorien abdecken, um sie anschließend in der Realität zu verorten. Danach erfolgte eine Vermessung mit dem Mobile Mapping System von 3D Mapping Solutions. Nach der Erfassung, Verarbeitung und Analyse dieser hochgenauen Sensordaten steht als erstes Ergebnis eine OpenDRIVE-Karte der verschiedenen Teststrecken zur Verfügung. Diese enthält neben den genauen Spurinformationen auch die Verkehrslogik, alle Verkehrszeichen und eine Vielzahl von Objekten, die später als Landmarken vor allem für die

Selbstlokalisierung aber auch in der Simulation als maßgebliche Träger von Reflexionseigenschaften dienen. Im zweiten Schritt werden die HD-Kartendaten in ein hochgenaues 3D-Umgebungsmodell überführt. Hierzu wurden für die verschiedenen Szenarien vier unterschiedliche Detaillierungsgrade gesetzt, um eine gute Leistungsfähigkeit im Fokus auf den jeweils zu betrachtenden Use-Case sicher zu stellen. Die Gliederung in Detaillierungsstufen dient auch dazu, dass der Immersionsgrad in der Lichtsimulation der ausgewählten Streckenabschnitte möglichst gleich bei einem vertretbaren Aufwand zur Detaillierung bleibt. Alle Objekttypen werden anhand der Referenzdaten aus OpenDRIVE, einer Punktfolge und Kamerabildern als volle 3D-Geometrie ausmodelliert und entsprechend der Messungen georeferenziert im 3D-Umgebungsmodell platziert. Die Ausrichtung der Objekte entspricht dabei den exakten Messungen aus der Punktfolge. Die 3D-Koordinaten eines jeden Objekts sind hochgenau, wobei die Pitch- und Roll-Ausrichtung anhand der Referenzdaten visuell angenähert wird. Es entsteht so ein geometrisch exaktes Abbild der realen Welt in der Simulationsumgebung.

Um die einzelnen Szenarien, denen wiederum verschiedene Use-Cases zugeordnet sind, in der Simulation realitätsgetreu "abfahren" zu können, werden die dazwischen liegenden Streckenabschnitte in der HD-Karte, wie auch im 3D-Umgebungsmodell als Verbindung in vereinfachter Modellierung mit geringerem Detaillierungsgrad eingefügt.

Im Projekt werden 3D-Umgebungsmodelle von ca. 48 km Strecke auf Autobahnen, Landstraßen und vor allem innerstädtischen Bereichen, die alle im Bereich Lippstadt, siehe Bild 4, und Dortmund liegen, erstellt. Die OpenDRIVE-Daten stehen sukzessive in AHEAD gleichermaßen der Nutzung im Versuchsfahrzeug sowie für den Aufbau der Simulationsumgebung bereit.

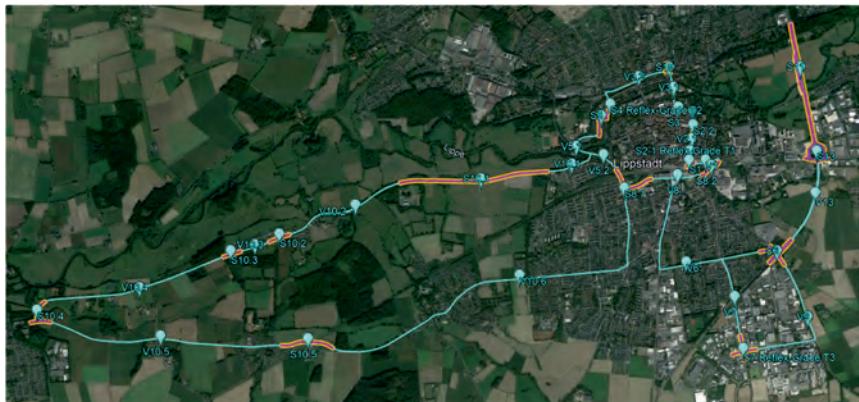


Bild 4: Luftbild mit einem Teil der Strecken und Schwerpunkt-Szenarien (Pink-Orange), hier in und um Lippstadt (Hintergrundbild © Google Earth)

#### 4. "See the Optimal Lighting" (SOL) Matrix-Scheinwerfer-Simulator

Zur schnellen Erprobung bzw. Rapid-Prototyping der vorgestellten neuartigen Lichtfunktionen wird von der TU Dortmund im Rahmen des AHEAD-Projektes eine neuartige Matrix-Scheinwerfer-Simulation, genannt "See the Optimal Lighting" (SOL), entwickelt. Bekannte Simulatoren und kommerzielle Lösungen verfügen nach Einschätzung der Autoren nicht über das benötigte Maß an Flexibilität zur Erzeugung dynamischer Lichtverteilungen und an Leistungsfähigkeit bzw. Schnelligkeit zur Berechnung der Simulation und Steuerung einer beliebigen Anzahl hochauflösender (HD) Lichtmodule beispielsweise zur Projektion beliebiger Symbole in Echtzeit in einer visuell ansprechend simulierten Umgebung. Zum Erreichen dieser Systemziele ist SOL modular aufgebaut und besteht aus zwei Hauptkomponenten. Diese Module sind eine kommerziell verfügbare 3D-Rendering Engine, die Unreal Engine, und ein Softwaremodul zur dynamischen Erzeugung [5] und Steuerung [6] der Matrix-Lichtverteilung, welches primär auf der Grafikkarte (GPU) ausgeführt wird. Dieses Modul ist an die 3D-Rendering Engine gekoppelt und erweitert diese um die Funktionalität der Simulation von HD-Lichtfunktionen in Echtzeit.

Die dynamische Erzeugung der Lichtstärkenverteilung  $I_v \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{z \times s}$  mit  $z$  Zeilen und  $s$  Spalten eines Matrix-Scheinwerfers basiert auf einer rechenzeiteffizienten dünnbesetzten Matrix-Vektor-Multiplikation [7], deren Ergebnis direkt in die Standard-Lichtquelle der 3D-Rendering Engine [5] geladen wird. Dabei werden im Gegensatz zu einer vollbesetzten Multiplikation nicht

leuchtende Lichtquellen bzw. Lichtpixel und nicht beleuchtete Abstrahlrichtungen nicht betrachtet, was insbesondere Speicherzugriffe reduziert. Für die Matrix-Vektor-Multiplikation werden die Lichtstärken aller  $n$  Lichtquellen bzw. aller Pixel eines Scheinwerfer-Moduls in jede relevante Abstrahlrichtung in einer dünnbesetzten Modul-Matrix  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{(z \cdot s) \times n}$  im Compressed Sparse Row (CSR) Format [7] zusammengefasst. Da die zweidimensionale Lichtstärkenverteilung im Speicher der GPU als eindimensionaler Vektor mit  $z \cdot s$  Zeilen vorliegt, kann  $\mathbf{I}_v$  dynamisch mit dem Steuerungs- bzw. Auslastungsvektor  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{n \times 1}$  aller  $n$  Pixel, welche ihre aktuelle Ansteuerung enthält, mit  $\mathbf{I}_v = \mathbf{H} \cdot \mathbf{p}$  als CSR Matrix-Vektormultiplikation [7] auf der GPU berechnet werden. Über Projective Texture Mapping wird dann die virtuelle Welt mit  $\mathbf{I}_v$  von der Engine beleuchtet.

Der Steuerungsvektor  $\mathbf{p}$  wird dynamisch aus den Soll-Vorgaben der Ausleuchtung mit dem Super-Sampling Control (SSC) Algorithmus [6] auf der GPU berechnet. Die Soll-Ausleuchtung wird über die Gestaltung von dreidimensionalen Objekten, genannt Primitive, d.h. deren Form, Größe und Oberfläche und die dynamische Positionierung und Ausrichtung vor dem Egofahrzeug vorgegeben und dann vom SSC Algorithmus optimal auf die Scheinwerferstruktur angewendet bzw. die Ansteuerung aller Module berechnet. Hierzu werden die Primitive mit Raycasting abgetastet und die gefundenen Soll-Lichtstärken durch Minimierung des gewichteten quadratischen Fehlers zwischen Soll- und möglicher Lichtstärke in die optimale Auslastung des Pixels der jeweiligen Lichtmodule überführt.

Mit diesem allgemeinen Ansatz kann die Projektion eines Streifenmusters, der OLA-Streifen und die gezielte Ausleuchtung von Landmarken, deren ideale Art und Position durch die Nutzung der HD-Karte bekannt ist, realisiert werden. Hierzu repräsentieren die Primitive ideale Symbole, indem ihre Soll-Beleuchtung d.h. die Soll-Lichtstärke auf der Oberfläche der Primitive nicht gleichmäßig ist, sondern durch Bilder vorgegeben wird, welche als Textur auf der Oberfläche liegen. Die Primitive fungieren damit als eine Art beliebige Zeichenfläche im dreidimensionalen Raum. Die Symbole werden hierbei vorberechnet, können aber durch Änderung der Größe der Primitive dynamisch skaliert und positioniert werden. Dies ist in einer Beispielszene in Bild 5 gezeigt, anhand derer die Anwendung des Verfahrens nun konkret erläutert wird. Die Projektion der Vorfeld-Streifen wird durch die Platzierung eines Primitivs auf die Fahrbahnoberfläche realisiert, welche an beide Scheinwerfer übermittelt wird. Damit der Fernbereich nicht zu dunkel ausgeleuchtet wird, werden ab 40 m zusätzliche Streifen projiziert. Das Streifenmuster erscheint so verzerrt in der Lichtstärkenverteilung des rechten und linken Scheinwerfers, sodass sich die Strahlen am Ort des Symbols richtig überlagern. Die beiden Häuser, welche exemplarisch Landmarken repräsentieren, werden jeweils nur von einem Scheinwerfer beleuchtet. Die Primitive sind derart platziert und ausgerichtet, dass sie die Form

des umschließenden minimalen Quaders der Häuser bzw. ihrer Repräsentation in der HD-Karte nachbilden. Damit soll die dynamische Projektion ermöglichen, Abweichungen zwischen

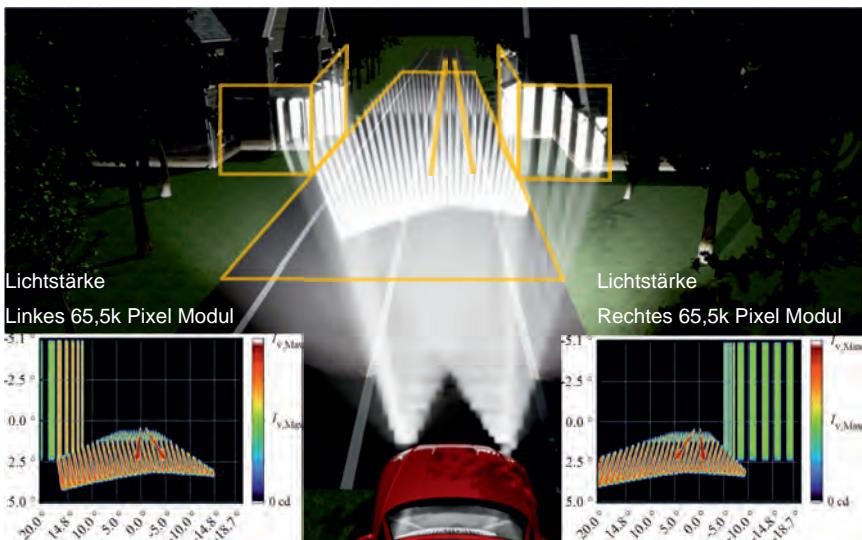


Bild 5: Visualisierung der Form der Primitive als gelbe Objekte, der Lichtstärkenverteilung der beiden Scheinwerfer in Falschfarben und ihrer volumetrischen Abstrahlung

Karte und Realität festzustellen. Die OLA-Linien werden durch zwei schmale Primitive über dem großen Grundsymbol erzeugt.

In Bild 6 ist dieselbe Szene aus der Fahrerperspektive mit einem zusätzlichen dunklen Quader, welcher verlorene Ladung repräsentiert, dargestellt. Im Bereich des Quaders stimmen Soll- und Ist-Projektionsfläche nicht überein, sodass sich die Strahlen der Scheinwerfer nicht wie gewünscht zu Streifen überlagern. Dadurch entsteht eine Art Kreuzmuster auf der Oberfläche des Quaders, welches vom Soll-Streifenmuster abweicht und als weiße Fläche erscheint. Diese Abweichung könnte für eine Verbesserung der Detektion von Objekten genutzt werden, indem nach Abweichungen im Soll-Muster gesucht wird. Da die Streifen für die Häuser nur von einem Scheinwerfer erzeugt bzw. projiziert werden, verändert sich das Muster bei einer Abweichung der Zielfläche nicht im gleichen Maße wie die Vorfeld-Streifen, es wird nur verzerrt. Durch die Verzerrung ändert sich insbesondere auf der grünen Rasenfläche vor den Häusern die Richtung der Streifen. Auch ist der Abstand der Streifen nicht mehr gleichmäßig, sondern ändert sich in Abhängigkeit von der Abweichung zur ebenen Soll-Geometrie. Auch

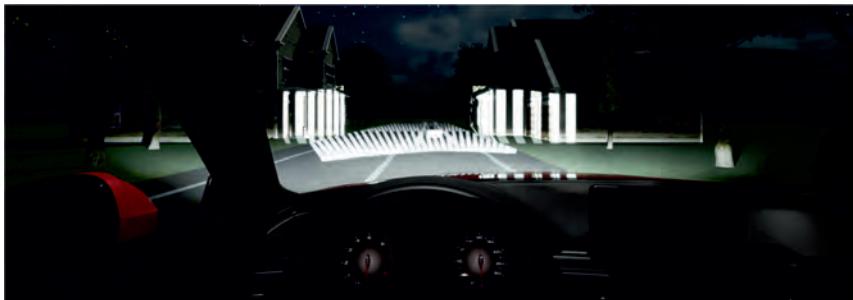


Bild 6: Simulation derselben Szene wie Bild 5 mit einem zusätzlichen Quader in 25 m Entfernung auf der Fahrspur aus Fahrerperspektive ohne volumetrische Ausleuchtung.

diese dargestellte Veränderung des Soll-Symbols hat das Potenzial, Abweichungen zwischen der Karte sowie der Realität und generell Oberflächenstrukturen besser sichtbar zu machen.

## 5. Test-Fahrzeug zur Validierung der Lichtfunktionen für hochautomatisiertes Fahren

Ein Versuchsträger wurde mit 3 SSL|HD Modulen mit jeweils mehr als 16.000 Pixel pro Scheinwerfer-Seite aufgebaut, siehe Bild 7. Zusätzlich wurde ein 1 Row-Matrix Modul und ein Cornering Light Modul verbaut. Über die Simulations-/ Ansteuerungssoftware können die SSL|HD-Module, wovon 2 pro Fahrzeug schwenkbar sind, pixelweise in ihrer Lichtverteilung variiert werden. Ziel ist es, eine hohe Variabilität in der Lichtverteilungs-Darstellung zu haben, um deutlich über die Möglichkeiten heutiger Scheinwerfersysteme in Lichtstärke, Auflösung und Flexibilität hinauszugehen, damit in den Validierungsfahrten eine software-optimierte digitale Lichtverteilung für automatisiertes, kamerabasiertes Fahren generiert werden kann.

Im Verbund mit 3 Kameras auf dem Dach des Versuchsträgers kann neben der Triangulation von Landmarken (z.B. Leitpfosten, Bäume, Verkehrsschilder, Fahrbahnmarkierungen oder Hausfassaden-Ecken) über zwei außenliegende Kameras, die einen 120° horizontalen Öffnungswinkel haben und eine Telekamera mit 60° Öffnungswinkel sowohl das Nahfeld als auch das Fernfeld der geschwenkten Lichtverteilung erfasst, ausgewertet und für eine interaktive, vom Objekt-Reflexionsgrad abhängige Lichtverteilungs-Ansteuerung genutzt werden. Alternative Erkennungsstrategien zum Vermeiden von Tarnung sollen ebenfalls erprobt werden, da neben ausgewählten Test-Cases, in denen auch der Reflexionsgrad des Hintergrundes bekannt ist, auch ein allgemeingültiger Ansatz für beliebige, ortsvARIABLE Objekte und unbekannte Objekt-Hintergründe in ersten Untersuchungen bearbeitet wird.

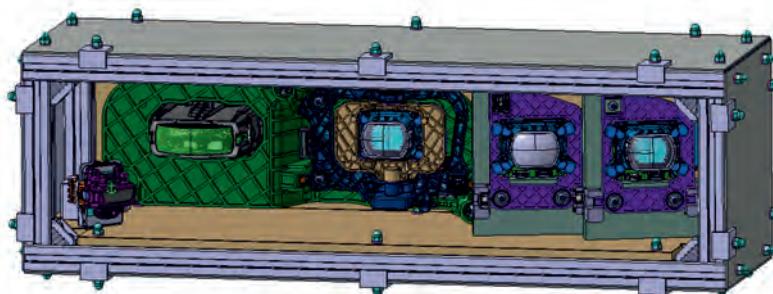


Bild: 7: Frontrack mit 5 Lichtmodulen als linker Scheinwerfer des AHEAD-Versuchsträgers:  
3 SSL|HD-Modulen, davon eines geschwenkt, 1-Row-Matrix-Modul und ein  
Cornering-Light-Modul

## 6 Ausblick auf die Validierung

Das Frontrack-Versuchsfahrzeug dient zur Validierung der Lichtfunktionen anhand von unterschiedlichen Test-Cases. Dabei findet eine Verifikation und Optimierung in der SOL Scheinwerfer-Simulationsumgebung der TU Dortmund statt. Erste Ergebnisse wurden bereits in Kapitel 4 gezeigt. Anschließend werden die optimierten Lichtverteilungen in mehreren Vari-



Bild 8: Validierungs-Schaubild aus automatisierten Fahraufgaben AF abgeleiteten Lichtfunktionen und deren Wirksamkeit anhand der Zielgrößen Verkehrssicherheit VS, Fahrintention FI, Energie-Effizienz E, die mittels Test-Cases T validiert werden sollen

anten in der realen Welt erprobt, wobei die Validierung vorwiegend anhand von Kamerabild-Vergleichen erfolgen soll, um die Verbesserung nachzuweisen.

Im Projektverlauf bis Mai 2024 wird die weitere Erprobung der Lichtfunktionen, siehe Bild 8, deren Kamera-Aufnahmen und Bildverarbeitungs-Analyse erfolgen. Die Verbesserungen der Verkehrssicherheit, in der Anzeige der Fahrintention und Energie-Effizienz bei Nacht sollen in weiteren Beiträgen folgend vorgestellt werden.

Diese Arbeit wird mit Mitteln des deutschen Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) als Teil des AHEAD-Projektes (Förderkennzeichen: 19A21021C) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

- [1] Wilks C, Kubitza B., Next lighting generation: From static light pattern to light movies, SIA Vision Conference, Oct 2016
- [2] Krieff F., Neumann C., Future of headlamps: Optical sensor for rain and fog detection, Seite 152 bis 161, 04.2022
- [3] Hoffmann D, Khanh T.Q. et al., Investigation of different influencing parameters on the quality of object detection by camera systems in highly automated vehicles, ISAL 2021-Proceedings, Seite 172 bis 181, 04.2022
- [4] Willmann J., Khanh T.Q. et al., Edge Detection Algorithm for Inhomogeneous Luminance Images –An Approach for Standard Object Luminance Determination, ISAL 2021-Proceedings, Seite 384 bis 394, 04.2022
- [5] Waldner M., Bertram T., Simulation of High-Definition Pixel-Headlights, International Symposium on Visual Computing (ISVC), 2020
- [6] Waldner M., Bertram T., Feedforward Control of HD-Headlights for Automated Driving, ISAL 2021-Proceedings, Seite 142 bis 151, 04.2022
- [7] Bell,N. und Garland, M.: Efficient Sparse Matrix-Vector Multiplication on CUDA ,December 11, 2008 <https://www.nvidia.com/docs/IO/66889/nvr-2008-004.pdf> (Stand 19.4.2022)

# The Best of Two Worlds – Innovations in Light Measurement Technology

## From legislation and standardization to the practical assessment of light

Dipl.-Ing. **Christian Schwanengel**, Dr. **Udo Krüger**,

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH Ilmenau;

Dr. **Thomas Reiners**, LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin

### Kurzfassung

Der Beitrag zeigt die letzten Entwicklungen in der Standardisierung von Laborbedingungen und geht dabei insbesondere auf die Bewertung von Licht ein. Der Artikel soll zeigen, wie aus der überwiegend theoretischen Arbeit in den Arbeitsgruppen von CIE und GTB in der Praxis produktive Labore entstehen, welche der Automobilindustrie die Möglichkeit geben, neue Innovationen messtechnisch zu begleiten und weiterzuentwickeln.

### Abstract

This article shows the latest developments regarding the standardization of laboratory conditions, focusing on light assessment. The article demonstrates how productive laboratories are created in practice, based on the predominantly theoretical work in the working groups of CIE and GTB, allowing the automotive industry to monitor and further develop innovations with measurement technology.

### 1. Trends in legislation and standardization

Products are constantly by manufacturers further developed. Therefore, the regulatory environment and standardization requirements must be permanently adapted, further developed or new ones created. As a rule, manufacturers themselves are interested in adequately qualifying and quantifying their products to demonstrate and name their advantages on the market. This creates a need for additional requirements and quality criteria beyond existing standards, which must be defined first. Experts from various disciplines are needed to develop suitable frameworks for standardization. First of all, product experts, i.e., the manufacturers, are needed. Then there is a need for metrology specialists familiar with the measurement processes and instrumentation technology necessary to record the relevant data. Last but not

least, representatives having a legal background should also be involved to ensure that the developed standards are suitable and conform to existing regulations.

Depending on the topic, other experts, e.g., from universities, industry, institutes, etc., may also be involved.

In order to fulfill such an important task, all expert groups mentioned above must be organized in a legal framework. Various international standardization bodies or NGOs (non-governmental organization) are working on this topic; however, this contribution focuses on the CIE and GTB. The development of reports and standards in national and international standardization bodies takes between 5 and 15 years and, therefore, must be well planned and started in good time to still represent the latest state of technology when standardization is completed.

### 1.1 CIE

The CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) is the international lighting commission dedicated to worldwide cooperation and information exchange for light, illumination, vision, color, photobiology and related technology.

The CIE is an independent, non-profit organization voluntarily serving its 40 member countries. Originally founded in 1900 as the International Commission for Photometry (CIP), since its reorganization into CIE in 1913, the Commission has evolved into a professional organization recognized as an international standards body in light and lighting.



Fig. 1: CIE member states as of 1987 [1]

The CIE has various divisions that dedicate small groups of experts (Technical Committees, TCs) to discuss new standards or revise existing standards. These TCs draw up guidelines and standards for the general public based on the state-of-the-art and the market requirements. After passing through several review processes, those guidelines finally result in a Technical Note, Technical Report or International Standard (often together with ISO).

The two examples considered in this article are assigned to Division 2: "Physical Measurement of Light and Radiation". The CIE 244:2021 - "Characterization of Imaging Luminance Measurement Devices (ILMDs)" has passed the final ballot phase and was published in 2021.

CIE DIS 027:2021 - "Photometry of road illumination devices, light signalling devices and retroreflective devices for road vehicles" was approved by the national committees and the CIE Board of administration. It is expected to be published later this year as CIE S 027.

## 1.2 GTB

In contrast to the CIE, the Automotive Lighting and Light Signalling Expert Group GTB (formerly known as Groupe de Travail de “Bruxelles 1952” [2]) specializes in vehicle lighting only. Often the same experts as in the CIE can be found there due to their background or employment in the vehicle industry, lighting system manufacturing, test laboratories, regulatory authorities and universities. The GTB, founded in 1952, is much younger than the CIE and is also a non-profit, non-governmental organization active worldwide. It offers members a unique opportunity to stay up-to-date with regulatory advances or participate in the UN regulatory process.

The GTB has various working groups and task forces. Equivalent to the TCs at the CIE, a Working Group or Task Force deals with new topics and develops solutions and proposals for the general public.

The Task Force VLLTP (Vehicle-Level Laboratory Testing Procedure) is discussed here as a relatively new example. This task force was launched in 2019 and is currently working on GTB recommended practice, i.e., a document describing the requirements for testing on vehicle level in a laboratory environment.

## 1.3 CIE 244:2021 - Characterization of Imaging Luminance Measurement Devices

ILMDs are spatially resolved luminance measurement devices that image a plane perpendicular to the optical axis at the object distance through a lens onto a sensor array. A distinction between 2 types is made:

### ILMD Type I:

These devices are calibrated for luminance, i.e., each pixel of the luminance image contains the luminance information as seen in the scene. Geometric information is neither necessary for image evaluation nor calibration.

### ILMD Type II:

Each pixel in the luminance image represents a luminance value in the scene and the associated information about direction, positions and viewed solid angles. Photometric and geometric calibration is required for this type of ILMD.

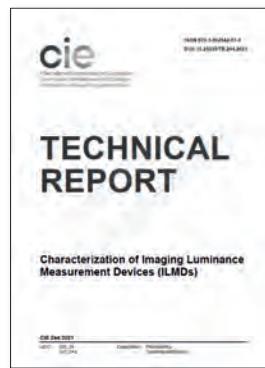


Fig. 2: CIE244:2021

In order to be able to evaluate and compare photometric devices, characteristic values were introduced with the CIE publication CIE53:1982 and then, with CIE69:1987, a comprehensive characteristic value and evaluation system (e.g., the well-known  $f_1'$  for the description of the

quality of the spectral adaptation to the  $V(\lambda)$  function) was introduced. Currently, this information is described in the ISO/CIE19476:2014(E) standard. However, additional parameters are relevant beyond the properties considered in ISO/CIE19476:2014(E) for many applications.

In order to close gaps and expand the assessment possibilities, especially for ILMDs, various new quality indices were introduced. The following table shows an excerpt of the new indices.

Table 1: Excerpt of new quality indices from CIE244:2021 [3].

Qual- ity In- dex	Description	ISO/CIE 19476:2014(E)	Uniformity evaluation
$f_{21}$	Spatially and direction-dependent sensitivity for flat field	N	Yes
$f_{22}$	Spatial and direction dependent sensitivity for spots	N	Yes
$f_{23}$	Effect of surrounding field	N	(Yes)
$f_{24}$	Stray light influence for negative contrast	N	(Yes)
$f_{25}$	Edge function	N	No
$f_{26}$	Influence of smear	N	No
$f_{27}$	Shutter repeatability	N	(Yes)
$f_{28}$	Aperture repeatability	N	No
$f_{29}$	Size-of-Source effect	N	Yes

As an example, the negative contrast ( $f_{24}$ ) and the edge function ( $f_{25}$ ) are mentioned. Here, the resulting measured values in the blue regions play a role in defined scenes.

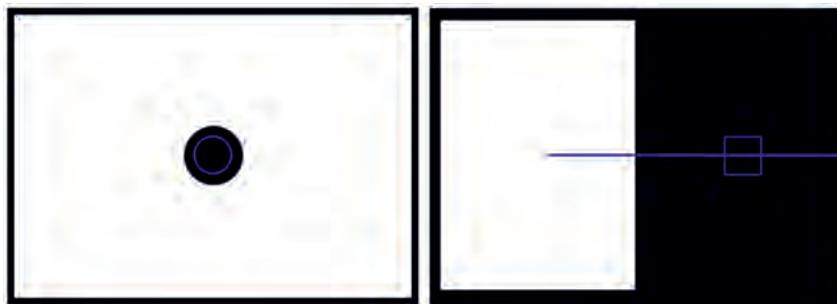


Fig. 3:  $f_{24}$  and  $f_{25}$  test images from CIE244:2021

### 1.3.1 Dynamics vs. contrast

Both are differences in intensity. However, in the case of a spatially resolved sensor, the difference can be temporal or spatial. If an ILMD can accurately measure very dark objects on the one hand (e.g., backlit symbols or the backlight of a display) and very bright ones on the other hand (e.g., high-power LEDs, arcs of light or similar), then we speak of dynamics. The dynamic range thus indicates the ability of a system to measure objects of different brightness at different points in time. Good devices achieve a dynamic range of 1:10,000,000 and more. However, various applications present the intensity differences within a single scene (e.g., low beam headlamps, HDR displays). In this case, we speak of contrast within an image. Due to stray light constrictions, ILMDs can display much less contrast than the 1:10,000,000 contrast range. Standard ILMDs achieve contrasts in the order of 1:1000 at the bright-dark boundary (compare fig. 3 right) and in the even more unfavorable scenario of negative contrast (fig.3 left), they achieve contrasts of only 1:100 or less.

Such standard systems are unsuitable for applications where high contrasts must be measured. For those measurement tasks, systems specially optimized for the application are needed. Users should therefore always review the specifications of a specific instrument type to assess the suitability of this ILMD.

Table 2: Examples of relevant quality indices regarding the contrast capability of an ILMD

	Description	Standard System	SLC System
$f_{23}$	Effect of surrounding field	1.0e <sup>-3</sup>	5.0e <sup>-4</sup>
$f_{24}$	Stray light influence for negative contrast	1.0e <sup>-2</sup>	5.0e <sup>-4</sup>
$f_{25}$	Edge function	4.0e <sup>-4</sup>	6.6e <sup>-5</sup>

### 1.4 CIE DIS 027:2021 - Photometry of road illumination devices, light signalling devices and retroreflective devices for road vehicles

In the CIE technical committee TC2-67, the requirements and the environmental and operating conditions for the measurement of illumination and signalling devices for power-driven vehicles and their trailers have been updated to define today's state-of-the-art knowledge for testing the requirements given by UN lighting regulations. As of 2022-03-14, the draft international standard has passed the ballots of national committees, division and CIE board. Here, for the first

time, camera-based methods (ILMD type II laboratory) have been introduced in order to measure contrast in modern LED light sources or support optics development using indirect luminous intensity measurements. With an additional measuring screen, these laboratories can work much faster than classic sequential scanning goniophotometry.

In addition to details on the properties of the measuring screen and the camera systems (geometric and photometric), the standard also defines corresponding measurement uncertainty budgets and the determination of the individual and total contributions using practical examples.

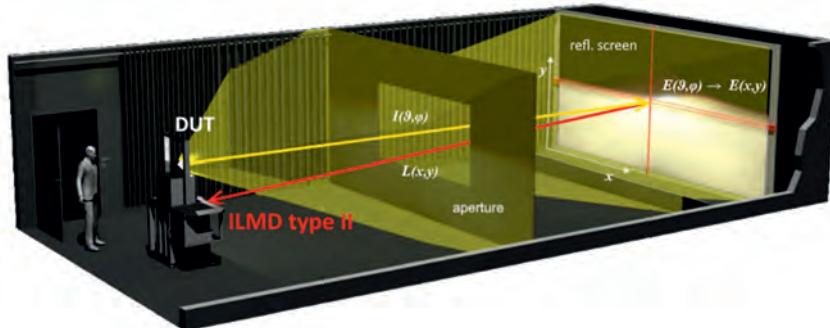


Fig. 4: ILMD type II laboratory for measuring headlights

The combination of classical goniophotometry and contrast-optimized ILMDs type II is also defined in this standard and represents the best of both worlds today.

### 1.5 GTB Task Force Vehicle-Level Laboratory Testing Procedure (VLLTP)

A modern headlamp is capable of more than just a few static light distributions tailored to specific situations. High-end systems have nearly indefinite possibilities to alter the light distribution, thus offering dynamic behavior and adoption to the current lighting environment. The ambitious goal is clear: to drive with the maximum road illumination without endangering others. At the same time, network communication within vehicles is advancing more and more. The decision on which light distribution the headlamp should generate is derived from countless parameters. Not only trivial data such as speed or ambient brightness play a role. Instead, the entire environment of the vehicle is taken into account, and information from countless sensors is used for consideration. This results in intelligent lighting systems that dim specific areas in the light distribution to avoid glare or illuminate the bend before being in the bend.

The NHTSA NPRM (Notice of Proposed Rule-Making) has already emphasized the need for whole-system performance testing, i.e., lighting assessment at vehicle-level (file number NHTSA-2018-0090), recently substantiating in the final rule published by NHTSA. The focus for evaluating such systems has been on outdoor testing (e.g., SAE J3069-201606). From a metrological point of view, the accuracy and repeatability of such tests are insufficient as they depend on changing outdoor conditions. Given the rapid development of adaptive systems and the positive impact they have on road safety, standardized test conditions are urgently needed [4].

The GTB Task Force VLLTP aims to develop a procedure that includes testing dynamic lighting systems on the vehicle level, e.g., ADB (Adaptive Driving Beam) systems, which can be carried out under controlled and repeatable conditions in a laboratory as well. The entire vehicle and other sensor input (e.g., from other road users) shall be considered by stimulating vehicle sensors or simulating their input for nighttime drives. For this purpose, the vehicle is to be used in its original condition.

## 2. Evaluation of light

As mentioned in the previous chapter, products are constantly being developed further. Therefore, it is also necessary that the measurement technology used to evaluate the products evolves accordingly.

Over the last few decades, lighting and signalling devices on vehicles have evolved rapidly. A turn signal light is no longer just on or off but may be sequentially activated. A headlamp that only generates a static low beam may be found only in the low entry-level segment. While dynamic lighting was initially introduced at the turn of the millennium based on swiveling HID projector systems, today, a competition is taking place similar to the early days of digital cameras — who has the most pixels?

### 2.1 Challenge for measurement technology

There are different angles of view here. On the one hand, development time — and thus measurement time — plays a major role in addition to commercial boundary conditions. On the other hand, the required resolution, contrast and associated measurement uncertainties introduce further challenges.

Of course, the various metrological options serve the challenges mentioned above differently, and based on individual priorities, may ultimately limit the choice of measuring technique.

### 2.1.1 The measuring time

When looking at a complex modern road illumination system that can no longer generate just one or two light distributions but hundreds, it quickly becomes clear that the evaluation has to be done much faster because otherwise, the evaluation of a single system will take too long. Acceleration of conventional goniophotometry is possible by introducing multiple sensors, while the introduction of a matrix sensor offers the ultimate solution. The speed at which a goniophotometer can perform a scanning operation is often higher than what can be considered safely for some devices under test. Because of steep gradients in the light distribution or the necessary exposure/integration time due to modulated light sources, scanning at speeds below the maximum speed is often necessary.

Therefore, in the last 20 years, spatially resolved measurement techniques have increasingly proven their value in reducing the measurement time. With an ILMD Type II, a light distribution can be detected more than 100 times faster than with a sequential scanning method.

### 2.1.2 The contrast

As explained in chapter 1.3 (CIE 244:2021), this parameter introduces the most significant challenges for spatially resolved measurement systems. Standard cameras are not suitable for measuring dipped-beam headlamps, which can have contrasts of up to 1:10000 if usable information in the dark areas of the light distribution shall be generated.

The following example shows a low beam distribution with a maximum of approximately 18,000 cd. In the dark areas above the cut-off line, there are larger areas with 3 cd and below. Thus, a contrast of max to min of more than 1:6000 is present here. The picture on the left shows the measurement with a standard ILMD. In case of a homogenous distribution, based on current state-of-the-art technology, the uncertainty evaluation according to ISO/CIE19476:2014(E) may result in a relative uncertainty of 3% or less.

The measured values in the illumination zone, i.e., below the cut-off line, are largely consistent with a contrast-optimized ILMD or a goniophotometer measurement. The deviations in the example are approximately 2%. Nevertheless, it is completely unsuitable for measurements above the cut-off line because of its limitation in contrast capability. Figure 5 shows an example resulting in measurement values of approx. 30 cd instead of 3 cd or an offset of 900%. Therefore, in such a scenario, the properties of the measuring device are not suited to the requirements given by the device under test.

Contrast-optimized ILMDs create a 10x or even higher contrast (see Fig. 5) and this contrast measurement capability is assured by the new quality indices defined in CIE 244:2021.

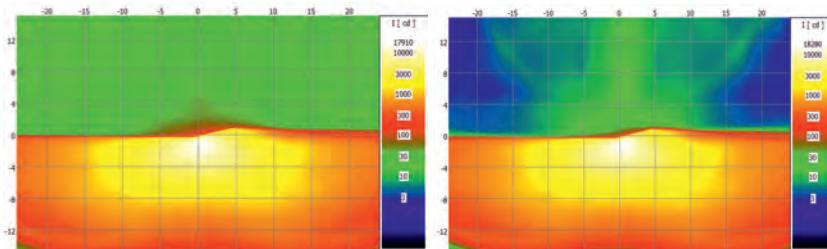


Fig. 5: Standard ILMD left; contrast-optimized ILMD right

## 2.2 The Best of Two Worlds

For the evaluation of headlamps, there have been two main methods used in the laboratory for many years. One is goniophotometry, in which at least one light-sensitive sensor (photometer, colorimeter) is located at a defined distance from the object to be measured and with which the light distribution is sequentially scanned. The other is the camera-based indirect measuring method — an ILMD Type II with a reflective screen.

While classical goniophotometry has advantages in spectral matching and especially in contrast due to the sequential single measurement, the biggest advantage of the camera-based technique is speed.

Several laboratories have shown that no advantage has to be sacrificed and that additional advantages can be gained by combining the two techniques.

### 2.2.1 Rapid camera-based screen goniophotometry

Even with a static measurement setup where the measurement object is not tilted, it is possible to capture a large sub-segment of the luminous intensity distribution with a single shot in a measurement laboratory with a luminance measurement camera. In this case, depending on the room and screen size, angular ranges of, e.g., a solid angle of  $\pm 20^\circ$  horizontally is possible when measuring headlamps at a distance of 10 m, while  $\pm 8^\circ$  are feasible at a distance of 25 m. This is sufficient for some applications, which is why there are already a large number of such laboratories in place. The acquisition of such a LID segment with a resolution of e.g.,  $0.01^\circ$  only takes seconds. It is important for this measuring technique that both the laboratory layout itself and especially the screen are part of the measuring system and have an intrinsic influence on the measurement results. Both must be taken into account and meticulously characterized accordingly.

If the partial LID limited by the screen size is insufficient, the laboratory can be extended with corresponding movement units, and thus several LID segments can be combined. Figure 6 shows an example laboratory with several possible combinations and extensions.

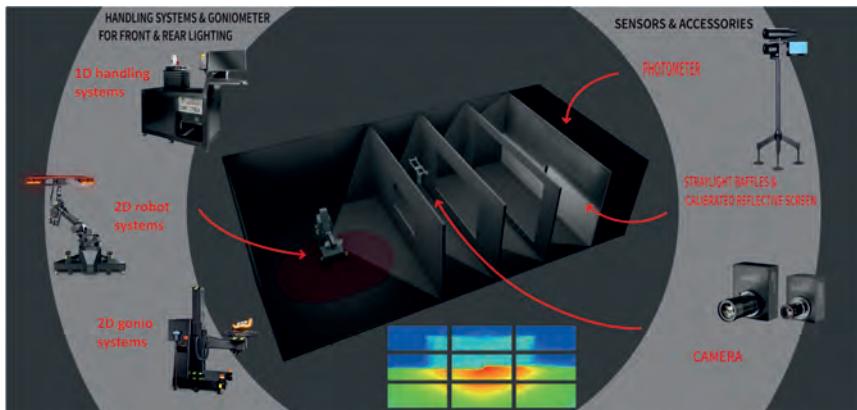


Fig. 6: Laboratory for combined camera-based screen goniophotometry

If horizontal expansion is sufficient, the LID can be widened as desired with a simple 1-axis handling system. If more information is needed vertically, there must be a rotation around two axes, and a robot or a goniometer is proposed. The latter offers every freedom and possibility to equip the laboratory with additional sequentially operating sensors. It offers the highest flexibility and additional advantages, such as the synchronization/calibration of the camera-based data with the photometer readings [5].

The three biggest advantages in a nutshell:

- 100 times faster than standard goniophotometry
- Fast PWM mode possible
- Sensor fusion (synchronization/calibration)

The three most important requirements in a nutshell:

- ILMD Type II with contrast quality indices << 1e-3
- Positioning accuracy of the handling system shall match the targeted image resolution
- Full characterization of the screen geometry and reflective properties

As already described in Chapter I - E on the GTB Task Force VLLTP, there is an increasing demand for a laboratory test procedure at vehicle level. CATARC (China Automotive Technology and Research Center), under which the safety standards of vehicles are also tested in

accordance with C-NCAP (Chinese New Care Safety Assessment Program), was also striving for progress in this area and therefore installed the world's first goniometer measurement laboratory for complete vehicles [6]. VELAS (VEhicle Lighting ASsessment System) can qualify headlamp performance as installed in the vehicle under laboratory conditions.

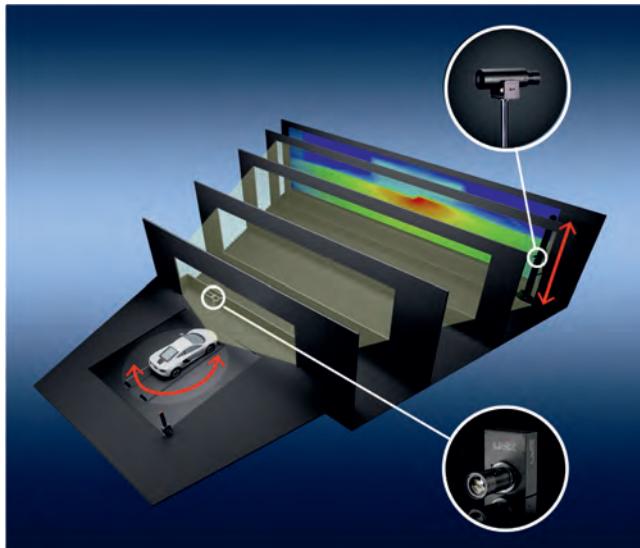


Fig. 7: Goniophotometer for VEhicle Lighting ASsessment (VELAS)

VELAS is also a combined goniophotometer system that works with both a camera and a photometer. In this system, the vehicle is positioned on a turntable, swiveling the entire vehicle horizontally, and thus also allowing the merging of horizontal camera LIDs. The platform has a positioning accuracy of  $\leq 0.01^\circ$  for vehicles up to 3.5 t.

The photometer is mounted on a free-standing 8 m high tower incorporating a linear axis at a distance of 25 m and can thus cover a vertical angle of  $7^\circ \leq V \leq 6^\circ$ . The positioning accuracy here is less than 1 mm, which corresponds in a distance of 25 m to  $0.002^\circ$ .

Once the vehicle has been placed on the turntable, the position of the illumination systems are accurately recorded by a tactile system. Of course, the exact vehicle geometry is incorporated when recording the vehicle lighting performance.

VELAS is a modular system allowing simpler deriveate measurement geometries which may be adapted to the user's requirements:

1. The 2-axis configuration as shown in Fig. 7, which allows the LID measurement directly and indirectly
2. The 1-axis configuration with camera and turntable for horizontal 1D-margining
3. The 0-axis configuration with only the camera for quick assessment of the central part of the LID (Fig. 8)

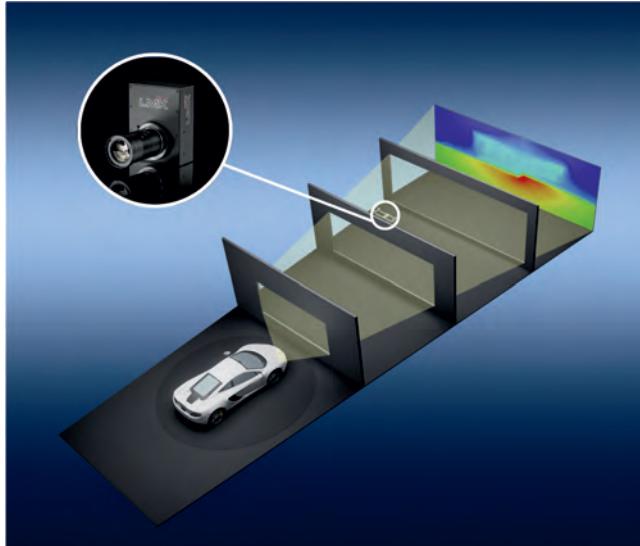


Fig. 8: Static setup for VEHicle Lighting ASsessment

- [1] <https://cie.co.at/about-cie, CIE 082:1990>
- [2] <https://www.gtb-lighting.org>
- [3] CIE244:2021 Characterization of Imaging Luminance Measurement Devices (ILMDs)
- [4] Thomas Reiners, 20th DVN Workshop, Munich 29.01.2020
- [5] EP 3167260B1 – Method for the Direction-Dependent Measurement of at least one Lighting or Radiometric characteristic Variable of an Optical Radiation Source, R. Hammer et al
- [6] Vehicle Lighting Assessment on Laboratory Level within C-NCAP, Th. Reiners et al, Darmstadt 2021, ISAL proceedings

# „Headlamp Safety Performance Rating“ – Ein Instrument zur Verbesserung der Verkehrssicherheit

Dr. Felix Freytag, Dr. Ernst-Olaf Rosenhahn,  
Marelli Automotive Lighting GmbH, Reutlingen

## Abstract

Today's passing beams for modern headlamp systems are a combination of a low beam with horizontal cut-off shape and an ADB lighting function only blocking out the oncoming and preceding cars. A critical glare level for other traffic participants can be avoided, while providing maximum range and illumination to the driver. All systems with ADB provide an advantage for the driver in comparison to the low beam function in terms of range and the size of the illuminated area and therefore an improvement of the road safety. Depending on the ADB's performance, ranging from only a few segments per headlamp to high-resolution headlamp systems, this safety-advantage is differing and should be considered by a rating system. So, for a complete, fair, and objective rating of modern headlamp systems all main lighting functions like low beam, ADB and high beam must be considered and evaluated performance oriented. The first rating system targeting all these goals is the Headlamp Safety Performance Rating (HSPR), which was first presented as an idea during the 13. ISAL symposium in 2019 [1].

Since this first proposal several experts from companies and Research Institutes around the world investigated and checked the method intensively. In the meanwhile, the improvements are implemented and discussed in the GTB SVP group in a structured way.

In this manuscript a short overview of the HSPR is presented as a tool for evaluating different performance level of modern headlight systems.

## 1. Motivation

Moderne Scheinwerfersysteme bestehen im Begegnungsfall mit anderen Verkehrsteilnehmern aus einer Kombination aus Abblendlicht mit einer horizontalen Hell-Dunkel-Grenze und einem blendfreien Fernlicht, welches nur den entgegenkommenden und vorausfahrenden Verkehr ausblendet. Eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer kann so bei maximaler Ausleuchtung der Straße vermieden werden. Alle blendfreien Fernlichter bieten einen Vorteil für den Fahrer gegenüber Standard Abblendlichtfunktionen in Bezug auf die Breite des Ausleuchtfeldes und der absoluten Reichweite, sodass die Verkehrssicherheit erhöht wird.

Blendfreie Fernlichter können sich deutlich voneinander unterscheiden, so bewegt sich die Auflösung der Systeme zwischen wenigen Segmenten und hochauflösenden Scheinwerfern mit ca. 1,3 Millionen Pixeln. Da der Beitrag dieser Systeme zur Verkehrssicherheit unterschiedlich ist, muss die Performance in einem Bewertungsverfahren abgebildet werden.

Für eine vollständige, faire und objektive Bewertung müssen zusätzlich zum blendfreien Fernlicht alle Lichtfunktionen inklusive Abblendlicht und Fernlicht berücksichtigt und ihrer Performance nach bewertet werden. Das erste Bewertungsverfahren, welches dieses Ziel realisiert, ist das Headlamp Safety Performance Rating (HSPR), welches erstmals als Idee beim 13. ISAL Symposium im Jahr 2019 vorgestellt wurde [1]. Seit diesem ersten Vorschlag haben etliche Experten aus Industrie und Forschung die Methode intensiv analysiert und geprüft. Im Rahmen der GTB SVP Arbeitsgruppe wurden die Verbesserungen in das Bewertungsverfahren übernommen und diskutiert.

Dieser Artikel stellt einen Überblick über das Bewertungsverfahren HSPR dar, um verschiedene Performancelevel aktueller Scheinwerfersysteme vergleichen zu können.

### Sicherheitsgewinn durch Blendfreies Fernlicht

Eine gute Ausleuchtung der Straße ist ein elementarer Bestandteil zur Verkehrssicherheit bei Nacht.

Verschiedene Organisationen wie IIHS, US-NCAP, C-NCAP, C-IASI usw. versuchen den Sicherheitsbeitrag von Scheinwerfersystemen zu quantifizieren, beschränken sich hierbei jedoch nur auf die Beschreibung und Bewertung von Abblendlicht und Fernlicht.

Seitdem 2012 das erste Fahrzeug mit blendfreiem Fernlicht in Europa homologiert wurde [2] ist diese Technologie und der zusätzliche Sicherheitsgewinn [3-9] jedoch nicht mehr auf den internationalen Fahrzeugmarkt wegzudenken.

Eine sicherheitsrelevante Verbesserung durch moderne Scheinwerfertechnologien ergibt sich aus einer besseren Ausleuchtung der Straße, da die Nutzungsdauer von dem Fernlicht sich drastisch erhöht. Während bei manuell geschaltetem Fernlicht die Fernlicht-Einschaltzeit bei ca. 5% liegt, erhöht sich bei einem automatisch geschalteten Fernlicht die Nutzungsdauer auf ca. 20% - mit dem blendfreien Fernlicht ist sogar eine mittlere Fernlicht-Nutzungsdauer von insgesamt ca. 70% möglich.

In Abbildung 1 ist eine nächtliche Fahrsituation im Begegnungsfall (200m entgegenkommender Verkehr) auf der Landstraße für drei verschiedene Ausleuchtungssituationen dargestellt. Durch das blendfreie Fernlicht (b und c) ist es im Gegensatz zum Abblendlicht (a) trotz Gegenverkehrs möglich, den Bereich, um das entgegenkommende Fahrzeug auszuleuchten und den weiteren Streckenverlauf besser zu erkennen. Deutlich ist aber auch ein Unterschied in

der Ausleuchtung zwischen dem „Einstiegs“-blendfreiem Fernlicht (b) und dem „high-end“ System (c) zu erkennen. Bei letzterem ist eine Zunahme der Reichweite am rechten Fahrbahnrand zu vermerken, sodass hier als einziges der drei Systeme die kommende Rechtskurve sichtbar wird.



Bild 1: Nächtliche Fahrsituation mit Gegenverkehr: a) Abblendlicht,  
b) blendfreies Fernlicht „Einstieg“, c) blendfreies Fernlicht „high-end“

## 2. Bewertungskriterien des Headlamp Safety Performance Ratings

Um den Sicherheitsgewinn eines Scheinwerfersystems von modernen Fahrzeugen bewerten zu können muss sowohl die blendfreien Fernlichtfunktion als auch das Abblendlicht und das Fernlicht betrachtet werden.

Ein Standard, um die Performance von Abblendlicht und Fernlicht zuverlässig bestimmen zu können wurde 2011 durch das CIE Technical Committee (TC4-45) [10] erarbeitet, welcher neben der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer die Reichweite der Lichtverteilungen von Abblendlicht und Fernlicht in festgelegten Zonen, wie z.B. am rechten und linken Fahrbahnrand, in der Seitenausleuchtung in unterschiedlichen Entfernen bestimmt. Leider wurden die Ergebnisse dieser einzelnen Reichweiten nie zu einem einfach zu lesenden Ergebnis zusammengefasst.

Im Rahmen des HSPR wird dieser Standard um eine leicht zu lesende Bewertung von Abblendlicht und Fernlicht erweitert (Standard...Premium+) (Abbildung 1) und zusätzlich als Basis verwendet, um eine Bewertung für das blendfreie Fernlicht zu ermöglichen.

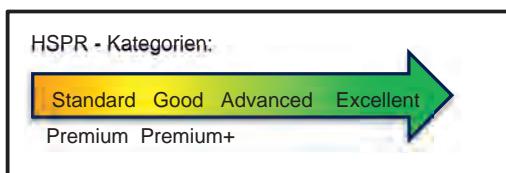


Bild 2: Kategorien des HSPRs

Um ein blendfreies Fernlicht bewerten zu können stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien dieses betrachtet werden kann.

Der sicherheitsrelevante Zugewinn an Reichweite bei der Fahrt mit blendfreiem Fernlicht spiegelt sich hierbei besonders in den Kriterien Zone A (Reichweite rechter Fahrbahnrand), Zone B (Reichweite in Kurve) und Zone C (Reichweite linker Fahrbahnrand) des CIE-Standards wider. Zusätzlich sind jedoch auch die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer im Schattenbereich, als auch der Gesamtlichtstrom relevant.

Im Gegensatz zu den Zonen aus dem CIE-Standard entfällt die Reichweite genau in der Mitte der Fahrbahn, da blendfreie Fernlichtsysteme hier abblenden, um Blendung zu vermeiden. Es werden entsprechend, auf der eigenen Fahrspur (Zone A' analog zum CIE-Standard) und auf der entgegenkommenden Fahrspur (Zone C') die Mittelwerte aus den 1lx, 3lx und 5lx-

Reichweiten für direkt am Fahrbahnrand und 1,5m rechts bzw. links daneben für die beiden Situationen ausgewertet (siehe Abbildung 3).

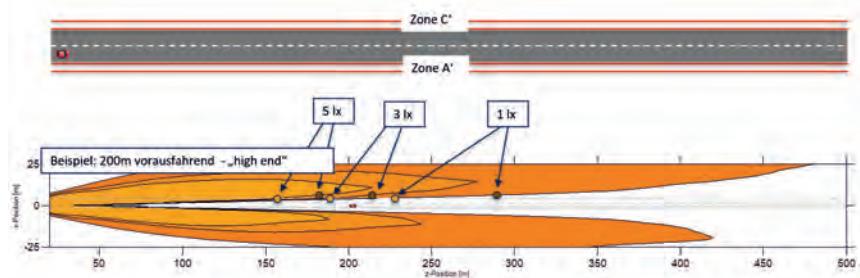


Bild 3: Vogelperspektive für das das „high-end“ Lichtsystem (vgl. Abbildung 1) für die Fahr-situation 200m vorausfahrend für. Die Reichweiten der 1lx, 3lx, 5lx Linien sind am linken Fahrbahnrand (Zone C') eingezzeichnet.

Da es sich bei blendfreien Fernlichtern um eine dynamische Lichtfunktion handelt, muss die Ausleuchtung der Straße in verschiedenen Nutzungssituationen untersucht werden. Ausgewählt werden hier sechs verschiedene Verkehrssituationen im Begegnungsfall, welche auf den Zulassungsszenarien aus ECE R149 [11] beruhen. Hier wird für entgegenkommenden und vorausfahrenden Verkehr die Ausleuchtung der Straße für Fahrzeuge in einer Entfernung von 50m, 100m und 200m betrachtet. Um für eine realitätsnahe Messung zu sorgen, wird der ausgeblendete Bereich um das entgegenkommende oder vorausfahrende Fahrzeug jeweils rechts und links um  $0,5^\circ$  vergrößert, damit Toleranzen der Sensorik und der Scheinwerferausrichtung, etc. berücksichtigt werden.

### 3. Vergleich von Einzellichtfunktionen

Im Folgenden soll anhand von drei blendfreien Fernlichtern verschiedener Performancelevel beispielhaft das Verfahren des HSP-Ratings erläutert werden.

In Abbildung 4 sind die Vogelperspektiven von Lichtverteilungen der drei blendfreien Fernlichter für die Fahrsituation 200m entgegenkommend inklusive der gemittelten Reichweiten in den Zonen A', B' und C' dargestellt.

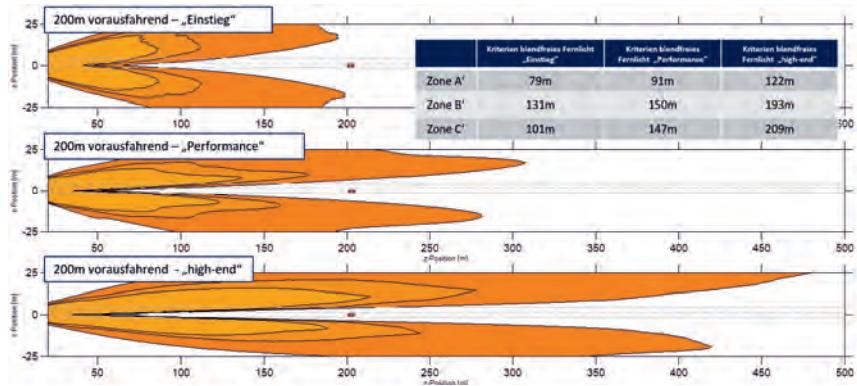


Bild 4: Vogelperspektive für Lichtverteilung drei verschiedener Performancelevel inklusive der gemittelten Reichweiten in Zonen A', B' und C'.

Beim Vergleich der Reichweiten wird der Sicherheitsgewinn je nach Performancelevel offensichtlich. Am rechten Fahrbahnrand steigt die Reichweite von 79m beim „Einstiegs“-System auf 122m beim „high-end“-System um über 50%, welches bei einer Geschwindigkeit von 100km/h einer zusätzlichen Reaktionszeit von 1s entspricht. Am linken Fahrbahnrand ist dieser Unterschied sogar noch größer und führt zu einer zusätzlichen Reaktionszeit von fast 3s. Allein anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass eine qualitative Unterscheidung der blendfreien Fernlichter in einem Bewertungsverfahren zwingend notwendig ist. Um einen objektiven Vergleich der Scheinwerfersystemen zueinander über alle Kriterien und Fahrsituationen zu ermöglichen, wurde im HSPR eine Datenbasis aus 20 Scheinwerfersystemen mit blendfreiem Fernlicht aufgebaut auf deren Grundlage alle weiteren Scheinwerfersysteme für alle sechs Fahrsituationen verglichen werden.

Aus diesen Daten wird sowohl der Durchschnitt ( $d$ ), als auch die Standardabweichung ( $\sigma$ ) aller Kriterien bestimmt. Erreicht ein Scheinwerfer genau den Durchschnitt  $d$ , so bekommt er für dieses Kriterium 1,5 Bewertungspunkte. Erreicht er  $d + \sigma$ , erhält er 2 Bewertungspunkte. Erreicht er nur  $d - \sigma$  so bekommt der Scheinwerfer 1 Punkt.

Anschließend werden die Bewertungspunkte aller ADB-Kriterien und der sechs Fahrsituationen aufsummiert, mit der Sicherheitsrelevanz eines Kriteriums gewichtet und normiert, um die Gesamtbewertung einer Lichtfunktion zu erhalten. Mit diesem Verfahren lässt sich nun für das blendfreie Fernlicht eine Bewertung erstellen. Analog hierzu ergibt sich eine Bewertung für das

Abblendlicht und Fernlicht, wobei hier alle Kriterien des CIE-Standards herangezogen werden und mit den Beispielsystemen des Standards eine Datenbank generiert wird.

In Abbildung 5 sind für die drei Beispielsysteme die Bewertungen der Einzellichtfunktionen dargestellt. Der vorher festgestellte Sicherheitsgewinn durch ein „high-end“ blendfreies Fernlicht spiegelt sich wie erwartet in einer Bewertung von Premium+ (5,02) im Vergleich zu der Bewertung Standard (0,66) des „Einstieg“-Systems wider. Das Abblendlicht und das Fernlicht folgen diesem Trend, wobei die Bewertungen zwischen hier „advanced“ und „premium+“ orientiert sind, da es sich bei Scheinwerfer mit blendfreien Fernlichtern heutzutage meistens um höhere Ausstattungsvarianten handelt.

		Kriterien:				
		blendfreies Fernlicht	normierte Bewertung	Effektive Performance	Bewertung verbal	
>5	„Einstieg“	„Einstieg“	0,66	101m	Standard	• Reichweiten am linken/rechten Fahrbahnrand
4-5	„Performance“	„Performance“	3,06	127m	Excellent	• Reichweite in Kurven
3-4	„high-end“	„high-end“	5,02	149m	Premium+	• Lichtstrom
						• Blendung im Schattenbereich
		Abblendlicht	normierte Bewertung	Effektive Performance	Bewertung verbal	
2-3	„Einstieg“	„Einstieg“	3,40	84m	Excellent	• Reichweiten am linken/rechten Fahrbahnrand
1-2	„Performance“	„Performance“	3,99	87m	Excellent	• Reichweite in Kurven
<1	„high-end“	„high-end“	5,29	95m	Premium+	• Lichtstrom
						• Blendung des Gegenverkehrs
		Fernlicht	normierte Bewertung	Effektive Performance	Bewertung verbal	
	„Einstieg“	„Einstieg“	2,06	165m	Advanced	• Breite des Ausleuchtung in 10m bis 50m Entfernung
	„Performance“	„Performance“	4,26	191m	Premium	
	„high-end“	„high-end“	5,39	204m	Premium+	
						• Reichweiten der 3x-Linie in ausgewählte Richtungen am 100m-Schirm

Bild 5: Bewertung und Effektive Performance der Einzellichtfunktionen inklusive der relevanten Kriterien für drei verschiedene Systeme inklusive blendfreiem Fernlicht.

Ebenfalls wird in Abbildung 5 die Effektive Performance angegeben, welche einer physiologisch korrigierten mittleren Reichweite über verschiedene Kriterien entspricht, um so zwischen der absoluten Performance unter den Lichtfunktionen vergleichen zu können.

#### 4. Von den Einzellichtbewertungen zu einer Scheinwerferbewertung

Um aus den Bewertungen der Einzellichtfunktionen eine Gesamtscheinwerferbewertung zu erhalten wird die Effektive Performance der Einzellichtfunktionen mit den Einschaltdauern zu einer Mittleren Effektiven Performance gewichtet. Hierbei ist relevant, ob das Fernlicht manuell oder automatisch geschaltet wird, oder ob ein blendfreies Fernlicht vorhanden ist, da dies

einen entscheidenden Einfluss auf die Einschaltdauern von Abblendlicht und Fernlicht hat (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Einschaltdauer für Abblendlicht, Fernlicht und blendfreies Fernlicht (ADB) für manuellen und automatischen Betrieb.

	<b>Abblendlicht</b>	<b>Fernlicht</b>	<b>Blendfreies Fernlicht</b>
Manuell geschaltetes Fernlicht	95%	5%	-
Automatisch geschaltetes Fernlicht	80%	20%	-
Blendfreies Fernlicht	30%	20%	50%

Die drei Beispielsysteme enthalten alle ein blendfreies Fernlicht, daher folgt für die Mittleren Effektive Performance:

$$\text{„Einstieg“: } 0,3 \cdot 84\text{m} + 0,2 \cdot 165\text{m} + 0,5 \cdot 101\text{m} = 109\text{m}$$

$$\text{„Performance“: } 0,3 \cdot 87\text{m} + 0,2 \cdot 191\text{m} + 0,5 \cdot 127\text{m} = 128\text{m}$$

$$\text{„high-end“: } 0,3 \cdot 95\text{m} + 0,2 \cdot 204\text{m} + 0,5 \cdot 149\text{m} = 144\text{m}$$

Die Mittlere Effektive Performance wird nun einer Gesamtbewertung zugeordnet, welche sowohl als Zahl, als auch als verbale Bewertung (Standard...Premium+) ausgedrückt werden kann (siehe Abbildung 6). Eine Gesamtbewertung von 10 (standard) entspricht einem Halogensystem mit manuellem Fernlicht nach heutigen Standards und eine Gesamtbewertung von 50 (premium+) das obere Limit heutiger hochauflösender Scheinwerfersysteme. Somit lässt sich die gesamte Bandbreite von Scheinwerfersystemen durch das Bewertungsverfahren abbilden. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Skala nach oben hin offen gestaltet ist, sodass auch bei zukünftigen Technologiesprüngen eine faire Bewertung möglich sein wird.

Aus der Mittleren Effektiven Performance der drei Beispielsysteme folgt nach Abbildung 6 die Gesamtbewertung des Scheinwerfersystems und die Einteilung in die jeweilige Klasse.

Die drei Beispielsysteme erhalten folgende Wertungen:

„Einstieg“: 32 (advanced)

„Performance“: 44 (premium)

„high-end“: 54 (premium+)

Wie zu erkennen ist spiegelt sich die eingangs getroffene subjektive Einschätzung der Scheinwerferbewertung auch in dem HSP-Rating wider. Das „Einstieg“-System erhält die Gesamtwertung „advanced“, wohingegen das „Performance“-System mit „premium“ und das „high-end“-System sogar mit „premium+“ bewertet wird.

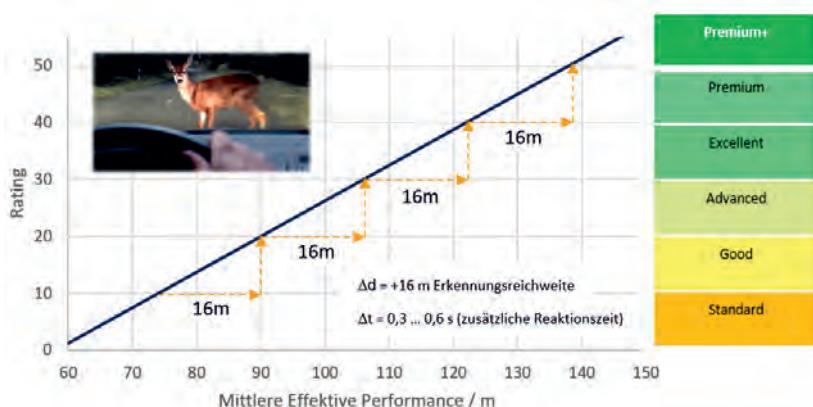


Bild 6: Zuordnung der Bewertung zur Mittleren Effektiven Performance. Eine Bewertungsstufe führt zu einer Zunahme der Reaktionszeit um ca. 0,6s.

Da es sich bei den drei untersuchten Systemen um Scheinwerfer mit blendfreiem Fernlicht handelt bilden diese eher das obere Spektrum des gesamten Performancelevels ab (siehe Einzelbewertungen Abblendlicht/ Fernlicht Abbildung 5). Daher wurden neben den drei Systemen 20 weitere Scheinwerfersysteme verschiedener Technologien von Halogen über Xenon- bis hin zu statischen und dynamischen (blendfreien) LED-Systemen mit dem HSPR untersucht (Abbildung 7). Es ist zu sehen, dass durch moderne Scheinwerfer das gesamte Bewertungsspektrum von Standard bis Premium+ abgebildet wird und sich die Systeme nach Technologie aufteilen, jedoch ein gewisser Überlapp zwischen den besten Scheinwerfern

eines einfacheren Systems und den schwächeren Scheinwerfern eines komplexeren Systems besteht. Beispielsweise erhält das beste automatisch geschaltete Xenon-System eine ähnliche Bewertung wie ein einsteig blendfreies Fernlicht System.

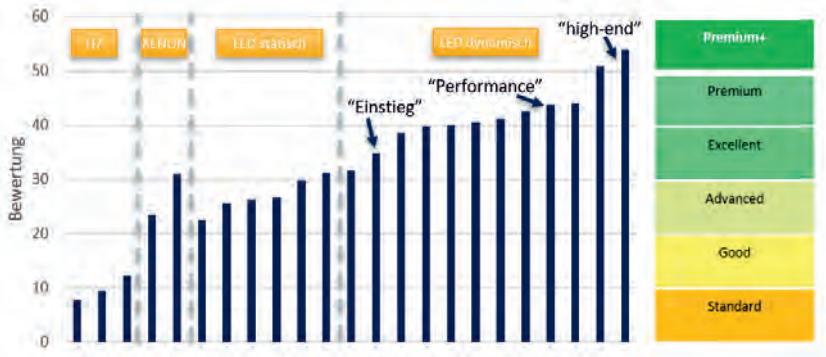


Bild 7: Bewertung von Halogen- (manuell geschaltetes Fernlicht), Xenon- (automatisch geschaltetes Fernlicht), statischen LED (automatisch geschaltetes Fernlicht) - und blendfreien Scheinwerfersystemen

Aus der Bewertung können außerdem Rückschlüsse auf den Sicherheitszugewinn je nach Bewertungskategorie gezogen werden (siehe Abbildung 6). Bei einer Geschwindigkeit von 100km/h resultiert eine zusätzliche Reaktionszeit je Bewertungskategorie von ca. 0,6s. Der Sprung von einem Standardscheinwerfersystem (10 Punkte) zu einem Premium+-Scheinwerfersystem (50 Punkte) kann somit für die Sichtbarkeit von Objekten am linken und rechten Fahrbahnrand ein Zugewinn an Reaktionszeit von 2,4s bedeuten.

#### 4. Ausblick und Zusammenfassung

In den letzten Jahren haben etliche Experten aus Industrie und Forschung die Methode im Rahmen der GTB SVP Arbeitsgruppe intensiv analysiert, geprüft. Durch stetige Weiterentwicklung ist das oben beschriebene objektive Bewertungsverfahren für Scheinwerfersysteme inklusive des blendfreien Fernlichts entstanden.

In enger Kooperation wurde von der Technischen Universität Darmstadt eine HSPR-Software entwickelt, um die Methode zugänglich für eine Vielzahl von möglichen Anwendern zu machen (OEMs, Setmaker, Forschungsinstitute, etc.). Diese Open Source Software wird durch alle

Mitglieder der GTB SVP seit Juli 2021 intensiv getestet und wird bald für jeden interessierten Nutzer frei verfügbar sein.

Es ist geplant, dass die TU Darmstadt als zentrales Institut Bewertungsdaten von neuen Fahrzeugmodellen sammelt, prüft und bewertet, sodass eine breite Datenbank für eine Vielzahl von Anwendern wie Journalisten oder dem Endkunden entsteht. Über eine Internetseite können dann die Bewertungen von den neusten Fahrzeugmodellen für alle interessierten Nutzer weltweit zugänglich gemacht werden, sodass eine Kundenentscheidung mit Blick auf die Sicherheit bei Nachtfahrten getroffen werden kann. Von Journalisten können die Bewertungsergebnisse verwendet werden, um die Präsenz des Themas Scheinwerfer in den Medien zu stärken und die Vorteile von blendfreien Fernlichtern zu kommunizieren. Hierdurch wird auf den Beitrag von Scheinwerfern zur Fahrsicherheit aufmerksam gemacht.

Die Vielzahl der Beiträge zum Thema HSPR im ISAL-Symposium 2022 [12-15] inklusive einer Podiumsdiskussion zeigt das öffentliche Interesse und die Notwendigkeit für ein objektives Bewertungsverfahren für Scheinwerfersysteme inklusive blendfreiem Fernlicht. Bei den Beiträgen sei sowohl auf die Studie der TU-Darmstadt [13], welche die Reichweiten des HSPRs mit dem Erkennungsreichweiten in einem realen Fahrversuch vergleicht, als auch auf die Untersuchungen der AUDI AG hingewiesen [14], welche den Nutzen des HSPRs für einen OEM und deren Modulportfolio zeigt.

## 5. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich das Bewertungsverfahren in folgende sechs Punkte darstellen:

- (1) Das Ratingsystem ermöglicht es auf qualitative Weise erstmalig neben Abblendlicht und Fernlicht auch das blendfreie Fernlicht zu bewerten und eine Gesamtbewertung für das Scheinwerfersystem zu erhalten.
- (2) Das objektive Ergebnis quantifiziert das Sicherheitsniveau, das durch das Scheinwerfersystem während der nächtlichen Fahrt erreicht wird – eine Bewertungskategorie entspricht einer Zunahme der Reaktionszeit von ca. 0,6s.
- (3) Weltweite Scheinwerferexperten haben zur stetigen Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens beigetragen.
- (4) Die Methode basiert auf Labormessungen und führt damit zu repräsentativen Ergebnissen, die einen direkten und objektiven Vergleich verschiedener Scheinwerfersysteme ermöglichen.
- (5) Die Bewertung beruht auf einer umfangreichen Datenbasis von Scheinwerfersystemen, Versuchsreihen, verlässliche Ergebnisse für alle Systeme erreicht werden.
- (6) Das Ergebnis der Bewertung wird für den Endkunden einfach (Standard ... Premium+) und frei zugänglich gestaltet und ist somit ein Instrument zur Verbesserung der Verkehrssicherheit.

## 6. Literatur

- [1] LANGHAMMER, G., Ideas for including ADB Functionality into the TC4-45 Assessment System, Proc. 13th International Symposium on Automotive Lighting, 2019.
- [2] NEUMANN, R., Adaptive Driving Beam - Visibility Improvement versus Glare, SAE Technical Paper 2014-01-0436, 2014.
- [3] HAMM, M., Research Status on ADB Safety Features, Proc. 12th International Symposium on Automotive Lighting, 2017
- [4] DREIER, B.; ROSENHAHN, E. O., Camera Controlled Adaptive Cut-off and Adaptive Partial High Beam Applications, Proceedings of the 9th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2009.
- [5] SPRUTE, J. H., Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen, Doktorarbeit Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [6] TOTZAUER, A., Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht, Herbert Utz Verlag, 2013.
- [7] ZYDEK, B., Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen, Doktorarbeit Technische Universität Darmstadt, 2014.
- [8] KOBBERT, J.; KOSMAS, K.; KHANH, T. Q., Glare-free high beam optimization based on country road traffic simulation, Lighting Research & Technology, 2019.
- [9] AUSTERSCHULTE, A.; DREIER, B.; ROSENHAHN, E.O. Analysis of Safety Aspects for LED Matrix High Beam Functions, 10th International Symposium on Automotive Lighting, 2013.
- [10] CIE – Commission Internationale d’Éclairage: CIE 188/E:2011 Vehicle Headlighting Systems Photometric Performance – Method of Assessment. Wien, 2011
- [11] UNECE – Economic Commission for Europe of the United Nations: Regulation No 149 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE), Uniform provisions concerning the approval of road illumination devices (lamps) and systems for power-driven vehicles, 2021.
- [12] FREYTAG, F.; ROSENHAHN, E. O., Headlamp Safety Performance Rating (HSPR): Improved Method triggered by GTB, Proc. 14<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting, 2021.
- [13] ERKAN, A; HOFFMANN, D.; SINGER, T., KHANH, T.Q., Field Test Validation of the Headlamp Safety Performance Rating (HSPR), Proc. 14<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting, 2021.

- [14] HAMM, M.; HINTERWAELDER C.; KOBBERT J., Headlamp Performance Rating System and Benefit for OEM Model Portfolio, Proc. 14<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting, 2021.
- [15] HINTERWAELDER, C.; KOBBERT J.; HAMM, M., The Aiming of Headlamps in Real Life and Resulting In-fluences on Benchmarks and Road Users, Proc. 14<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting, 2021.

# Dynamische Bodenprojektionen

## Experimentelle Untersuchungen bzgl. photometrischer Anforderungen

Dr. Felix Maier, Dr. Ulrike Schröder,  
Marelli Automotive Lighting and Sensing Reutlingen GmbH, Reutlingen

### 1 Kurzfassung

Bodenprojektionen im Nahfeld des Fahrzeugs gewinnen derzeit aufgrund der Vielzahl an Einsatz- und Gestaltungsmöglichkeiten stark an Bedeutung. Im Fokus stehen dabei drei große Anwendungsbereiche: Verbesserung der Verkehrssicherheit, Umsetzung von Kommunikationsaufgaben, Realisierung von Begrüßungsszenarien. Während viele Aspekte dieser neuen Applikation, wie beispielsweise die Fahrzeugintegration oder die möglichen Technologien zu deren Realisierung, bereits umfassend diskutiert werden, ist bislang der Einfluss des Bodenbelags als eigentliche Projektionsfläche vergleichsweise wenig betrachtet worden. In dieser Veröffentlichung werden erstmals die Ergebnisse quantitativer Untersuchungen zum Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Leuchtdichte verschiedener Bodenprojektionen vorgestellt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse einer umfangreichen Probandenstudie zum Einfluss verschiedener Faktoren wie Bodenbeschaffenheit, Dynamik bzw. Farbigkeit der Projektionen und Art der Betrachtungssituation auf die Sichtbarkeit der Bodenprojektionen vorgestellt.

### 2 Abstract

Ground projections in the near field of the vehicle are currently becoming increasingly important due to the large number of applications and design options. The focus is on three major areas of application: improving road safety, implementing communication tasks, and implementing welcome scenarios. While many aspects of this new application, such as vehicle integration or the possible technologies for its realization, are already being discussed extensively, the influence of the ground surface characteristics as actual projection surface has so far been barely considered. This publication presents for the first time the results of quantitative studies on the influence of the ground surface characteristics on the luminance of different ground projections. In addition, the results of an extensive subject study on the influence of various factors such as ground surface characteristics, dynamics resp. color of the projections, and type of observation situation on the visibility of the ground projections are presented.

### 3 Einleitung

Auf dem Weg zur Realisierung einer 360°-Beleuchtung des Autos spielen Bodenprojektionen im Nahfeld des Fahrzeugs eine Schlüsselrolle. Die große Anzahl möglicher Anwendungsfälle für Bodenprojektionen kann dabei grob in drei Kategorien unterteilt werden: Begrüßungs- bzw. Verabschiedungsszenarien, Sicherheitsszenarien und Kommunikationsmittel (Bild 1). Begrüßungsszenarien können Logoprojektionen, personalisierte Begrüßungen oder Orientierungslichter sein; Bodenprojektionen aus dem Bereich „Sicherheitsszenarien“ können ein auf den Boden projizierter erweiterter Blinker oder auch Warnungen zu einem bestimmten Zweck sein. So würden Warnungen an Radfahrer, z.B. über ein geplantes Abbiegen des Fahrzeugs, die Sicherheit dieser deutlich erhöhen. Dies ist insbesondere in Anbetracht der derzeit stetig zunehmenden Zahl tödlicher Unfälle mit E-Bike-Fahrern erstrebenswert [1]. Auch im aktuellen Regelungsprozess nehmen die Sicherheitsaspekte von Bodenprojektionen einen großen Rahmen ein [2, 3].



Bild 1: Die drei Hauptkategorien anwendungsspezifischer Bodenprojektionen

Grundsätzlich können Bodenprojektionen mit unterschiedlichem dynamischem Verhalten realisiert werden. Man unterscheidet zwischen statischen bzw. semidynamischen Bodenprojektionen, bei denen in der Regel ein festes Bild (bzw. einige feste Bilder) angezeigt wird, und dynamischen Bodenprojektionen, bei denen eine Vielzahl von mehrfarbigen, personalisierbaren und aktualisierbaren Szenarien in Form von Videos dargestellt werden können. Verbunden mit der angestrebten Dynamik bieten sich unterschiedliche Technologien zur Realisierung an, die von einfachen Gobo-Projektoren bis hin zu komplexen DMD-basierten Projektoren reichen [4].

Damit Bodenprojektionen für Menschen bzw. Kameras wahrnehmbar sind, müssen diese bestimmten Kriterien genügen. Hier sind in erster Linie die intrinsischen Eigenschaften wie Abbildungsqualität und Lichtstärke zu nennen. Jedoch können auch äußere Eigenschaften wie die Umgebungshelligkeit und die Beschaffenheit des Bodenbelags einen großen Einfluss auf die Sichtbarkeit der Bodenprojektionen haben.

Der Einfluss der Umgebungshelligkeit auf die Sichtbarkeit von Bodenprojektionen ist bereits quantitativ recht gut untersucht. So ist bei direkter Sonneneinstrahlung eine Darstellung kaum zu erkennen. Inwieweit bei geringeren Beleuchtungsstärken Bodenprojektionen zu erkennen sind, hat Gerolf Kloppenburg in seiner Dissertation „Scannende Laser-Projektionseinheit für die Fahrzeugfrontbeleuchtung“ untersucht und Mindestwerte für die Sichtbarkeitsgrenze definiert [5]. Hiernach sind bei mittäglicher Sonneneinstrahlung, aber auch noch bei bedecktem Himmel, Beleuchtungsstärken von einigen hundert bis mehreren Tausend Lux, zu Beginn der Dämmerung jedoch nur noch von einigen Zehn Lux, notwendig (Bild 2). Unter diesen Bedingungen sind Bodenprojektionen mit den bestehenden Technologien bereits heute gut sichtbar. Sollen allerdings Warnungen oder Informationen transportiert werden, so müssen die angegebenen Werte als absolute Mindestwerte angesehen werden und in der Praxis übertroffen werden.

Die Beschaffenheit des Untergrundes spielt als Projektionsfläche für die Bodenprojektionen eine große Rolle. Dabei sind die Einflussfaktoren allerdings sehr vielfältig. So reichen die vorstellbaren Farben des Untergrundes, auf denen Bodenprojektionen dargestellt werden sollen, von sehr hellem Beton über fast schwarzen Asphalt bis hin zu grünen Rasenflächen, braunem Herbstlaub oder weißen, schneedeckten Straßen. Darüber hinaus kann die Struktur der Untergrundes einen großen Einfluss auf die dargestellten Bodenprojektionen haben: ebene Betonflächen und rau, geteerte Straßen können ebenso als Projektionsfläche dienen wie auch gepflasterte Wege, Rasen, Herbstlaub oder schlicht eine nasse Fahrbahn.

In dieser Arbeit werden erstmals quantitative Untersuchungen zu den Auswirkungen verschiedener Untergründe auf die Darstellung und Sichtbarkeit verschiedener Bodenprojektionen dargestellt. Dazu werden in Abschnitt 4 die Ergebnisse von Leuchtdictemessungen in Abhängigkeit des Untergrundes für verschiedene Betrachtungswinkel präsentiert und diskutiert. In Abschnitt 5 wird eine Probandenstudie vorgestellt, in der untersucht wurde, inwieweit die Sichtbarkeit von Bodenprojektionen durch den Untergrund, durch die Farbigkeit und durch die Dynamik der Projektion beeinflusst wird.

Tabelle 3.1: Erforderlicher Projektions-Lichtstrom für unterschiedliche Bildgrößen und Umgebungsbeleuchtung

Situation	Beleuchtungsstärke der Umgebung in lx	Erforderliche Beleuchtungsstärke Projektion in lx	Bildgröße in m <sup>2</sup>	Lichtstrom Projektion in lm
Mittagssonnen Sommer	90.000	2.000	20	40.000
			10	20.000
			5	10.000
Bedeckter Himmel	19.000	600	1	2.000
			20	12.000
			10	6.000
Beginn Dämmerung	750	30	5	3.000
			1	600
			20	600
Scheinwerferlicht	15	1,2	10	300
			5	150
			1	30
Straßenbeleuchtung	9,5	1	20	24
			10	12
			5	6
Mondlicht	0,3	0,6	1	1,2
			20	20
			10	10
			5	5
			1	1
			20	12
			10	6
			5	3
			1	0,6

Bild 2: Mindestbeleuchtungsstärken bei gegebenen Umgebungshelligkeiten [5]

#### 4 Änderung der Leuchtdichte bei unterschiedlichen Untergründen

Für die Untersuchung wurden verschiedene statische Szenarien auf verschiedene Bodenbeläge projiziert. Dabei wurde die resultierende Leuchtdichte unter verschiedenen Beobachtungswinkeln bestimmt.

##### 4.1 Grundlagen der Untersuchung

Zur Erzeugung der Bodenprojektionen wurde in allen dargestellten Untersuchungen ein kommerziell erhältliches „Evaluation Module (EVM)“ der Firma Texas Instruments Inc. des Typs „DLP3021LEQ1EVM“ verwendet [6]. Hierbei handelt es sich um den Prototyp eines DMD-basierten Miniprojektors, der speziell für die Applikation in Kraftfahrzeugen entwickelt wurde. Je nach Anwendung können verschiedene statische oder dynamische Szenarien auf den Projektor aufgespielt werden. Die verwendeten Einstellungen entsprechen den Standardeinstellungen bei Auslieferung: Die Bildwiederholrate liegt bei 25 Bildern pro Sekunde, der LED-Strom bei 568 mA und der „duty cycle“ der drei Lichtfarben bei Rot 34%, Grün 40.8% und Blau 25.2%.

Damit ergibt sich bei der Darstellung eines kompletten Weißfeldes ein über sechs Module gemittelter Lichtstrom von  $12.3 \pm 0.8$  Lumen bzw. eine mittlere Lichtstärke von  $270.8 \pm 15.8$  cd, welches einer Beleuchtungsstärke von 270 Lux in einer Entfernung von 1 m entspricht.



Bild 3: Beispielhafte Darstellung des in den Untersuchungen verwendeten Moduls „DLP3021LEQ1EVM“ der Firma Texas Instruments Inc.

Bildquelle: <https://www.ti.com/tool/DLP3021LEQ1EVM?keyMatch=EVM%203021>

Als Untergründe wurden Aluminiumplatten ( $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ) in verschiedenen Graustufen und unterschiedlichen Strukturpulvern lackiert. Darüber hinaus wurden zwei Musterplatten für Asphaltimitationen verwendet, die aus einer OSB-Platte mit aufgeklebtem schwarzgrauem Granulat bestanden. Bei einer der beiden Platten ist das Granulat zudem mit einer schwarzgrauen Farbe gebunden. Beide Untergründe sind sehr rau und kommen in der Farbe einem aktuellen Straßenbelag sehr nahe (Bild 4).

Die Leuchtdichte einer dargestellten Bodenprojektion ist das Zusammenwirken der Beleuchtungsstärke der verwendeten Lichtquelle und der Reflektivität der Oberfläche. Zur Vereinfachung wird im Folgenden teilweise von der Lichtstärke gesprochen, meint aber stets die erwähnte Kombination. Mit Hilfe einer mobilen Leuchtdichtekamera (LMK3, Technoteam Bildverarbeitung GmbH) wurde die Leuchtdichte für verschiedene Untergründe bei diversen Beleuchtungswinkeln ermittelt. In den folgenden Abschnitten wird näher auf diese Messungen eingegangen.

Bezeichnung	Details
Weiß glatt	MIX 015 Weiß HP Hochglanz mit 50% Standocryl 2K Matt
Weiß mittel	MIX 015 Weiß HP Hochglanz mit 50% Standocryl 2K Matt und 5% Zweihorn Strukturpulver mittel
Weiß rau	MIX 015 Weiß HP Hochglanz mit 50% Standocryl 2K Matt und 5% Zweihorn Strukturpulver grob
Grau	2K Standox Pantone 425 mit 5% Zweihorn Strukturpulver mittel
Schwarz	Pur Matt Tiefschwarz RAL 9005-GL mit 5% Zweihorn Strukturpulver mittel
Asphalt matt	Körnung ca. 5mm, grauschwarz, mit Harz gebunden
Asphalt rau	Körnung ca. 5mm, grauschwarz
Asphalt rau nass	Körnung ca. 5mm, grauschwarz, mit Wasser befeuchtet

Bild 4: Übersicht aller verwendeten Untergründe. Die unterschiedlichen Lack- und Strukturpulvertypen, sowie die Körnungsgrößen, sind angegeben.

#### 4.2 Messung der Leuchtdichte parallel zur optischen Achse des Beleuchtungssystems

In einer ersten Voruntersuchung wurde die Leuchtdichte für eine Auswahl der verschiedenen Untergründe unter Beleuchtung des EVM gemessen. Dazu wurden die Untergründe mit einem Weißbild (alle Spiegel des DMD in der Stellung „an“) senkrecht in einem Abstand von 0.9 m beleuchtet (resultierende Bildgröße ca. 0.29 m x 0.16 m) und die Leuchtdichtekamera orthogonal zur beleuchteten Fläche und damit parallel zur optischen Achse des EVM ausgerichtet.

Bedingung	durchschnittliche Lichtstärke [cd]
WEISS MITTEL	11.68
GRAU	8.06
SCHWARZ	4.74
ASPHALT RAU	0.86
ASPHALT MATT	0.72

Bild 5: Durchschnittlich gemessene Lichtstärken verschiedener Untergründe bei einer Beleuchtung mit einem Weißbild

Die Ergebnisse (Bild 5) zeigen durchschnittliche Lichtstärkewerte von 11.68 cd bis 0.72 cd. Die Werte nehmen mit dem Graustufenwert des Untergrundes ab: Eine schwarze Oberfläche zeigt eine deutlich kleinere mittlere Lichtstärke als eine weiße Oberfläche mit gleicher Struktur (-59%). Trotz ihrer helleren Farbe sind die Untergründe mit sehr viel rauerer Oberfläche (Asphalt rau und Asphalt matt) nicht in der Lage, die mittleren Lichtstärken der schwarz lackierten Aluplatte zu übertreffen und liegen nochmals um 81% darunter. Dies ist insofern erstaunlich, als dass die Struktur einen sehr viel größeren Einfluss auf die mittlere Lichtstärke zu haben scheint als die Oberflächenfarbe.

#### 4.3 Messung der Leuchtdichte unter verschiedenen Betrachtungswinkeln

In diesem Teil der Arbeit wurde eine typische Situation, in der eine Bodenprojektion genutzt werden kann, nachgestellt. Das Projektionsmodul wurde so eingestellt, als ob es in einem Fahrzeugscheinwerfer eingebaut wäre, wozu eine typische Anbauhöhe von 0.86 m gewählt wurde. Das resultierende Ausleuchtfeld betrug ca. 0.8 m x 0.9 m, wobei die Form eines Trapezes zu einer vorderen Kantenbreite von lediglich 0.55 m führte.

Dargestellt wurden drei unterschiedliche Bodenprojektionen: Ein Weißbild, das den kompletten Ausleuchtbereich des Projektionsmoduls darstellt, dunkelgelbe Chevrons, die eine Abbiegeabsicht des Fahrzeugführers signalisieren und deren Farbe den ECE-amber-Vorgaben entspricht, sowie eine Abbiegewarnung für Radfahrer, die neben dem Fahrzeug am Straßenrand bzw. auf einem Fahrradstreifen fahren (Bild 6).



Bild 6: Darstellung der verwendeten Bodenprojektionen. Links: ECE-amber konforme Chevrons. Rechts: Abbiegewartung an Radfahrer

Zudem wurden drei unterschiedliche Beobachtungssituationen gewählt (Bild 7):

1. Die erste Einstellung soll einen Radfahrer nachahmen, der parallel zum Fahrzeug am Straßenrad fährt und die Bodenprojektion in einem Winkel von 45° zur Fahrzeugachse sieht. Dazu wurde die Leuchtdichtekamera in 1.12 m Höhe orthogonal zur optischen Achse des Projektionsmoduls angebracht.
2. Um die Ansicht eines Fußgängers auf dem Bürgersteig nachzustellen, wurde die Leuchtdichtekamera ebenfalls in 1.12 m Höhe angebracht, jedoch frontal zur optischen Achse des Projektionsmoduls.
3. Die dritte Beobachtungsposition soll den Fahrer eines anderen Kraftfahrzeuges imitieren. Dazu wurde die Leuchtdichtekamera im Ausfallwinkel der Beleuchtung in lediglich 0.71 m Höhe, aber ebenfalls frontal zur Projektionsrichtung, angebracht.

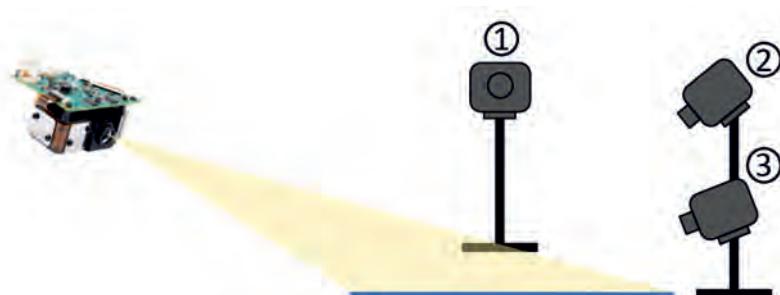


Bild 7: Darstellung des Versuchsaufbaus mit den drei Beobachtungssituationen

Auch für diese Untersuchungen wurden Leuchtdichten gemessen und die mittleren Lichtstärken berechnet. Die Abbildungen (Bild 8 - Bild 10) zeigen die gemessenen Werte aller drei

Beobachtungssituationen in einer einzelnen Grafik. Dazu werden die verschiedenen Untergründe durch Kategorien und die drei dargestellten Symbole durch Balken verschiedener Farben dargestellt. Die Werte der mittleren Lichtstärken reichen von 0.04 cd bis hin zu 37.3 cd. Die Abbildungen zeigen kaum Unterschiede zwischen den Beobachtungssituationen 1 (Perspektive Radfahrer) und 2 (Perspektive Fußgänger), jedoch eine deutliche Zunahme der mittleren Lichtstärke, sobald die Leuchtdichtekamera im Ausfallwinkel der Beleuchtung stand. Dies zeigt sehr anschaulich, dass der Betrachtungswinkel, aber auch die Reflexionseigenschaften der Untergründe von maßgebender Rolle sind. Speziell die Zunahme der mittleren Lichtstärke im Falle des schwarzen Untergrundes ist stark: In Beobachtungssituation 1 ist die gemessene mittlere Lichtstärke mit  $0.01 \pm 0.01$  cd noch vernachlässigbar, nimmt in Beobachtungssituation 2 schon etwas zu ( $0.29 \pm 0.26$  cd), ist aber in Situation 3 ( $26.78 \pm 12.04$  cd) zusammen mit dem grauen Untergrund ( $27.50 \pm 1.43$  cd), der einen sehr ähnlichen Verlauf aufweist, der Topwert. Dies ist ausschließlich auf die Reflexionseigenschaften der Oberflächen zurückzuführen.

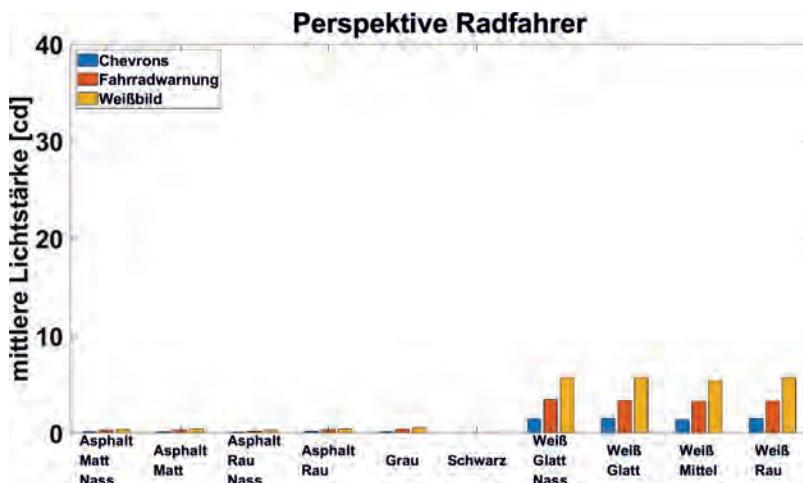


Bild 8: Mittlere Lichtstärken für die „Perspektive Radfahrer“

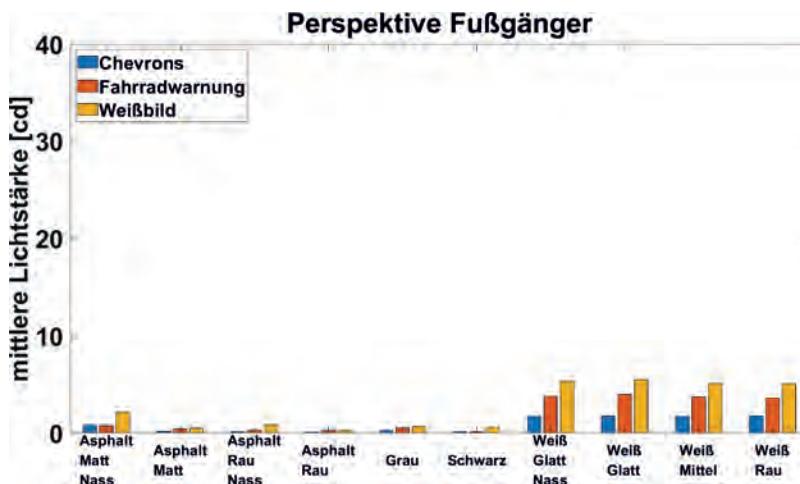


Bild 9: Mittlere Lichtstärken für die „Perspektive Fußgänger“ auf dem Bürgersteig

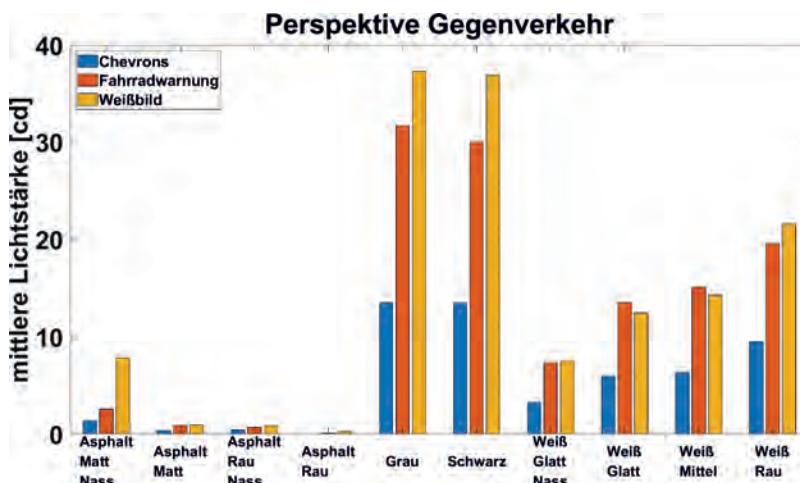


Bild 10: Mittlere Lichtstärken für „die Perspektive Gegenverkehr“

Generell ist über alle drei Beobachtungssituationen hinweg der weiße Untergrund jener mit der höchsten mittleren Lichtstärke, das so zu erwarten war. Auch eine aufgebrachte Nässe auf den Asphalt erhöht die mittlere Lichtstärke, wie in Bild 9 und Bild 10 die Messungen zu „Asphalt matt“ vs. „Asphalt matt nass“ bzw. „Asphalt rau“ vs. „Asphalt rau nass“ zeigen.

Betrachtet man die gemessenen mittleren Lichtstärken der einzelnen Bodenprojektionen, Weißbild, Chevrons und Fahrradabbiegewarnung, so sind deren Verhältnisse untereinander stets ähnlich. Dies ist auf die unterschiedlichen Beleuchtungsstärken der Szenarien zurückzuführen. Die einzige, erwähnenswerte Ausnahme bilden für die Beobachtungssituation 3 die Chevrons auf grauem und schwarzem Untergrund: Die gemessene mittlere Lichtstärke fällt hier, im Vergleich zum Weißbild und der Fahrradabbiegewarnung, deutlich ab. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass hier der Einfluss der Wellenlängenabhängigkeit des Reflexionsgrades des Untergrundes stärker als die Unterschiede in den Eingangslichtstärken ist.

## 5 Probandenbefragung zur Sichtbarkeit von Bodenprojektionen auf unterschiedlichen Untergründen

Da Bodenprojektionen größtenteils zur Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern dienen, wurde eine Probandenbefragung zur Sichtbarkeit von Bodenprojektionen auf verschiedenen Untergründen durchgeführt. Hierzu wurden fünf unterschiedliche Projektionen dargestellt: ein Weißbild, gelbe Blinkerchevrons statisch, Blinkerchevrons dynamisch, eine Fahrradabbiegewarnung sowie die Fahrradabbiegewarnung dynamisch blinkend (Bild 6). Die verwendeten Untergründe waren die lackierten Aluminiumplatten in weiß (mittlere Körnung), grau und schwarz, sowie die Asphaltimitate in matt und rau, sowie rau mit Wasser benetzt. Die durchschnittliche Umgebungsbeleuchtung betrug  $16.2 \pm 1.8$  Lux.

Die ProbandInnen, 11 weiblich und 20 männlich, waren 27 – 65 Jahre alt und hatten einen Altersdurchschnitt von  $44.1 \pm 8.5$  Jahren. Sie sollten die Sichtbarkeit der Bodenprojektionen auf einer Skala von 0 (nicht sichtbar) bis 10 (sehr gut sichtbar) bewerten. Es wurde explizit darauf hingewiesen, dass es ausschließlich um die Sichtbarkeit der Bodenprojektionen gehe, nicht aber um die Verständlichkeit der dargestellten Symbole. Der Versuchsablauf war für alle ProbandInnen identisch. Bewertet werden sollte stets zuerst das Weißbild, gefolgt von den Chevrons statisch, Chevrons dynamisch und der Fahrradabbiegewarnung in statischer und dynamischer Variante. Die Untergründe wurden von weiß, grau und schwarz über Asphalt matt und Asphalt rau bis Asphalt rau nass präsentiert.

In einem ersten Durchgang waren die ProbandInnen angewiesen, die Bodenprojektionen stehend aus einer festen, aber frei wählbaren Position um die Bodenprojektion, zu bewerten. Im zweiten Durchgang saßen die ProbandInnen auf einem Stuhl und fixierten einen Bildschirm auf dem ein kurzer Film als Fixationsziel diente, wodurch die Bodenprojektionen nur noch mit dem peripheren Sichtfeld wahrzunehmen waren. Dies sollte den Betrachtungswinkel eines Radfahrers imitieren, der neben dem Fahrzeug, das die Bodenprojektionen darstellt, fährt.

Zur Auswertung der Ergebnisse wurden mehrere Faktoren, die die Bodenprojektionen beeinflussen können und die durch die erhobenen Daten bewertet werden sollen, definiert. Dafür wurden unterschiedliche Bewertungsgruppen mit einem zweiseitigen t-Test, der die Mittelwerte der Wertemenge vergleicht, auf signifikante Unterschiede hin statistisch untersucht. Ein Maß für das Signifikanzniveau bzw. für die Glaubwürdigkeit des Tests ist der p-Wert, welcher die Wahrscheinlichkeit zur Unterschreitung der Prüfgröße (z.B. 5%) angibt [7].

### 5.1 Einflussfaktor 1: Helligkeit des Untergrundes

Die Probandenbefragung zeigt anschaulich, dass die Sichtbarkeit der Bodenprojektionen mit der abnehmenden Helligkeit des Untergrundes ebenfalls stark abnimmt. So sind die Unterschiede zwischen den Farben Weiß, Grau und Schwarz sowohl bei direkter Betrachtung als auch ausschließlich mit peripherer Wahrnehmung jeweils signifikant verschieden (Bild 11).

Dies kann auch in den Messungen der mittleren Lichtstärke mittels Leuchtdichtekamera gezeigt werden. Die Farbe des Untergrunds hat direkten Einfluss auf die Reflektivität, wie Bild 8 und Bild 9 deutlich zeigen: Von Weiß über Grau bis Schwarz nehmen die mittleren Lichtstärken kontinuierlich ab. Die deutlich gesteigerten Werte für Grau und Schwarz in Bild 10 sind höchst wahrscheinlich auf die Struktur und die damit verbundene Reflektivität zurückzuführen.

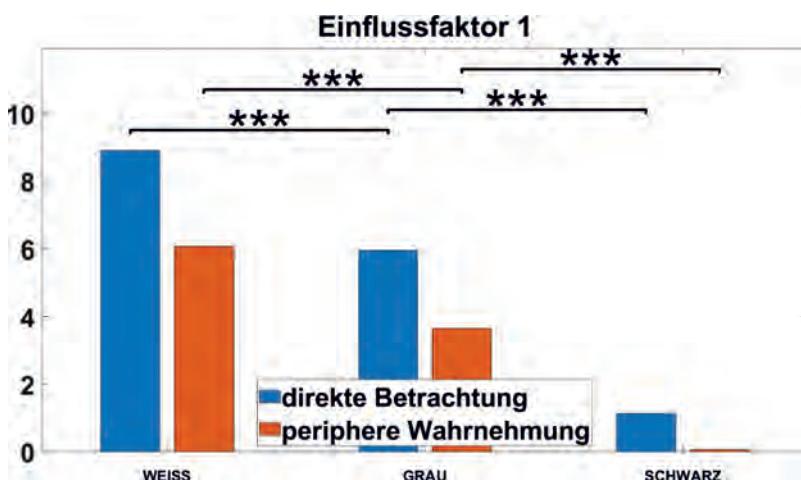


Bild 11: Der Unterschied zwischen den einzelnen Untergrundfarben „Weiß“, „Grau“ und „Schwarz“ ist für jede Betrachtungsweise, direkt oder peripher, signifikant.

Dabei gilt: \*\*\* =  $p \leq 0.001$ , \*\* =  $p \leq 0.01$  und \* =  $p \leq 0.05$

### 5.2 Einflussfaktor 2: Nässe führt zu reduzierter Sichtbarkeit

Auf die Wahrnehmbarkeit der dargestellten Symbole hatte das aufgebrachte Wasser einen deutlichen Effekt. Sowohl bei direkter Betrachtung als auch lediglich mit peripherem Sehen konnten die ProbandInnen die dargestellten Bodenprojektionen signifikant schlechter erkennen. Dies könnte möglicherweise auf die reduzierte Helligkeit des Untergrundes durch die Benetzung zurückzuführen sein.

Die Messungen aus Abschnitt 4.3 zeigen für die Perspektiven „Fußgänger“ und „Gegenverkehr“ nur leicht erhöhte mittlere Lichtstärken durch die Benetzung des Untergrundes „Asphalt rau“, was darauf schließen ließ, dass das hinzugefügte Wasser die Reflektivität nur geringfügig änderte. Für die Perspektive „Radfahrer“ ist die mittlere Lichtstärke sogar leicht rückläufig und somit ist ein nasser Untergrund für Bodenprojektionen als ungünstig anzusehen, da die Sichtbarkeit stark reduziert wird.

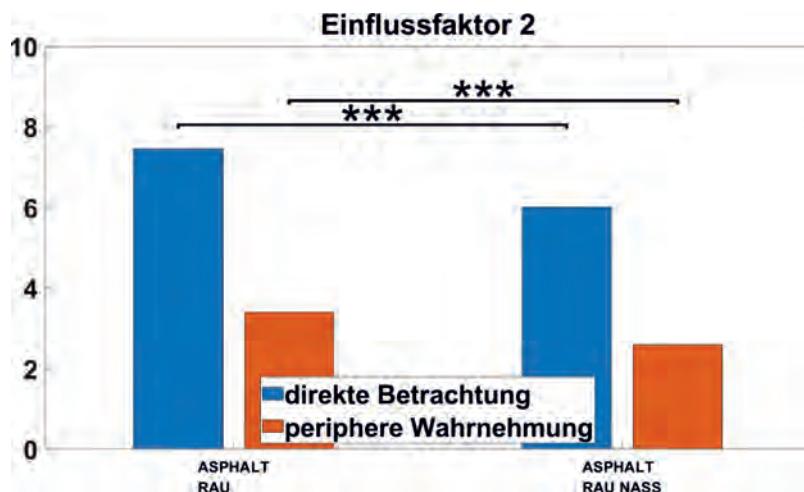


Bild 12: Aufgebrachtes Wasser reduziert die Sichtbarkeit von Bodenprojektionen, sowohl bei direkter als auch peripherer Betrachtung, signifikant.

Dabei gilt: \*\*\* =  $p \leq 0.001$ , \*\* =  $p \leq 0.01$  und \* =  $p \leq 0.05$

### 5.3 Einflussfaktor 3: Die Rauheit des Untergrundes

Im Falle der direkten Betrachtung der Bodenprojektionen durch die ProbandInnen zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den rauen Asphaltimitaten und den lackierten, nahezu

ebenen Aluminiumplatten, jedoch kein signifikanter Unterschied innerhalb der Asphaltimitate, die sich in ihrer Struktur sehr ähnlich sind.

Für die periphere Betrachtung der Bodenprojektionen konnten, mit Ausnahme der schwarzen Aluminiumplatte, keine signifikanten Unterschiede gezeigt werden. Dies verdeutlicht, dass die Struktur des Untergrundes einen gewissen Einfluss auf die Sichtbarkeit haben kann, allerdings bei peripherer Betrachtung kaum Bedeutung mehr hat. Die Aufmerksamkeit der Probanden wird in den meisten Fällen ähnlich gut erlangt.

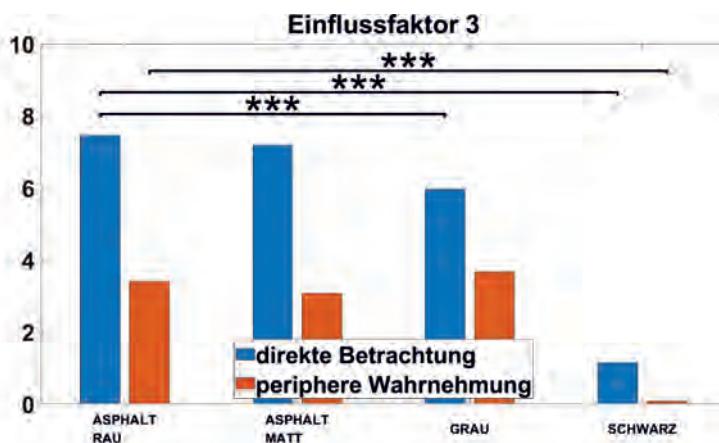


Bild 13: Die Struktur des Untergrundes führt bei direkter Betrachtung zu signifikanten Unterschieden zwischen den Asphaltimitaten und den lackierten Aluminiumplatten. Bei peripherer Betrachtung waren keine Signifikanzen nachzuweisen.

Dabei gilt: \*\*\* =  $p \leq 0.001$ , \*\* =  $p \leq 0.01$  und \* =  $p \leq 0.05$

#### 5.4 Einflussfaktor 4: Dynamik der Bodenprojektion

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass dynamische Abbildungen eine bessere Sichtbarkeit erreichen. Diese Einschätzung beruht auf einer erhöhten Attraktivität für das menschliche Auge bei Bewegung.

Unsere Befragung zeigt, dass eine dynamische Darstellung bei direkter Betrachtung der Bodenprojektionen keine signifikante Zunahme der Erkennbarkeit zur Folge hat. Der Zuwachs ist für beide dargestellten Symbole (Chevrons und Fahrradabbiegewarnung) unter einem halben Bewertungspunkt (Bild 14).

Ganz gegenteilig ist die Bewertung der dargestellten Bodenprojektion ausschließlich mit der peripheren Wahrnehmung. Hier zeigen sich signifikante Wahrnehmungsunterschiede zwischen der statischen und der dynamischen Variante beider Symbole. Dies entspricht auch dem Stand der Forschung, wonach die menschliche Wahrnehmung in der Peripherie deutlich sensitiver gegenüber Bewegungen ist als das zentrale Sehen [8].

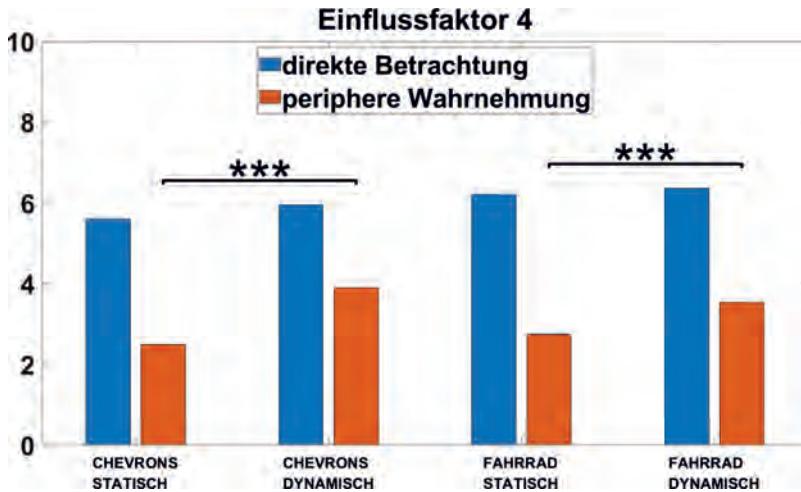


Bild 14: Bei direkter Betrachtung hat eine dynamische Darstellung der Bodenprojektionen keinen Einfluss auf die Bewertung der Sichtbarkeit der ProbandInnen. Ganz im Gegenteil dazu die Bewertungen mit ausschließlich peripherer Sicht: Hier konnten signifikante Unterschiede zwischen statischer und dynamischer Darstellung gezeigt werden.

Dabei gilt: \*\*\* =  $p \leq 0.001$ , \*\* =  $p \leq 0.01$  und \* =  $p \leq 0.05$

### 5.5 Einflussfaktor 5: Farbige Darstellungen

Die Auswertung der Befragung zeigt die Tendenz, dass farbig dargestellte Symbole weniger sichtbar sind als weiße Bodenprojektionen. Sowohl für die dynamisch dargestellten Symbole in der direkten Ansicht als auch für die Bewertungen der Symbole lediglich mit peripherem Gesichtsfeld, konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den farbigen Chevrons und der weißen Fahrradabbiegemarkierung festgestellt werden. Lediglich die beiden statisch gezeigten Symbole wurden bei direkter Ansicht signifikant unterschiedlich bewertet. Mit einem p-Wert von 0.04 ist diese Aussage aber auch nur als schwach signifikant einzustufen; die Mittelwerte

aller ProbandInnen für die vier untersuchten Kategorien sind sehr ähnlich (Bild 15). Da aber die meisten Ergebnisse der Leuchtdichtemessungen zeigen, dass die mittlere Lichtstärke der farbigen (gelben) Chevrons geringer ist, als für die Fahrradwarnung in weißer Farbe (Bild 8 - Bild 10) legt dies den Schluss nahe, dass die farbigen Chevrons für die Probanden besser sichtbar waren als die monochrome Fahrradwarnung.

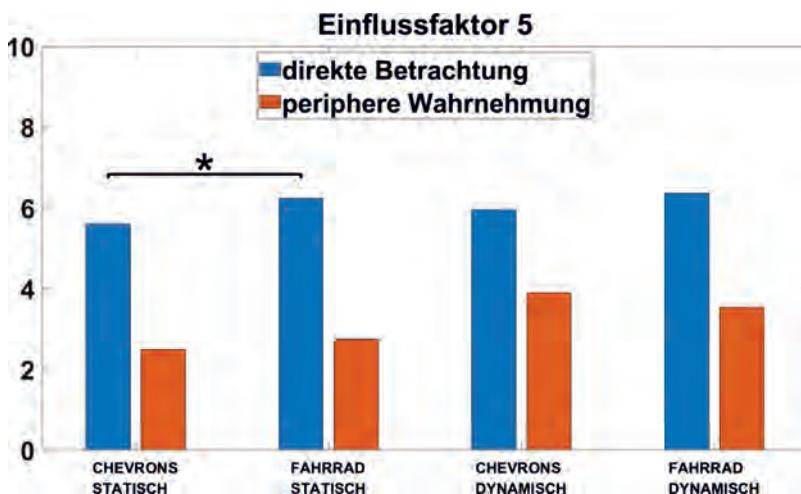


Bild 15: Es konnten kaum Unterschiede zwischen den farbigen Chevrons und der weißen Fahrradabbiegewarnung gezeigt werden. Lediglich bei direkter Betrachtung konnte bei den statisch präsentierten Bodenprojektionen ein Unterschied geringer Signifikanz festgestellt werden.

Dabei gilt: \*\*\* =  $p \leq 0.001$ , \*\* =  $p \leq 0.01$  und \* =  $p \leq 0.05$

### 5.6 Einflussfaktor 6: Dynamische Darstellung kompensiert ungünstigen Untergrund

Im Gesamtdurchschnitt aller abgegebenen Bewertungen wurde der Untergrund „Asphalt rau nass“, nach der schwarz lackierten Aluminiumplatte, als ungünstiger für Bodenprojektionen bewertet. Die mittlere Bewertung der ProbandInnen ist mit 6.1 (bei direkter Ansicht) bzw. 2.6 (bei peripherer Sicht) Punkten die zweit- bzw. dritt niedrigste (Daten nicht dargestellt). Wie auch Bild 8 - Bild 10 zeigen, kann ein ungünstiger Untergrund die Erkennbarkeit stark negativ beeinträchtigen, da die mittlere gemessene Lichtstärke in allen drei Szenarien bei den niedrigsten im gesamten Versuchsfeld ist.

Wie Bild 14 bzw. Abschnitt 5.4 zeigen, ist jedoch eine dynamische Darstellung in der Peripherie signifikant besser wahrzunehmen und auch für die direkte Ansicht sind die durchschnittlichen Bewertungen dynamischer Bodenprojektion der ProbandInnen stets höher.

Bild 16 zeigt, dass bei Untergrund „Asphalt rau nass“ sowohl für die Chevrons als auch für die Fahrradabbiegewarnung, in beiden Ansichten die dynamische Variante als besser sichtbar bewertet wurde. Dies wird durch signifikante Unterschiede der Mittelwerte bei peripherer Sicht untermauert und zeigt, dass ein ungünstiger Untergrund durch eine dynamische Darstellung der Bodenprojektion durchaus kompensiert werden kann.

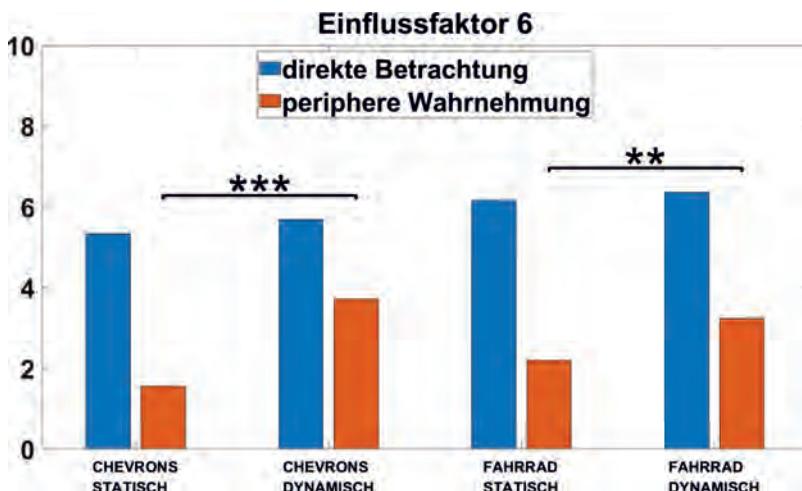


Bild 16: Für den Untergrund „Asphalt rau nass“ konnte bei direkter Ansicht kein signifikanter Unterschied in den Bewertungen festgestellt werden. Bei peripherer Bewertung konnte hingegen gezeigt werden, dass eine dynamische Darstellung durchaus einen ungünstigen Untergrund kompensieren kann.

Dabei gilt: \*\*\* =  $p \leq 0.001$ , \*\* =  $p \leq 0.01$  und \* =  $p \leq 0.05$

## 6 Abschließende Bewertungen

Um im Sinne einer 360°-Beleuchtung eines Fahrzeuges verschiedene Szenarien, wie Sicherheitswarnungen, Kommunikationsaufgaben oder Begrüßungsbotschaften, darstellen zu können, bedarf es diverser Projektoren, aber auch Projektionsflächen, die eine Darstellung erlauben. In dieser Arbeit wurden die Auswirkungen verschiedener Untergrundeigenschaften auf die Sichtbarkeit der Bodenprojektionen dargestellt. So konnte gezeigt werden, dass die Farbe

und die Struktur des Untergrundes einen signifikanten Einfluss auf die Leuchtdichte der Bodenprojektionen haben. Grundsätzlich sind die Bodenprojektionen mit den verwendeten Beleuchtungsstärken bei Nacht oder im Dämmerungszustand bereits bei den meisten Bodenbelägen gut sichtbar. Sollen die dargestellten Inhalte aber auch bei sehr anspruchsvollen Bodenbelägen und/oder nicht nur bei Nacht sichtbar sein, so muss die Performance der Projektionsmodule entsprechend hoch sein. Auch die Art bzw. der Inhalt der Bodenprojektion kann unterschiedliche Beleuchtungsstärken nötig machen: Warnungen müssen schnell und einfach verständlich sein und sollten daher deutlich besser sichtbar sein als z.B. Informationen oder Begrüßungsszenarien.

Die Befragung diverser ProbandInnen zur subjektiven Sichtbarkeit von Bodenprojektionen zeigte, dass die Helligkeit der Projektionsfläche einen großen Einfluss hat. Wie zu erwarten war, konnten die dargestellten Symbole auf weißem Untergrund deutlich besser erkannt werden als auf grauem bzw. schwarzem Grund; auch auf nasser Oberfläche wurden die dargestellten Symbole als schlechter sichtbar bewertet. Die Struktur hingegen hatte, sofern in ähnlichen Maßen, keinen Einfluss auf die Sichtbarkeit. Dies würde sich höchstwahrscheinlich ändern, wenn der Untergrund aus z.B. Herbstlaub bestünde, da hier keine geschlossene Projektionsfläche mehr verfügbar wäre.

Die Farbigkeit hatte einen geringeren Einfluss auf die Sichtbarkeit der Symbole, eine dynamische Darstellung der Bodenprojektionen hingegen einen sehr großen. So konnte nicht nur gezeigt werden, dass eine Dynamik bei peripherem Sehen zu deutlich besserer Sichtbarkeit führte, sondern dass durch eine Animation auch ein ungünstiger Untergrund kompensiert werden konnte.

Mit dem Ergebnis einer erhöhten Sichtbarkeit durch dynamische Darstellungen wäre es in einer weiterführenden Studie interessant, inwieweit die Abbildungsgüte (Aberrationen) einen Einfluss auf die Sichtbarkeit der Bodenprojektionen hat und inwieweit eine verminderde Abbildungsqualität wiederum durch eine animierte Darstellung kompensiert werden könnte.

Diese Arbeit führte die Befragung der ProbandInnen in einer vom Einsatzzweck der Bodenprojektionen losgelösten Situation durch und beurteilte ausschließlich die Sichtbarkeit, jedoch nicht das Verständnis der dargestellten Symbole. Es wäre daher sehr interessant herauszufinden, ob der Kontext die Ergebnisse in größerem Maße verändert. So könnten z.B. Abbiegewarnungen an einem realen Fahrzeug, die für tatsächliche Radfahrer eingeblendet werden, besser gesehen bzw. schneller verstanden werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] H. Sothmann, „Deutlicher Anstieg bei tödlichen Unfällen mit „E-Bikes“ – Verkehrswacht will mehr Aufklärung und Fahrtrainings,“ Pressemitteilung der deutschen Verkehrswacht, 2021.
- [2] *SL Corporation and Koito, GTB Document No. W GSL 503*, 2020.
- [3] *"Light signalling devices and systems for motor vehicles and their trailers, GB regulation draft*, 2021, July.
- [4] E.-O. Rosenhahn, U. Schloeder und I. Rutkiewicz, „HD-Lichtfunktionen in Scheinwerfern zur Verbesserung der Verkehrssicherheit,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, p. 46ff., November 2021.
- [5] G. Kloppenburg, Scannende Laser-Projektionseinheit für die Fahrzeugfrontbeleuchtung, Hannover, 2017.
- [6] Texas Instruments Inc., 18 Mai 2022. [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/DLP3021LEQ1EVM?keyMatch=EVM%203021>.
- [7] „Wikipedia - die freie Enzyklopädie,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/P-Wert>.
- [8] D. Finlay, „Motion perception in the peripheral visual field,“ *Perception*, p. doi: 10.1080/p110457, 1982.
- [9] W. Nickel, „Welt.de,“ Axel Springer SE, 03. April 2013. [Online]. Available: <https://www.welt.de/motor/news/article114961260/Tradition-100-Jahre-elektrische-Autoscheinwerfer.html>. [Zugriff am 23. Mai 2022].



# Wärmesenkenfreies Scheinwerfer-Konzept mit effizienten LEDs

## Heatsinkless Headlamp Concept enabled by efficient LEDs

Dipl.-Ing. (FH) **S. Grötsch**, Dr.-Ing. **A. Günther**,  
Dipl.-Ing. (FH) **N. Haefner**, Dipl.-Ing. (FH) **R. Huber**,  
ams-OSRAM International, Regensburg

### Abstract

Latest progress in LED efficacy for automotive headlamps exceed 460 lm at 1 ampere operating current and enable lamp concepts at attractive costs. The paper covers detailed thermal considerations on how to skip dedicated LED heatsinks. A reflector optics design and demonstrator support the idea. A simplified electronic driving concept controls the lighting functions like low and high beam, DRL and turn indicator with LEDs in a single string. The number of individual LED emitters is reduced to a minimum.

### 1. Einleitung

Bisherige Ansätze zur LED-Effizienzsteigerung in Scheinwerfern nutzen eine Vielzahl von LEDs für das Abblendlicht. [1] Durch den Betrieb bei relativ geringen Betriebsströmen werden hohe Effizienzen erreicht. Auf der anderen Seite führen Kostenoptimierungen zu einer minimalen Anzahl von LEDs. [2] Das Thermomanagement kommt in diesen Beispielen nicht ohne eigene Kühlkörper aus. So stellt sich die Frage nach Ansätzen ohne dedizierte Kühlkörper und geringster LED-Anzahl.

### 2. Fortschritte in der LED-Technologie und Effizienz

In der 1mm<sup>2</sup> LED-Kategorie wurde mit der OSLON BLACK Flat X ein typischer Lichtstrom von 460 Lumen je LED-Chip bei einem Betriebsstrom von einem Ampere und Raumtemperatur erreicht. Dies ist gegenüber der [3] vorgestellten OSLON BLACK Flat S eine weitere Steigerung um 40 lm.

Damit und mit der geringen Vorwärtsspannung unserer LEDs, welche sich bei ca. 3,2 Volt bewegt, ermöglichen wir sehr effiziente Lichtquellen. Bei Anwendungsbedingungen mit 0,7 A

je LED und LED-Sperrsichttemperaturen von 120° Celsius, ergibt sich mit der neuen Bauteilgeneration eine Effizienz von typisch 140 Lumen pro elektrischem Watt.

Bild 1 zeigt die beiden Bauteile mit den vorstehend beschriebenen Eigenschaften als konsequente Weiterentwicklung früherer Varianten. [4]

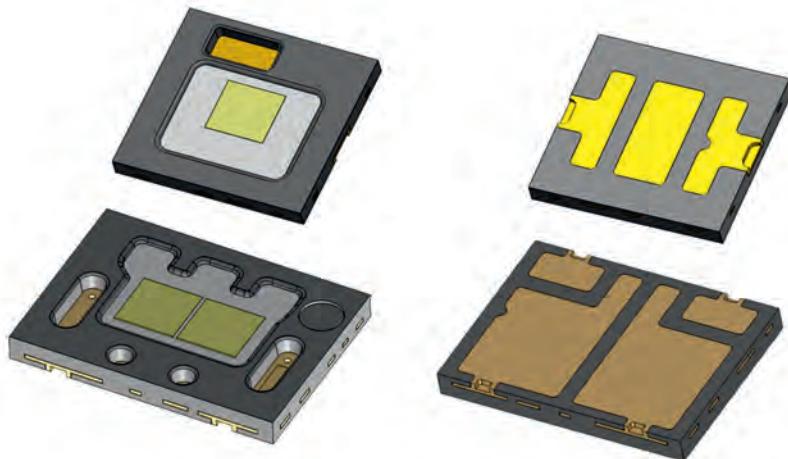


Bild 1: Die obere Reihe zeigt die OSLON Black Flat X mit einem LED-Chip und Abmessungen von 3,75 x 3,75 mm. Sowohl Außenabmessungen als auch Lötpad-Entwurf entsprechen der bereits produktiven OSLON Black Flat. Die unteren Bilder veranschaulichen die Produktvariante mit zwei einzeln ansteuerbaren LED-Chips.

Bei beiden Bauteilen liegt das Zentrum der Lichtemittierenden Fläche deckungsgleich zur geometrischen Gehäusemitte. Unsere Kupfer-Leadframe-Substrattechnologie ermöglicht sowohl geringe Bauteilwärmewiderstände als auch den Einsatz von Standardmetallkernplatten im Hinblick auf die Lötstellenzuverlässigkeit in der Applikation. Der typische reale Wärmewiderstand von Sperrsicht bis zur Lötstelle liegt bei der Einchipvariante bei 3,3 K/W und bei der Zweichipvariante bei 2,8 K/W. Die LED wurde für Gruppierungsströme von einem Ampere optimiert.

Die Bauteilkonstruktion ermöglicht einen Kontrast von mehr als 250:1 innerhalb kürzesten Abstands zur Kante der lichtemittierenden Fläche.

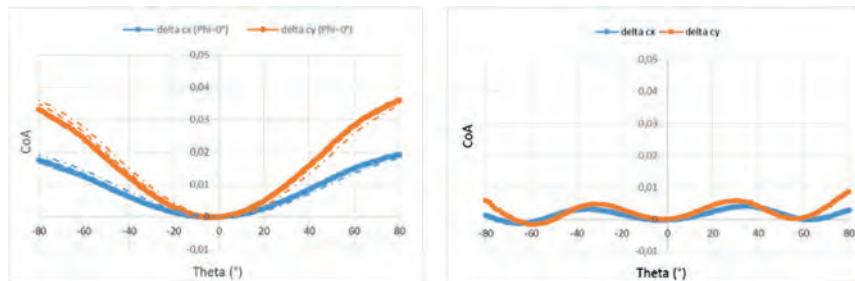


Bild 2: Links typischer und rechts optimierter Farbverlauf über den Emissionswinkel von weißen LEDs

Wie in Bild 2: Links typischer und rechts optimierter Farbverlauf über den Emissionswinkel von weißen LEDs ersichtlich wurde neben den Effizienzsteigerungen auch das Verhalten der Emissionsfarbe über den Abstrahlwinkel gegenüber früheren Generationen weiterhin signifikant verbessert. Das linke Diagramm zeigt eine aktuelle Farbverlaufscharakteristik über den Winkel. Demgegenüber ist im rechten Diagramm die deutlich verbesserte Farbhomogenität über die Abstrahlung der neuen LED-Generation zu sehen. Die blauen und orangen Linien zeigen die Änderung in den Farbkoordinaten  $C_x$  und  $C_y$  über den Abstrahlwinkel gemessen zur Lotachse auf die Emissionsfläche. Bei einem Betrachtungswinkel von  $60^\circ$  ist die Farbabweichung in  $C_x$  kleiner als 0.005 und weniger als 0.010 für die  $C_y$  Farbkoordinate. Die Farbhomogenität ist um den Faktor 3 gegenüber älteren Versionen verbessert.

### 3. Optikkonzept

Bild 3 zeigt den optischen Systementwurf für den Gesamtscheinwerfer mit den effizienzverbesserten LEDs. Dabei werden fünf Reflektoren für Abblend- und Fernlicht, Tagfahrlicht und Blinker vorgesehenen.

Jeder der beiden unteren Abblendlichtreflektoren besteht aus 6 Facetten. Die jeweilige Reflektorgroße liegt bei 72mm x 42mm. Der linke Reflektor erzeugt eine breite Lichtstärkeverteilung, der Rechte erzeugt den  $15^\circ$  Ellbogen und das Lichtstärkemaximum. Der Reflektor mitti-rechts, bestehend aus 7 Facetten und Dimensionen von 98mm x 41mm generiert das Fernlicht. Die Reflektorsysteme für das Abblend- und Fernlicht wurden jeweils mit einer neuen OSLON Black Flat mit zwei LED-Chips und einem Lichtstrom von etwas über 500 lm ausgelegt.

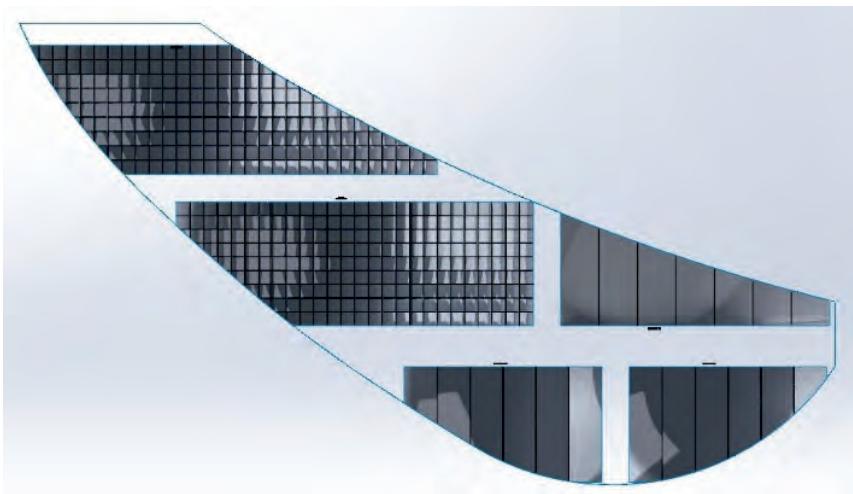


Bild 3: Optischer Scheinwerferentwurf (Abblendlicht mit den beiden unteren Reflektoren, Fernlicht mit dem Reflektor Mitte Rechts, Tagfahrlicht mit dem Reflektor Mitte links, Blinker mit dem oberen Reflektor)

Die gemessene Lichtstärkeverteilung des Demonstratoraufbaus ist in Bild 4 ersichtlich. Das Abblendlicht hat eine maximale Lichtstärke von ca. 43kcd mit einer Breite der Verteilung von +/- 28°. Das System zeigt eine Auskoppeleffizienz von etwas über 34%.

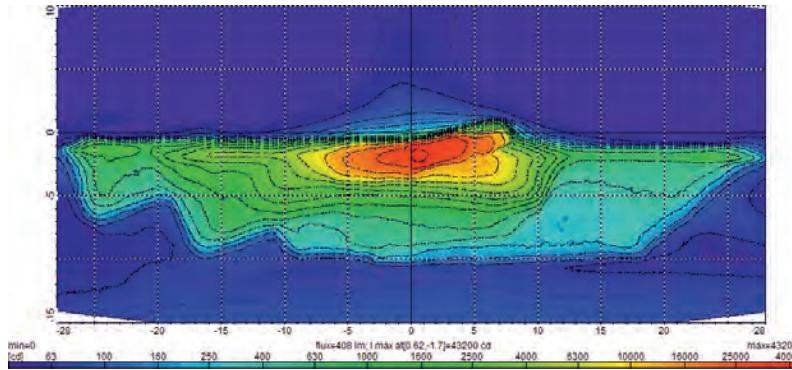


Bild 4: Gemessene Abblendlichtverteilung basierend auf einem thermisch eingeschwungenen LED-Lichtstrom von 1170 lm.

Bild 5 zeigt die gemessene Fernlichtverteilung mit einer maximalen Intensität von 51kcd und einer Breite von +/- 7°. Aufgrund der geringen Reflektorhöhe von 41 mm und den starken Beschnitt für das Gehäusedesign liegt die Auskoppeleffizienz trotz der Reflektorbreite von 98mm bei 32 %.

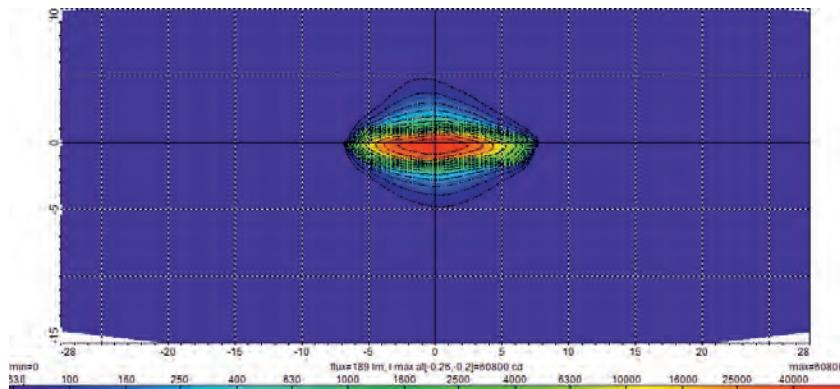


Bild 5: Gemessene Fernlichtverteilung basierend auf einem LED Lichtstrom von 590 lm.

Die Signalfunktionen Tagfahrlicht und Blinker wurden jeweils mit einem Kissenreflektor umgesetzt. Beide Reflektoren weisen eine Höhe von 45 mm auf. Eine neue OSLON Black Flat mit einem LED Chip agiert als Lichtquelle für das Tagfahrlicht.

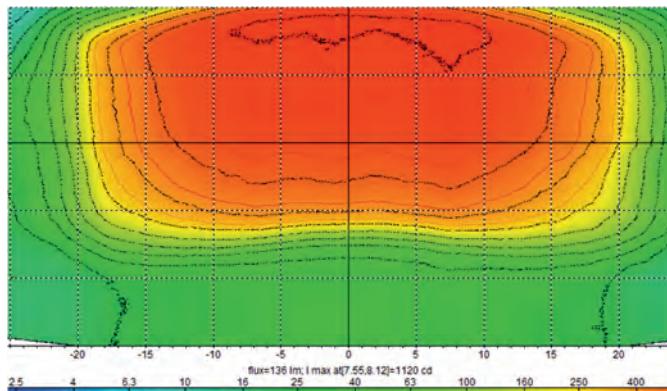


Bild 6: Gemessene Tagfahrlichtverteilung aus einer einzelnen LED betrieben mit 250 lm und im thermisch eingeschwungenen Zustand.

Der bei ihr auf 250 lm eingeschwungene Lichtstrom führt zur Lichtstärkeverteilung in Bild 6. Die maximale Lichtstärke liegt bei ca. 1120 cd und im Zentrum bei ca. 800 cd. Der Reflektoraufbau erreicht in der Messung eine Effizienz von 55%.

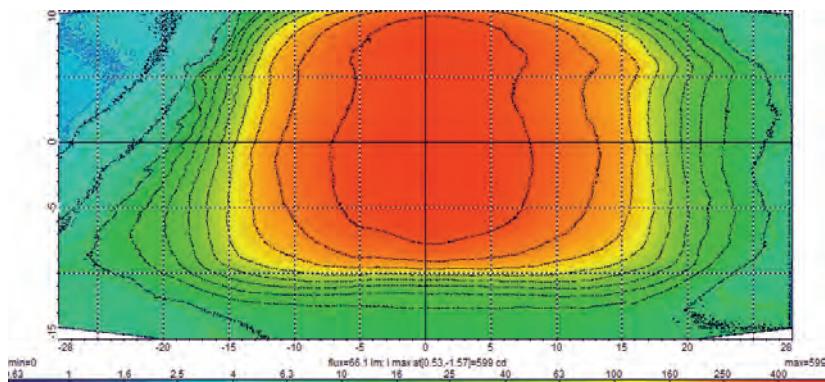


Bild 7: Verteilung Fahrrichtungsanzeiger gemessen LED bei Lichtstrom von 130 lm

Auch beim Fahrrichtungsanzeiger kommt eine OSLON Black Flat LED, die LY H9PP, zum Einsatz. Bei der Messung der Reflektorkonfiguration wurde die Lichtverteilung in Bild 7 ermittelt. Der Lichtstrom der LED von 130 lm führt zu einer Lichtstärke des Fahrrichtungsanzei-

gers im Zentrum von knapp unter 600 cd. Die Reflektoreffizienz liegt bei 51%. Mit der gemessenen Verteilung werden die UN-ECE Anforderungen der Regulierung Nr. 6 der Kategorie I erfüllt.

#### 4. Kosteneffiziente Elektronikarchitektur

Das kosteneffektivste Ansteuerelektronikkonzept sieht einen einzigen Buck-Boost-Konverter vor, der alle LEDs in Serie mit dem gleichen Strom betreibt. Nur die aktiven Lichtfunktionen werden nicht mit einer Schalterkomponente kurzgeschlossen. Ein Nachteil dieser Lösung ist die Vorsicht, die walten muss, um den maximalen Spitzenstrom durch die LEDs zu begrenzen, wenn am Buck-Boost-Konverter plötzliche Lastwechsel auftreten.

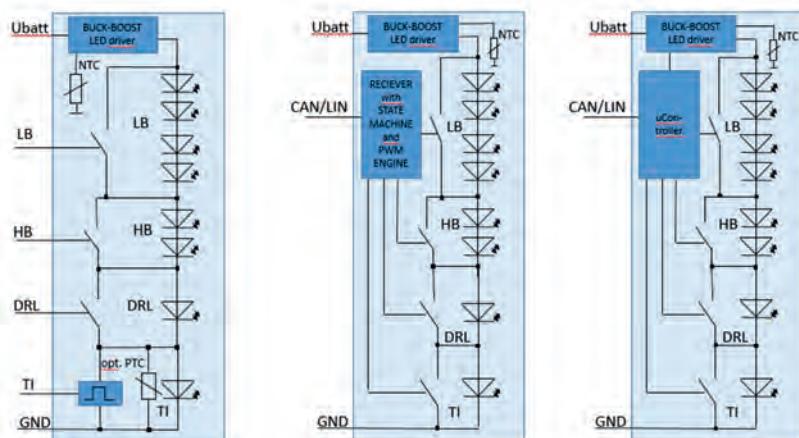


Bild 8: Verschiedene mögliche LED-Ansteuerelektronikarchitekturansätze

Auf Systemebene muss festgelegt werden welche Verbindung zwischen dem Fahrzeugnetzwerk und dem Scheinwerfer genutzt wird. Für eine serielle Datenverbindung kann eine Steuerung mit oder ohne Software ausgeführt sein. Diese erfordert einen gewissen Aufwand und birgt auch Risiken, ermöglicht aber auch eine höhere Flexibilität zur Anpassung der Architektur auf verschiedene Fahrzeugreihen. Ohne Software müssen separaten Leitungen die Funktionen ansprechen, oder es bedarf einer Komponente mit integriertem Zustandsautomaten mit vordefinierten Kommandos für die serielle Schnittstelle.

Verbaut man die Elektronik-Komponenten mit auf die LED-Leiterplatten, entfallen separate Lichtsteuergeräte außerhalb der Scheinwerfer. Die Bild 8 zeigt einige Architekturkonzepte, die für die LED-Ansteuerelektronik dazu in Frage kommen. Die Steuerung der unterschiedlichen Lichtfunktionen erfolgt durch das Bordsteuergerät des Fahrzeugs und muss parallel zur Scheinwerferentwicklung entstehen.

Im besten Fall wird nur eine Temperaturrückmeldung zur Steuerung des ganzen LED Strangs benötigt. Deshalb sollte sich der Sensor auf der heißesten Leiterplatte befinden. Welche das ist, lässt sich im Vorfeld aus der Thermosimulation ableiten. Die Korrelation zwischen der Sensortemperatur und der LED-Lotstellentemperatur  $T_s$  respektive der LED-Sperrsichttemperatur  $T_i$  ergibt sich aus Versuchsmessungen mit Thermoelementen im realen Scheinwerfer.

Wenn der Stromregler aufgrund der gemessenen Temperatur den Betriebsstrom reduziert, betrifft dies alle Lichtfunktionen. Falls dies z. B. für den Fahrrichtungsanzeiger nicht gewünscht ist, kann ein PTC-Widerstand parallel zur LED den Strom durch die LED bei hohen Temperaturen ausgleichen. Mikrocontroller oder Empfängerbausteine können alternativ die Lichtfunktionen auch mit einer Pulsweitenmodulation in der Helligkeit regeln. Das erhöht zwar die Komplexität, erlaubt aber weiterhin eine Lösung mit einem einzigen Stromregler.

## 5. Thermisches Konzept des Demonstrators mit der neuesten Generation der OBF X

Die grundlegende Idee zur Kühlung der LEDs liegt darin, auf freie Konvektion und Wärmestrahlung ausgehend von Metallkerneplatten (MKP) anstelle der Verwendung von eigenen Kühlkörpern zu setzen.

Anstelle von Leiterplatten mit Mikrovias oder thermischen Inlays in Verbindung mit passiven oder sogar aktiven Wärmesenken erlaubt der MKP-Ansatz einfachere Handhabung, kleineren Bauraum und auch sehr wahrscheinlich eine bessere Kostenposition. Um das Konzept zu veranschaulichen entwarfen wir einen Tischdemonstrator mit transparenter Front- und Rückseitenabdeckung. Bild 9 zeigt einmal die geöffnete und einmal die geschlossene Konstruktion. Sie zeigt auch wo und wie viele LEDs für welche Lichtfunktion sitzen. Die thermisch kritischeren Hauptlichtfunktionen werden beim Abblendlicht durch MKPs mit 72mm x 50mm und beim Fernlicht mit 98x50 mm gekühlt.

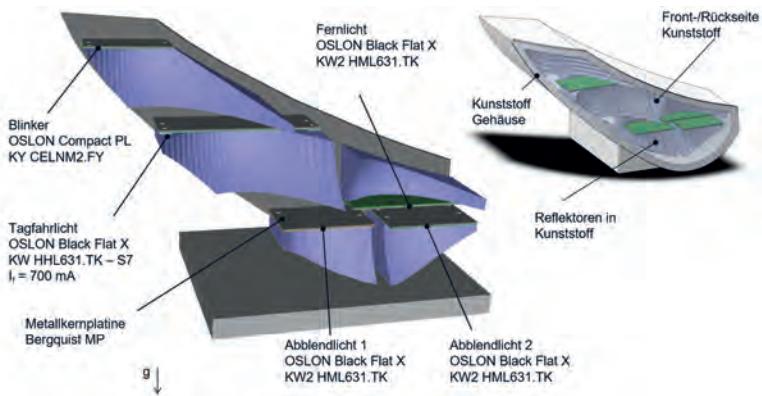


Bild 9: Mechanisches Modell des Demonstrators mit Verweis auf die eingesetzten LEDs für die Lichtfunktionen.

In Summe kommen nur 8 LED-Emitter in der 1mm<sup>2</sup> Klasse für die Lichtfunktionen Fahrtrichtungsanzeiger, Tagfahrlicht, Abblendlicht und Fernlicht zum Einsatz.

In der Thermosimulation wird das Gehäusematerial und noch relevanter das Material der Reflektoren als Kunststoff definiert. Dadurch ist deren Beitrag zum Thermomanagement durch Wärmeleitung geringer als bei den real aus Aluminium gefrästen Reflektoren. In der Thermosimulation liegt der Lichtstrom je LED bei 270lm bei 150 °C Sperrschißtemperatur. Das entspricht einem Betriebsstrom von 700mA bei 150° C. Es ergibt sich daraus je Chip eine elektrische Leistungsaufnahme von 2 W und eine Verlustleistung von 1,15 W. Die resultierende LED-Effizienz bei 150° C und 700mA liegt bei ca. 135 lm/W. Wird die Umgebungstemperatur außerhalb des Gehäuses auf 70 °C gesetzt ergeben sich die Temperaturverteilungen in Bild 10.

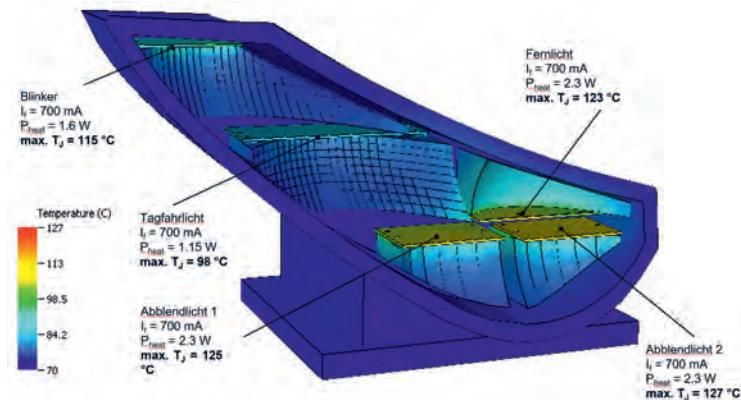


Bild 10: Temperaturverteilung im Inneren des Scheinwerferdemonstrators bei einer Temperatur von  $70^\circ\text{C}$  außerhalb des Gehäuses.

In unseren Simulationsergebnissen mit allen LEDs permanent an (Inclusive der LEDs für Tagfahrlicht und Blinker), liegen die Sperrsichtschichttemperaturen  $T_j$  der Hauptlichtfunktionen zwischen  $123^\circ\text{C}$  und  $127^\circ\text{C}$ . Die Signallichtfunktionen bleiben mit  $T_j 98^\circ\text{C}$  beim Tagfahrlicht und  $115^\circ\text{C}$  beim Fahrtrichtungsanzeiger trotz Dauerbetriebs deutlich unter dem Grenzwert von  $150^\circ\text{C}$ . Ohne Blinker und gedimmten oder ausgeschalteten Tagfahrlicht lägen die LED-Temperaturen noch niedriger. Die elektrische Leistungsaufnahme liegt bei circa  $16 \text{ W}$  und die thermische Leistung bei nur  $9.65 \text{ W}$ . Von der maximalen simulierten Junctiontemperatur  $T_j$  der LEDs bis zu den maximal zulässigen  $150^\circ\text{C}$  bleiben fast  $25^\circ\text{C}$  Reserve. Das Setup ist damit bis beinahe bis zu einer Umgebungstemperatur von  $105^\circ\text{C}$  ohne Abregelung nutzbar.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die dargelegten Ergebnisse stützen das Konzept einer Scheinwerferoptimierung mit einer minimalen Anzahl von LEDs und einem Thermomanagement basierend auf freier Konvektion von den LED-Leiterplatten. Das elektronische Treiberkonzept mit den LEDs aller Lichtfunktionen in einem Strang mit einem einzigen Buck-Boost verspricht Kosteneffizienz. Zukünftige LED-Effizienzsteigerungen können die notwendige LED-Anzahl in diesem Konzept noch weiter reduzieren.

## Literaturverzeichnis

- [1] C. Buchberger und W. Hoßfeld, „eLight Module Family - The most effective LED Low Beam Projection Concept on the Market,“ in *ISAL 2013 Proceedings*, Darmstadt, 2013.
- [2] P.-H. Matha und A. Bondel, „Full LED headlamp gen3: How Renault continues to reduce cost and increase Performance,“ in *SIA VISION 2018 Proceedings*, Paris, 2018.
- [3] S. Groetsch, M. Kiessling, N. Haefner und R. Huber, „Heatsink-Less Economic LED Headlamp Approach,“ in *13th International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2019.
- [4] M. Zitzlsperger und J. Reill, „Next Generation STM LED for Automotive Signalling and Forward Lighting Functions,“ in *ISAL 2011 Proceedings*, Darmstadt, 2011.



## FlatLight

### Flache Leuchtelemente für individuelles Styling

**Martin Vollmer** M.Sc., Hella GmbH Hueck & Co. KGaA, Lippstadt

#### Kurzfassung

Die Automobilindustrie befindet sich im Wandel, Fahrzeughersteller möchten Ihren Kunden ein besonderes Erlebnis bieten und sich durch Differenzierung vom Markt abheben. Zudem entwickelt sich Nachhaltigkeit zum neuen Megatrend. Dies hat auch einen direkten Einfluss auf die Beleuchtungseinrichtung von Fahrzeugen. Um diesen Trends zu begegnen, führt HELLA verschiedene Varianten der sogenannten FlatLight-Technologie in den Markt ein. Diese Lichtinnovationen für die Signalbeleuchtung ermöglichen neue Möglichkeiten in Design, Funktionalität und Effizienz durch den Einsatz innovativer Lichtleiterkonzepte. Dieser Beitrag beschreibt die unterschiedlichen Konzepte und gibt einen Ausblick auf deren Anwendung in der automobilen Signalbeleuchtung.

#### 1. Einleitung

Die Automobilindustrie befindet sich in ihrem größten Wandel seit der Erfindung des Automobils im Jahre 1886. Durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs sinkt die Eintrittsbarriere in den Markt, was zu einer Zunahme von neuen Automobilherstellern führt. Differenzierung in Design und Kundenerlebnis werden zunehmend zum Wettbewerbsfaktor. Die Signalbeleuchtung von Fahrzeugen spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle, sie unterstreicht den Charakter eines Fahrzeugs und sorgen für eine gute Sichtbarkeit bei Tag und Nacht. Darüber hinaus müssen Fahrzeuge und ihre Komponenten in vielen Dimensionen nachhaltiger werden. Um diesen Herausforderungen gewachsen zu sein, bringt der Licht- und Elektronikspezialist HELLA FlatLight-Technologien auf den Markt – eine Vielzahl unterschiedlicher Lichtinnovationen, die durch Ihre Gestaltungsfreiheit ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten unterstützen. Das typische Merkmal eines FlatLight-Elements ist die geringe Dicke von nur wenigen Millimetern. Dies ermöglicht insbesondere Bauraumreduzierungen und Gewichtseinsparungen. Ein weiterer Aspekt in Bezug auf Nachhaltigkeit ist die Nutzung der Modularisierungsmöglichkeit. Dies ermöglicht eine maximale Wiederverwendung von Komponenten, indem nur die designrelevanten FlatLight-Elemente angepasst werden. Alle FlatLight-Technologien basieren auf innovativen Lichtleiterkonzepten, die im Kunststoff-

Spritzgießverfahren hergestellt werden. Die optisch wirksamen Elemente sind bereits im Kunststoffbauteil enthalten, somit entfallen nachgelagerte Prozessschritte wie z.B. Bedruckungen oder Laserbearbeitungen. Die Beleuchtung der FlatLight-Technologien erfolgt mittels etablierter LED-Technologie. Es gibt keine physikalische Begrenzung hinsichtlich der gewählten LED-Farbe und Multifunktionalität ist möglich. Abbildung 1 stellt die verschiedenen FlatLight-Technologien im unbeleuchteten und beleuchteten Zustand gegenüber.

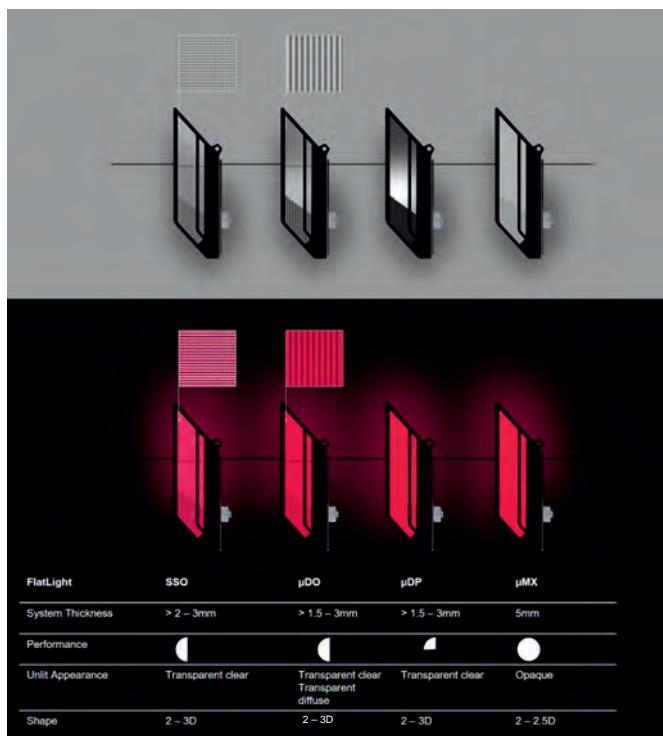


Bild 1: HELLA FlatLight-Technologien

Die Vielfalt an unterschiedlichen FlatLight-Technologien ermöglicht es HELLA, ein breites Spektrum an Kundenanforderungen zu bedienen. Wesentliche Kriterien für die Auswahl der spezifischen Technologie sind die gewünschte Lichtfunktion sowie das gewünschte Design.

## 2. FlatLight | μDP-Technologie

Die FlatLight | μDP Technologie basiert auf einem weniger als 3 mm dünnen Lichtleiter, welcher stirnseitig von LEDs beleuchtet wird. Das Material des Lichtleiters ist eine spezielle Mischung aus PMMA oder PC und Partikeln in einer Größe von nur wenigen Nanometern – den sogenannten Diffusor Partikeln. Interagiert Licht mit diesen Partikeln, so wird dies diffus in alle Richtungen gestreut. Aufgrund der geringen Größe der Partikel ist das FlatLight-Element im unbeleuchteten Zustand transparent, während es im beleuchteten Zustand sehr homogen ausgeleuchtet wird. Diese Technologie ist aufgrund unterschiedlicher Konzentrationen von Diffusor Partikeln in der Größe skalierbar und die Form kann an 3D-Anwendungen angepasst werden. Die optische Effizienz dieser Technologie ermöglicht Anwendungen für niedrige Intensitäten wie z.B. Schlusslicht- oder ambiente Lichtfunktionen. Leistungssteigerungen sind möglich, hierzu kann beispielsweise die Rückseite des FlatLight-Elements mit einer dünnen Sicht Aluminium bedampft wird oder eine weiß diffuse Oberfläche hinzugefügt wird. Deutliche Effizienzsteigerungen erfordern zusätzliche Optiken. Eine weitere Differenzierung und Individualisierung sind durch passive Segmentierung mittels Maskierung möglich. Aktive Segmentation mittels adressierbaren LEDs ist ebenfalls möglich. Abbildung 2 zeigt eine mögliche Anwendung.



Bild 2: Anwendungsspiel FlatLight | μDP

## 3. FlatLight | μDO Technologie

Eine weitere Möglichkeit zur Realisierung flacher Lichtelemente bietet die FlatLight | μDO-Technologie. Die Abkürzung steht für *Micro Diffuser Optics*. Die Mikrostrukturen oder auch diffraktive Diffusoren befinden sich auf der Innen- oder Außenseite eines Lichtleiters. Das Muster und die Charakteristik der Diffusoroptik kann variiert werden, um verschiedene Erscheinungen im beleuchteten- und unbeleuchteten Zustand zu erzielen. Die Größe und Form von

Lichtelementen sind bei dieser Technologie skalierbar. Durch die Gestaltung der Diffusoroptik kann die Lichtverteilung in gewissen Grenzen geformt werden. Die optische Effizienz ist im Vergleich zur FlatLight | μDP-Technologie damit leicht gesteigert. Dennoch empfiehlt sich die Verwendung vornehmlich für Lichtfunktionen mit niedriger Lichtintensität wie z.B. Positionslichtfunktionen. Die Transparenz der Lichtelemente ermöglicht eine Hinterleuchtung durch beispielsweise eine weitere Lichtfunktion. Die Größenordnung der Diffusoroptiken variiert je nach Anwendung zwischen 100 µm und wenigen µm. Dies ermöglicht auch die Verwendung sehr präziser grafischer Elemente wie beispielsweise Logos. Abbildung 3 zeigt den Unterschied zwischen einer erodierten Standardstruktur und einer Diffusoroptik.

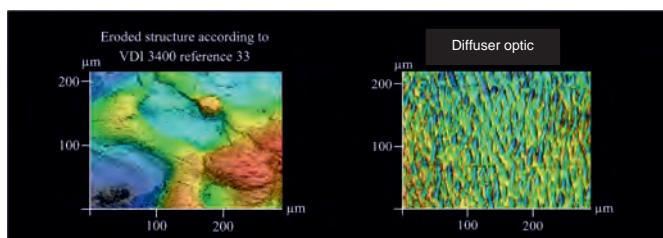


Bild 3: Vergleich zwischen einer erodierten Standardstruktur und einer Diffusoroptik

#### 4. FlatLight | SSO Technologie

Die FlatLight | Die SSO-Technologie nutzt die Implementierung von sehr kleinen Optiken in einen flachen Lichtleiter. Die Abkürzung steht für *Small Sized Optics*. Durch diese Optiken lassen sich Lichtverteilungen noch besser an die Bedürfnisse anpassen. Geometrie, Größe und Verteilung der Optik können je nach Anwendung variieren. Die typische Größenordnung beträgt etwa 0,6 bis 0,9 mm für gefräste Optiken und 0,1 bis 0,3 mm für gelaserte Optiken. Die optische Effizienz des FlatLight | Die SSO-Technologie ist im Vergleich zum FlatLight | μDO-Technologie gesteigert. Dies ermöglicht den Einsatz für Beleuchtungsfunktionen mit höherer Lichtintensität wie beispielsweise Stopplichtfunktionen. Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte Anwendung.



Bild 4: Beispielhafte FlatLight | SSO Anwendung

## 5. FlatLight | μMX technology

Die aktuell fortschrittlichste FlatLight-Technologie in Bezug auf Leistungsfähigkeit heißt FlatLight | μMX. Die Abkürzung μMX steht für *Maximum Performance*. Der Hauptunterschied zu den anderen Technologien ist die Verwendung verschiedener optischer Schichten, die zusammen ein Lichtmodul von weniger als 5 mm ergeben. Die Komponenten des optischen Systems sind in Abbildung 5 dargestellt.

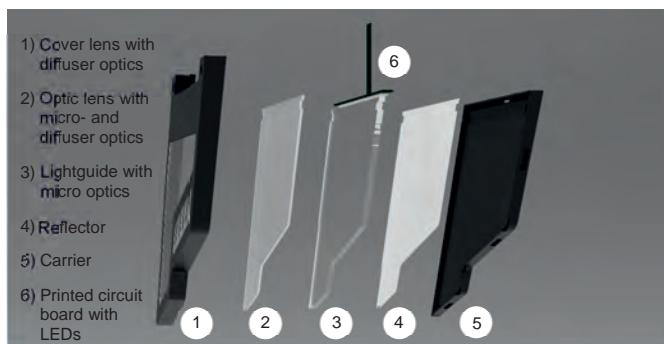


Bild 5: FlatLight | μMX Lichtmodul

Lichtmodule mit der FlatLight | μMX-Technologie können in Größe, Form und Krümmung variieren. Durch die individuelle und sogar schwebende Positionierung der Lichtmodule bietet diese Technologie neue Gestaltungsmöglichkeiten sowie Bauraum- und Gewichtseinsparungen. Abbildung 6 zeigt eine beispielhafte Anwendung des FlatLight | μMX-Technologie in einer Heckleuchte.



Bild 6: Beispielhafte FlatLight | μMX Anwendung

Das innovative optischen System der FlatLight | μMX-Technologie ermöglicht eine außerordentlich gleichmäßige Ausleuchtung der Lichtmodule ohne sichtbare Unterschiede in der Leuchtdichte. Die Größenordnung der verwendeten Mikrooptiken ist kleiner als 50 µm. Optiken dieser Größenordnung sind mit dem menschlichen Auge nicht mehr auflösbar, was zu einer sehr gleichmäßigen Erscheinung führt. Darüber hinaus lässt sich die Lichtverteilung kollimieren, um höhere Intensitäten, wie beispielsweise für Stopplicht oder Tagfahrlicht, effizient zu erreichen. Um die gesetzlichen Anforderungen an ein Schlusslicht (4 cd) zu erfüllen, wird nur etwa 1 W elektrische Leistung benötigt, während die meisten modernen LED-Leuchten mehr als 5 W benötigen, um diese Funktionalität zu erreichen. Somit leistet die FlatLight μMX-Technologie einen wesentlichen Beitrag zur Energieeinsparung.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

HELLA hat eine Vielzahl von FlatLight-Technologien entwickelt, um verschiedene Anforderungen zu bedienen sowie neue Möglichkeiten für ein einzigartiges Kundenerlebnis zu schaffen. Das Portfolio an Technologien beginnt bei geringer Komplexität für Signalbeleuchtung für geringe Lichtintensitäten und endet bei höherer Komplexität, um auch intensivere Signalbeleuchtungsfunktionen wie Stopplicht oder Tagfahrlicht auf effiziente Weise zu erreichen. Möglich wird dies durch die Kombination von Mikro- und diffraktiven Optiken. Die Verwendung bewährter LED-Technologie ermöglicht sogar die Verwendung verschiedener Farben sowie Multifunktionalität. HELLAS entwickelt bereits die nächste Generation von FlatLight-Technologien. Diese Generation wird mit einer aktiven Segmentierung einhergehen, um Megatrends wie Differenzierung, Individualisierung und Nachhaltigkeit zu bedienen. Darüber hinaus wird es neue Anwendungsfälle für Kommunikation ermöglichen – die FlatLight-Technologien werden digital (siehe Abbildung 7).



Bild 7: HELLA VISION | Digital FlatLight

- [1] M. Vollmer, 14th International Symposium on Automotive Lighting, S.493-499, April 2022



## **Das Ende von Haitz's Law?**

### **Folgt die LED Technologie noch den langjährigen Gesetzmäßigkeiten?**

## **The End of Haitz's Law?**

### **Does LED technology still follow long-standing laws?**

Dipl.-Ing. **Detlef Decker**,

Senior Consultant, PGUB Management Consultants GmbH, Wiesbaden

#### **Abstract**

A major pioneer of LED technology, the German-born scientist Roland Haitz, had already postulated over 20 years ago that the amount of light generated per LED increases by a factor of 20 every decade, while at the same time the cost of the luminous flux will decrease by a factor of 10.

This law, named after him, correctly predicted the development of LED technology over more than two decades and thus supported the development of roadmaps. The use of LEDs in certain product segments, such as in the signal lighting or in headlights it was possible to terminate accordingly.

In the meantime, in almost all LED lighting systems, the incandescent lamps have been replaced both technically and economically, and the Haitz mark of luminous flux of the 100W incandescent lamp has also been exceeded. The question arises whether further increases in luminous flux and cost reduction are possible at the previous speed.

This contribution will first show the mechanisms, effects and examples for Haitz's Law. On the basis of current developments in vehicle lighting technology, the technical and market economy framework conditions with the possible references for the further development of Haitz's Law are discussed. It concludes with a prognosis for the further development of the two paths of the law "Increase the luminous flux per LED" and "Reduce the cost per luminous flux".

## 1. Einleitung

Ein bedeutender Pionier der LED-Technologie, der deutschstämmige Wissenschaftler Roland Haitz, hatte schon vor über 20 Jahren postuliert, dass sich in jedem Jahrzehnte die pro LED erzeugte Lichtmenge sich um den Faktor 20 erhöht, während parallel die Kosten für den Lichtstrom um den Faktor 10 sinken.

Dieses nach ihm benannte Gesetz hat über mehr als zwei Jahrzehnte die Entwicklung der LED-Technologie richtig prognostiziert und so die Entwicklung von Roadmaps unterstützt. Der Einsatz von LED in bestimmten Produktsegmenten, wie z.B. in der Signalbeleuchtung oder in Scheinwerfern konnte entsprechend gut terminiert werden.

Inzwischen haben in nahezu allen lichttechnischen Systemen LED die Glühlampen sowohl technisch als auch wirtschaftlich abgelöst und auch die von Haitz eingesetzte Marke des Lichtstroms der 100W Glühlampe ist überschritten. Es stellt sich die Frage, ob weitere Lichtstromsteigerungen und Kostensenkungen in der bisherigen Geschwindigkeit möglich sind.

Dieser Beitrag wird zunächst die Mechanismen, Auswirkungen und Beispiele für Haitz's Law aufzeigen. Anhand von aktuellen Entwicklungen in der Fahrzeuglichttechnik werden die technischen und marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen mit den möglichen Bezügen für die weitere Entwicklung von Haitz's Law diskutiert. Den Abschluss bildet eine Prognose zu der weiteren Entwicklung der beiden Pfade des Gesetzes „Erhöhung des Lichtstroms pro LED“ und „Reduktion der Kosten pro Lichtstrom“.

## 2. Roland Haitz

Der in Deutschland geborene Autor seines Gesetzes, Dr. Roland Haitz (1935 - 2015) wechselte nach seinem Physikstudium an der Universität Karlsruhe in die USA, wo er nach ersten Tätigkeiten in der Halbleiterbranche ab 1971 bei Hewlett Packard Forschungsleiter für Optoelektronik wurde [1]. Bei seiner intensiven Forschungsarbeit an der damals noch jungen LED Technologie beobachtete er bald das exponentielle Wachstum, was ihn schon in den in den neunziger Jahren, noch vor der Entwicklung der blauen InGaN-Technologie, zur Postulierung seines Gesetzes brachte. 2000 stellte er dann bei dem bedeutenden amerikanischen Kongress “Strategies in Light” auch offiziell seine Gesetze vor.

## 2. Haitz's Law

Haitz's Gesetz beschreibt gleich mehrere Effekte. Der Originaltext lautet [2]:

"Every decade, for a given wavelength of light, the cost per lumen falls by a factor of 10 and the amount of light generated per LED package increases by a factor of 20."

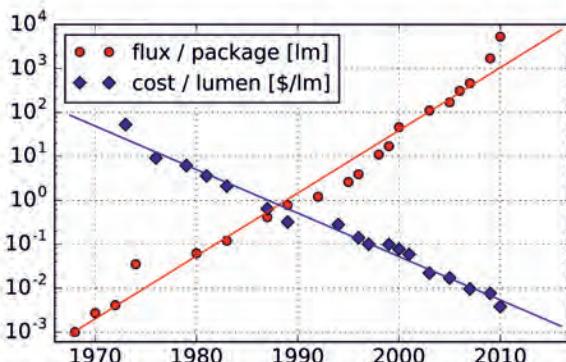


Bild 1: Häufigste Darstellung für die Effekte zu Haitz's Law [3]

Die Idee und Methode das Wachstum einer Technologie mit einer Gesetzmäßigkeit zu beschreiben ist nicht neu. Schon 1965 hatte Gordon Moore das nach ihm benannte Gesetz für integrierte Schaltkreise entwickelt. Auch er hatte ein exponentielles Wachstum beschrieben und bezog dieses auf die Anzahl der integrierten Schaltkreiskomponenten (Verdoppelung ca. alle 18 Monate).

Von großer technischer Bedeutung und Differenzierung zu der o.g. Referenz ist, dass R. Haitz drei wichtige kategorisierende Merkmale gewählt hat:

- Die exponentielle Entwicklung innerhalb einer Dekade:  
Hierdurch kann der Eintritt der LED-Technologie auf unterschiedliche Produktsegmente projiziert werden, da der Lichtstrombedarf bei den unterschiedlichen Applikationen deutlich variiert.
- Die Differenzierung für unterschiedliche Wellenlängen:  
Hier wird berücksichtigt, dass in den ersten zwei Jahrzehnten der LED Technologie blaue LEDs nicht in großen industriellen Maßstab produziert werden konnten. Folglich sollte die Gesetzmäßigkeit entsprechend zeitverzögert gelten.

- Mit der Projektion der Effekte auf das Package (und nicht nur auf den Chip) werden die technologischen Optionen von Multi-Chip Systemen berücksichtigt.

### 3. Mechanismen & Umsetzung

Die Mechanismen in der LED-Herstellung die R. Haitz schon bei der Definition seines Gesetzes für die Steigerung des Lichtstroms pro LED in Betracht ziehen konnte waren:

- Effizienz
- Chip-Größe und Form
- Leistung pro Chip
- Chip-Anzahl

Die Optionen für die Kostenreduktion des Lichtstroms waren und sind die klassischen Parameter für Industrialisierungen:

- Steigende Stückzahlen
- Höhere Automatisierung
- Höhere Effizienz von Produkt und Prozess

Die Umsetzung der postulierten Gesetzmäßigkeit lässt sich an den Darstellungen zeigen, die R. Haitz selbst in den 1990er Jahren verteilt hat:

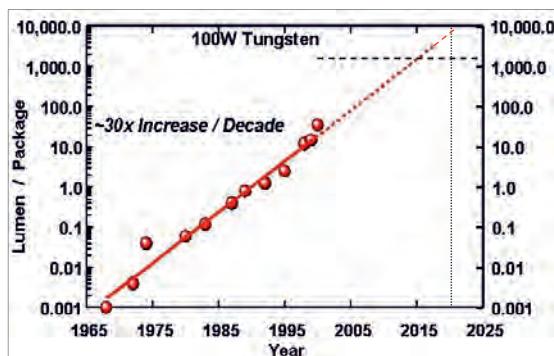


Bild 2: Haitz's Law, Darstellung zu „Steigerung des Lichtstroms pro LED“ [5]

Für die prognostizierte Erzielung der 10.000 lm-Marke im Jahre 2020 kann beispielhaft die Multi-Chip LED „Cree® XLamp® CXB3590“ mit Varianten bis 14.000 lm benannt werden.

Bei der Prognose der Kostenreduktion des Lichtstroms ist Haitz's Law nach über 20 Jahren sogar noch deutlicher unterschritten worden. Gerade in der letzten Dekade hat der Eintritt der LED-Technologie in die Allgemeinbeleuchtung die Wirtschaftlichkeit überproportional verstärkt.

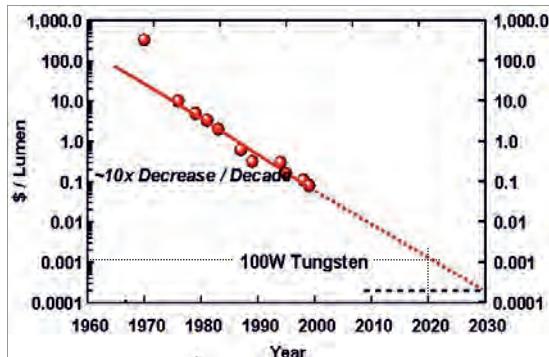


Bild 3: Haitz's Law, Darstellung zu „Kostenreduktion des Lichtstroms“ [5]

In Bild 3 werden für 2020 im Diagramm Kosten von 0,001 \$/lm vorhergesagt.

Tatsächlich werden heute in der Allgemeinbeleuchtung Retrofit-Lichtquellen angeboten, bei denen dieser Wert nicht nur für die LED-Lichtquelle, sondern das komplette Produkt mit Elektronik und Packaging erreicht wird.

Für die Bedeutung von Haitz's Law ist es aber nicht entscheidend, ob die numerischen Parameter präzise eingehalten wurden. Auch das bekanntere Mooresche Gesetz wurde in der Vergangenheit bei der Prognose der Verdoppelung der Entwicklungsgeschwindigkeit mehrfach neu interpretiert.

Wesentlich wichtiger ist das über mehrere Jahrzehnte mit der Gesetzmäßigkeit von Haitz die LED-Technologie in ihrer Entwicklung weitgehend richtig prognostiziert und die Planungen für die Marktentwicklung sowie die Produktleistung und Kosten verlässlich unterstützt werden konnten.

#### 4. Perspektiven

Die Rahmenbedingungen für die Entwicklung der LED Technologie haben sich in den letzten Jahrzehnten weitgehend verändert. Die reine LED Chip Herstellung hat eine sehr hohe Technologiereife erreicht.

Die hohen internen Quanteneffizienzen und Auskopplungswirkungsgrade sind kaum noch zu erhöhen und die Industrialisierung hat u.a. durch die Allgemeinbeleuchtung zu minimalen Herstellungskosten geführt. Eine weitere Entwicklung in der exponentiellen Geschwindigkeit ist nicht zu erwarten.

Zusätzlich arbeiten viele neue LED Systeme mit einer Chip-Integration. Beispiele hierfür sind  $\mu$ LED, ISELED® oder LED-Pixel-Module für Matrix Scheinwerfer.

Hier entfallen die Referenzparameter „ $\Phi$ /Package“ und „\$/lm“.

Noch bedeutender ist, dass die niedrigen Kosten des einzelnen Chip bei heutigen LED-Lichtsystemen nur noch einen kleinen Anteil der Systemkosten abbilden. Der deutlich größere Anteil liegt inzwischen beim Aufwand für die elektronische Ansteuerung, dem Thermomanagement, der Systemintegration und z.T. auch der Software.

#### 5. Zusammenfassung

In der ersten Phase der Entwicklung der LED Technologie hat Haitz's Law die wichtigsten Parameter weitgehend richtig prognostiziert. Hierdurch konnte die Planung und Entwicklung von neuen Produkten und Marktsegmenten verlässlich unterstützt werden.

Bei vielen modernen LED Produkten können die Chip-bezogenen Kriterien von Haitz's Law „ $\Phi$ /Package“ und „\$/lm“ nicht klar identifiziert werden und verlieren an Bedeutung.

Durch die Veränderungen in der Wertschöpfung liegt der Fokus für neue Produktgenerationen jetzt in der Elektronik, dem Thermomanagement und der Systemintegration.

- [1] Arbeitskreis Heimatpflege Durmersheim, Homepage:  
[www.ak-heimatpflege-durmersheim.de](http://www.ak-heimatpflege-durmersheim.de)
- [2] ORGANIC LIGHTING SYSTEMS, englischsprachige Homepage:  
<https://organiclighting.com/2012/12/haitz-law-and-the-future-of-led-lighting/>
- [3] Wikipedia, englischsprachige Homepage:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Haitz%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Haitz%27s_law)
- [4] Cree, Inc., englischsprachige Homepage:  
<https://www.cree.com/led-components/products/xlamp-leds-integrated-arrays/xlamp-cxb3590>
- [5] Fa. Lumileds, elektronisch überlassene Unterlage, Ende 1990er Jahre







ISBN 978-3-18-092400-7, E-ISBN 978-3-18-102400-3

Bildquelle: © Karlsruher Institut für Technologie