

Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik



VDI-Berichte 2278

VDI-BERICHTE

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH



VDE

Mess- und
Automatisierungstechnik
Optische Technologien

Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik

7. VDI-Tagung, Karlsruhe, 11. und 12. Mai 2016



VDI-Berichte 2278

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.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 <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

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

Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092278-2

Vorwort

1

Hochauflösende Scheinwerfertechnologien

<i>B. Reisinger, N. Winterer, M. Reinprecht</i>	Auf der Suche nach der Auflösung – Überlegungen zu hochauflösenden Scheinwerfersystemen	3
<i>C. Schmidt, B. Willeke, B. Fischer</i>	Laser versus Hochleistungs-LED – Vergleich der Einsatzmöglichkeiten bei hochauflösenden Matrix-Scheinwerfersystemen	15
<i>C. Gut, J. R. Vargas Rivero, S. Berlitz, C. Neumann</i>	Neuartige Lichtfunktionen auf Basis hochaufgelöster Scheinwerfersysteme	25
<i>I. Möllers, J. Moisel, R. Fiederling, S. Grötsch</i>	Ein effizienter hochauflösender ADB-Scheinwerfer auf Basis von mikointegrierten LED-Arrays	37
<i>S. Saralajew, G. Benderman</i>	Matrix-Beam Algorithm: How fast is possible?	51

Kamera & Sensorik

<i>H. Lietz</i>	Hochauflösende 3D-PMD-Kamera zur Gefahrenerkennung in der Kraftfahrzeugtechnik	63
-----------------	--	----

Posterbeiträge

<i>M. Baum</i>	Aktives Ausrichten für Kameras in der Fahrzeugtechnik – Klebstoffe für hochgenaues Ausrichten von Komponenten mit großen Produktionsstückzahlen	71
<i>C. Simon, M. Butenuth, K. Schulze</i>	Auslegung von Lichtassistenzfunktionen mittels einer Simulations- und Messumgebung	77
<i>S. Saralajew, S. Mates, K. Stefaniak, H. Zimmermann</i>	Rapid Prototyping of headlamp light distributions	83
<i>M. Ogonda, W. Pohlmann</i>	OLED im Automobil – Wo geht die Reise hin?	95
<i>C. Bauer, M. Kiesel, A. Austerschulte</i>	Segmentiertes Fernlicht der nächsten Generation – Die Wahrnehmung der adaptiven Lichtfunktionen	101
<i>S. Schildmann</i>	Reflektoren im Scheinwerfer: Simple Technik oder doch ein modernes Hightech-Produkt?	107
<i>A. Greil, B. Eichinger, W. Kriener</i>	Zweckmäßige Einstellgenauigkeit moderner LED-Scheinwerfer – Vergleich zwischen Mensch und Maschine	119

Signalfunktionen und Innenraumbeleuchtung

<i>M. Barthel, S. Thomschke, G. Koether, C. Neumann</i>	Ambiente Innenraumbeleuchtung und Aufmerksamkeitslenkung in Fahrzeugen	127
<i>I. Mennig, S. Rosenhammer, J. F. Krems</i>	Potenzial innovativer Heckleuchten zur Unfallvermeidung	147
<i>M. Richter</i>	Einsatz von volumenstreuenden Kunststoffen in Frontscheinwerfern	159
<i>M. Mügge, C. Hohmann</i>	VISION ONE – Innovation, Präzision, Faszination – Einheitliches Signallichtkonzept für mehr Komfort und Sicherheit	171

Laser: Sicherheit & Performance

<i>K. F. Albrecht, E.-O. Rosenhahn</i>	Laserperformance im Fernlicht – eine experimentelle Analyse von Reichweite und subjektiven Fahrerlebnis	193
<i>M. Helmer, C. Neumann</i>	Quantifizierung des Blendpotenzials laserbasierter Scheinwerfersysteme	205
<i>J. Knittel, M. Licht, S. Jin, C. Buchberger</i>	Sicherheitskonzepte für Laserscheinwerfer	217

Lichtbasierte Fahrerassistenz

<i>P. Jahn</i>	Auflösungskriterien adaptiver Scheinwerfersysteme	225
<i>S. Omerbegovic, C. Funk, C. Neumann,</i>	Dynamische Sicherheitsbereiche für hochauflösende Fernlichtsysteme	237
<i>A. Z. Krahnstöver, S. Thomschke, G. Koether, M. Vollrath</i>	Licht führt!? – Einsatzmöglichkeiten von lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen in Einfädelsituationen	245

Laser: Scannende Systeme

<i>G. Kloppenburg, J. Roth, A. Wolf, R. Lachmayer</i>	Optische Eigenschaften eines RGB-Laserprojektionsmoduls für den Verkehrsraum	255
<i>E. Tatartschuk, T. Kreuzer</i>	Laserbasiertes scannendes Pixellicht: Rotatorischer Spiegelansatz	269
<i>U. Hofmann, T. von Wantoch, S. Gu-Stoppel, F. Senger, C. Mallas</i>	Verfahren zur dynamischen Lichtverteilungs-Steuerung in Scheinwerfern basierend auf resonanten MEMS-Laser-Scannern	281

Vorwort

In der automobilen Lichttechnik findet seit einigen Jahren eine Revolution statt. Neue Technologien für Lichtquellen, Optiksysteme und dynamische Lichtfunktionen drängen immer schneller auf den Markt um Sicherheit und Komfort auf nächtlichen Straßen zu verbessern. Außen- und Innenraumbeleuchtung sind zunehmend wichtige Kriterien zur Auswahl des Fahrzeugs, wobei Sehen mit Sicherheit und gesehen werden mit Design verbunden ist. Der Fahrzeuginnenraum wiederum wird inzwischen ambient gestaltet um eine besondere Atmosphäre und auch eine Unterstützung bei nächtlicher Fahrt zu bieten. Für die dynamischen Systeme werden Sensoren benötigt, die häufig auch auf optischen Technologien beruhen.

Unter der fachlichen Trägerschaft der VDI/VDE-Gesellschaft GMA greifen Experten im Mai 2016 diese Entwicklung zum siebten Mal in der Tagung „Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik“ auf. Die aktuellen Themen der Fahrzeugbeleuchtung, sowie neue Ansätze und Trends für Licht und Sensorik bilden den Kern dieser Tagung, bei der sich Experten fachübergreifend austauschen und Einsteiger auf diesem Gebiet das Know How in geballter Form aufgreifen.

Ziel der Tagung ist der Informationsaustausch zwischen Experten aus industrieller Praxis und Forschung. Angesprochen sind Vertreter der Automobilindustrie, Systemlieferanten, Leuchtmittelhersteller, Halbleiterindustrie, Dienstleister und Produzenten aus den Bereichen Sensorik undameratechnik 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 Teilnahme und auf interessante Diskussionen.

Programmausschuss

Dipl.-Ing. Doris Boebel, *Automotive Lighting Reutlingen GmbH, Reutlingen*

Dr. Karsten Eichhorn, *Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt*

Dr. Reinhold Fiess, *Robert Bosch GmbH, Renningen*

Dr.-Ing. Wolfgang Huhn, *Audi AG, Ingolstadt*

Prof. Dr.-Ing. Peter M. Knoll, *Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe*

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer, *DLR e.V., Braunschweig*

Peter Löbig, *BMW AG, München*

Dr.-Ing. Erik Marquardt, *Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf*

Prof. Dr. Cornelius Neumann, *Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (Vorsitz)*

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

Sebastian Thomschke, *Volkswagen AG, Wolfsburg*

Jörg Michael Zimmermann, *Continental Automotive GmbH, Regensburg*

Ideelle Träger



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Auf der Suche nach der Auflösung Überlegungen zu hochauflösenden Scheinwerfersystemen

Searching for (re)solution Considerations regarding high resolution headlamps

Dipl.-Ing. **Bettina Reisinger**, Dipl.Ing. **Nina Winterer**,
ZKW Lichtsysteme GmbH, Wieselburg;
Markus Reinprecht, M.Sc.,
Zizala Lichtsysteme GmbH, Wieselburg

Kurzfassung

Die Scheinwerferentwicklung hat in den letzten Jahren zwei große Neuentwicklungen gebracht. Einerseits wurde durch die Einführung von Matrix-Scheinwerfern das dauerhafte Fahren im Fernlichtbetrieb ermöglicht, ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Andererseits gestattet der Einsatz von Laserlichtquellen durch die hohe Leuchtdichte die Umsetzung von völlig neuen Scheinwerferkonzepten, sowohl was die erzielbaren Beleuchtungsstärken als auch was das Design betrifft.

Der Wunsch diese Entwicklungen zu kombinieren und weiterzuführen stellt die Scheinwerferbranche vor neue Herausforderungen. Neue Lichtquellen werden benötigt, ebenso lichtformende Elemente wie beispielsweise MEMS-Bauteile, DLPs oder LCDs. Während alle diese Technologien bereits erfolgreich im Bereich der Unterhaltungselektronik etabliert sind, stellt der Einsatz im Automobilbereich neben der optischen Umsetzung neue Anforderungen, beispielsweise an Temperaturmanagement, Elektronikkonzepte und die sensorische Anbindung an das Fahrzeug.

In der vorliegenden Arbeit werden kurz die möglichen Technologien und ihre Vor- und Nachteile diskutiert. Außerdem wird erläutert, welche Voraussetzungen die Lichtquelle, das lichtformende Element, aber auch die Fahrzeugumgebung erfüllen müssen, um ein sinnvoll einsetzbares hochauflösendes Scheinwerfersystem zu entwickeln. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der erreichbaren und benötigten Auflösung und deren Umsetzung.

Abstract

During the last years, two major developments happened in headlamp design. On the one hand, the introduction of matrix headlamps allows the permanent use of high beam without

glaring other road users. On the other hand, due to their high luminance laser-based lightsources enable completely new concepts for headlamps both with regard to achievable illuminance as well as design.

The desire to combine and further drive these developments presents new challenges for the headlamp industry. New lightsources are required, as well as light modulating elements like MEMS-components, DLPs or LCDs. While all of these technologies have been successfully established in consumer electronics, the adoption in automotive applications presents new challenges, for example regarding temperature management, concepts for electronics and the connection to and implementation in the car.

In the present work, the possible technologies are discussed with regard to their advantages and disadvantages. Additionally, it is explained which characteristics the lightsource, the light modulating element, but also the environment in the vehicle have to fulfill in order to develop a useful high resolution headlamp. A special focus is on the reachable and required resolution and its implementation.

1. Überblick über mögliche Technologien

Im Moment wird sehr viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit zur Untersuchung von unterschiedlichen Lichtquellen und Modulationselementen investiert, da noch nicht klar ist, welche Technologie am besten für den Einsatz in Scheinwerfern geeignet ist und sich schlussendlich durchsetzen wird. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind einige mögliche Lichtquellen für den Einsatz in hochauflösenden Scheinwerfern, gruppiert nach Funktionsprinzip, aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht über verschiedene mögliche Lichtquellen für den Einsatz in hochauflösenden Scheinwerfern

LED	Laser	andere
Standard LED	LARP (laser activated remote phosphor)	Gasentladungslampen
Hochluminanz LED	RGB	

Die Auswahl an möglichen lichtformenden Elementen ist nicht ganz so groß, allerdings gibt es auch hier einige verschiedene Möglichkeiten:

Tabelle 2: Übersicht über verschiedene Bildmodulierende Elemente

Destruktive Bildformung	Konstruktive Bildformung
DLP (digital light processing)	Scannende Systeme
LCD (liquid crystal display)	2D-LED-Arrays

Die Unterscheidung in destruktive und konstruktive Elemente in Tabelle 2 erfolgt anhand eines grundlegenden Unterschieds in der Funktionsweise: Bei der destruktiven (oder auch passiven) Bildformung wird eine bestehende Lichtverteilung durch den Einsatz einer schaltbaren transmissiven oder reflektiven Maske in den gewünschten Bereichen abgeschaltet, indem das erzeugte Licht entweder von der Maske oder einem zusätzlichen Bauteil absorbiert wird. Bei Verwendung der konstruktiven (aktiven) Bauteile hingegen wird durch An- und Abschalten der Lichtquelle in Abhängigkeit von der Position im Fernfeld das Ausblendszenario umgesetzt. Offensichtlich haben die konstruktiven Systeme einen Effizienzvorteil, sind aber tendenziell komplexer und damit anspruchsvoller in der Umsetzung.

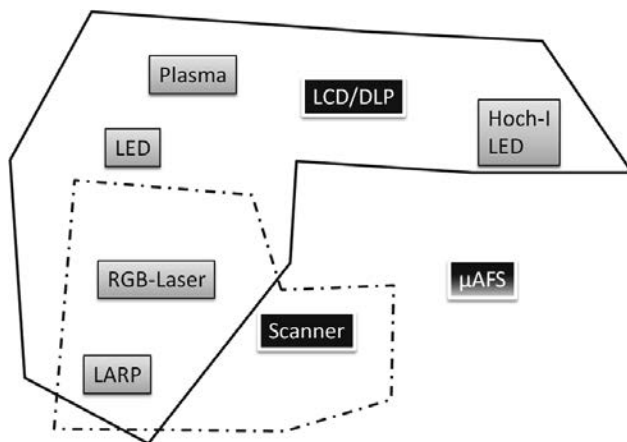


Bild 1: Mögliche Kombinationen von Lichtquelle und Modulationselement für hochauflösende Scheinwerfer

Abhängig von der Leuchtdichte der Lichtquelle und dem zur Verfügung stehenden Lichtstrom kann nicht jede Lichtquelle mit jedem Modulationselement sinnvoll eingesetzt werden. Bild 1 zeigt, welche Kombinationen mit den verfügbaren Lichtquellen und Modulationselementen prinzipiell möglich sind. Zweidimensionale Pixelarrays wie sind als Sonderfall zu betrachten, da hier Lichtquelle und Modulationselement in einem Bauteil vereint sind. Einige der dargestellten Kombinationen werden im Folgenden näher erläutert:

Kombinationen mit DLP

Die Technologie rund um den DLP ist am Projektor-Markt gut etabliert und bereits sehr weit entwickelt. Das Funktionsprinzip des bildgebenden Elements basiert auf sehr vielen, einzeln ansteuerbaren Spiegeln, die unabhängig voneinander entweder in einen Ein- oder Auszustand geschaltet werden können. Bild 2 zeigt dies anhand einer schematischen Darstellung.

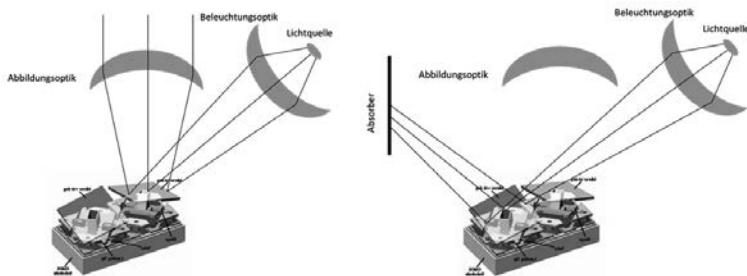


Bild 2: Funktionsprinzip des DLPs. Links im Bild ein Einzelpixel im "Ein"-Zustand, rechts ein Einzelpixel im "Aus"-Zustand

Der große Vorteil von DLPs ist die große Anzahl an Einzelpixeln. Selbst beim einfachsten erhältlichen DLP stehen 854x480 Pixel zur Verfügung. Bei einem angenommenen Bildfeld in Fernfeld von $\pm 20^\circ$ wie es für eine Fernlichtverteilung sinnvoll erscheint erhält man damit eine mögliche Auflösung von ca. 0.05° .

Außerdem kommen als mögliche Lichtquellen sowohl LED- als auch Laserbasierte Varianten in Frage, auch der Einsatz von RGB-Lasern wäre technisch machbar. Durch die Verwendung von LEDs als Lichtquelle könnte ein früherer Markteinstieg als mit laserbasierten Varianten ermöglicht werden.

Gegen den Einsatz von DLPs sprechen die sehr komplexe Elektronikumgebung die benötigt wird, sowie die Gesamtsystemeffizienz. Es muss von der Lichtquelle immer der maximale Lichtstrom zu Verfügung gestellt werden, auch wenn nur geringe Teile der Lichtverteilung

tatsächlich beleuchtet werden sollen da die Modulation nicht durch Ein- und Ausschalten der Quelle, sondern durch Kippen des dem jeweiligen Pixel zugehörigen Einzelspiegels erfolgt.

Systeme mit Scannenden Spiegeln

Das Funktionsprinzip basiert auf einem scannenden Spiegel der einen Laserstrahl so schnell in ein oder zwei Achsen ablenkt, dass für das menschliche Auge ein stehendes Bild entsteht. Als Lichtquelle ist entweder ein blauer Laserstrahl, aber auch ein RGB-Laser möglich. In Bild 3 ist eine schematische Darstellung eines Scannenden Systems bei Verwendung von blauer Laserstrahlung und anschließender Weißkonvertierung gezeigt. Der Einsatz von LEDs oder Hochstrom-LEDs ist nicht möglich, da die Leuchtdichte nach der Konversion am optischen Konverter nicht mehr ausreicht um mit sinnvollen Effizienzen über die kleinen Scanspiegel auf die Straße projiziert zu werden.

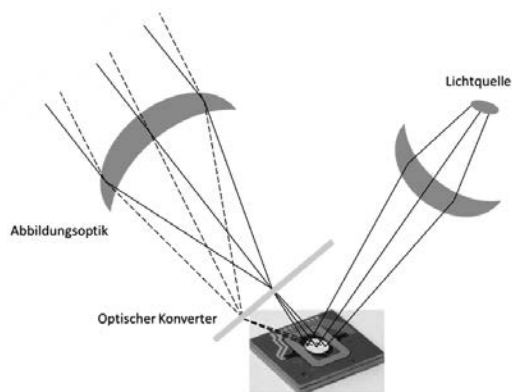


Bild 3: Funktionsprinzip eines Laser Scanners bei Verwendung von blauer Laserstrahlung in Verbindung mit einem optischen Konverter zur Erzeugung von Weißlicht

Der Laser kann in Abhängigkeit von der Spiegelposition ein- und ausgeschaltet (oder auf beliebige Helligkeitswerte moduliert) werden, so dass eine sehr hohe Maskierungsauflösung entsteht, die im Prinzip nur von der praktisch umsetzbaren Modulationsfrequenz abhängt. Ein weiterer Vorteil ist, dass für das Erzeugen von dunklen Bereichen in der Lichtverteilung, beispielsweise um die Blendung von anderen Verkehrsteilnehmern zu verhindern, Licht gar nicht erst erzeugt werden muss – es wird nur dann erzeugt wenn es wirklich gebraucht wird.

2. Definition von Auflösung

Im Moment gibt es in der Automobilbranche noch keine klare Festlegung darauf, wie der Begriff Auflösung sinnvoll definiert werden kann. Während der Entwicklung der bestehenden Matrix- Scheinwerfer kamen wir bei ZKW zu der Erkenntnis, dass die aus der Beamer- und Displaytechnologie gebräuchliche Definition von Auflösung in Form von einzeln ansteuerbaren Pixeln für den Einsatz in der Automobilbeleuchtung nicht geeignet ist. Unser Ansatz ist es, zwei unterschiedliche Begriffe, nämlich die *Maskierungsauflösung* und die *Bildauflösung* für die Beschreibung der Auflösung zu verwenden, um den besonderen Anforderungen im Scheinwerfer gerecht zu werden.

Maskierungsauflösung

Als Maskierungsauflösung wird im Folgenden die minimale Distanz bezeichnet, um die ein ausgeblendeter Bereich verschoben werden kann. Diese Größe ist entscheidend für die Hauptanwendung von hochauflösenden Scheinwerfern, nämlich das Ausblenden von anderen Verkehrsteilnehmern.

Bildauflösung

Der Begriff Bildauflösung bezeichnet den kleinstmöglichen Bereich, der beleuchtet werden kann. Diese Größe ist entscheidend für das Darstellen von Symbolen, Kanten, aber auch den Bereich zwischen mehreren ausgeblendeten Bereichen.

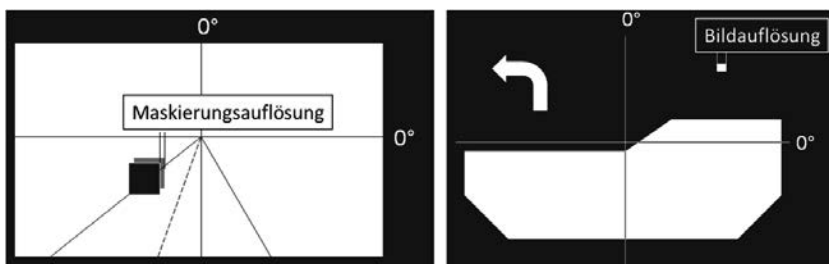


Bild 4: Darstellung der beiden Auflösungsgrößen

Diese beiden Auflösungsgrößen, die in Bild 4 nochmals anschaulich dargestellt sind, sind entscheidend für die Beurteilung von hochauflösenden Scheinwerfern. Die Maskierungsauflösung ist maßgeblich für das Hauptanwendungsgebiet von ADB-Systemen, nämlich das

Ausblenden von anderen Verkehrsteilnehmern. Die Bildauflösung hingegen wird relevant, wenn zusätzliche Funktionen, wie das Darstellen von Schrift, Logos, etc. gefordert sind.

Bei der Aufgabenstellung für die Entwicklung von hochauflösenden Scheinwerfern stellt sich nun die Frage: Was ist denn eigentlich hochauflösend? Und welche Bild- und Maskierungsauflösung macht Sinn für Scheinwerfer?

Ein Versuch diese Fragen zu beantworten, basiert auf mehreren Faktoren:

Kleinster auszublendender Bereich:

Zur Abstandsberechnung wird die maximale gesetzlich erlaubte Lichtstärke von 215000 cd herangezogen. In einem Abstand von 463 m entsprechen 215000 cd einer Beleuchtungsstärke von 1 lx. Unterschreitet ein anderer Verkehrsteilnehmer diesen Abstand, muss im entsprechenden Bereich ausgeblendet werden, damit es nicht zur Blendung kommt. Als kleinstmöglicher Verkehrsteilnehmer angenommen wird ein Motorrad mit einer Breite von 1m, für das ein Bereich von 1.5m ausgeblendet wird. Ein Abstand von 1.5 m in einer Entfernung von 463 m entspricht einem Öffnungswinkel und damit einer mindestens erforderlichen Bildauflösung von 0.18° (Formel 1).

$$Abstand_{1lx} = \sqrt{\frac{215000 \text{ cd}}{1 \text{ lx}}} = 463 \text{ m}$$

$$Auflösung = \tan^{-1} \left(\frac{1.5m}{463m} \right) = 0,18^\circ$$

Formel 1: Berechnung des zum Ausblenden eines Motorrades nötigen Winkelbereichs

Genaueste Verschiebung:

Die Leuchtweitenregulierung erfolgt üblicherweise in Schritten von <0.1°, sodass diese Werte der Maskierungsauflösung erzielt werden müssen wenn der LWR vollständig ersetzt werden soll.

Mechanische Stabilität & Kameratoleranzen:

Ein wichtiger Einflussfaktor ist die mechanische Stabilität und die Genauigkeit der Einstellung des Scheinwerfers im gesamten Temperaturbereich. Typischerweise weisen Scheinwerfer einen Drift von bis zu 0.3° horizontal und 0.1° vertikal auf.

Die Genauigkeit der Abstimmung zwischen Fahrzeug und Kamera bewegt sich üblicherweise im Bereich von 0.1°.

Diese Werte müssen beim Ausblenden als Sicherheitsbuffer vorgehalten werden, und reduzieren somit die nutzbare Auflösung.

Kombiniert man alle diese Punkte, kommt man zu einem Größenordnungsbereich von 0.1° - 0.18° , der als hochauflösend bezeichnet werden kann.

3. Latenzzeiten

Als Latenzzeit ist die Zeit definiert, die vom Erscheinen eines auszubblendenden Objekts bis zur korrekten Reaktion des Scheinwerfers durch die nötigen Abläufe im System Kamera – Fahrzeug – Scheinwerfer vergeht. Bei bestehenden Scheinwerfern mit Auflösungen von ca. 1° ist diese Zeitspanne zu vernachlässigen. Mit der im vorhergehenden Kapitel gestellten Anforderung von Auflösungen $<0.2^\circ$ wird es aber zunehmend wichtig, diese Verzögerungen mit zu betrachten.

Um diesen Einflussfaktor zu untersuchen, wurde eine Verkehrssituation folgendermaßen angenommen:

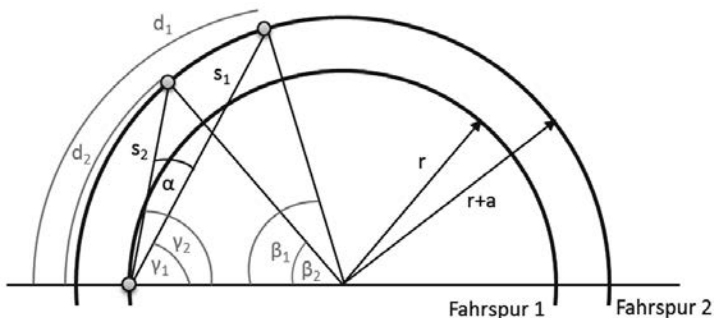


Bild 5: Darstellung der für die Beurteilung der Latenzzeit angenommenen Verkehrssituation

Auf einer Fahrbahn mit einer Breite von $a=3\text{m}$ bewegen sich auf den jeweiligen Fahrspur zwei entgegenkommende Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von jeweils 100 km/h aufeinander zu. Ein Fahrzeug ist mit einem hochauflösenden ADB-Scheinwerfer ausgestattet, der die gesetzlich erlaubte Lichtstärke von 215000 cd aufweist. Die angenommene Latenzzeit von der Erkennung des entgegenkommenden Fahrzeugs bis zur Reaktion des Scheinwerfers beträgt $50\text{ }\mu\text{s}$. Es wurde sowohl eine gerade Fahrbahn, als auch Kurvenradien zwischen $r=50\text{ m}$ und $r=500\text{ m}$ untersucht.

Das Fahrzeug auf Fahrspur 1 ist mit einem hochauflösenden ADB-Scheinwerfer ausgestattet. Das entgegenkommende Fahrzeug auf Fahrspur 2 befindet sich zum Startzeitpunkt auf der durch die Kreisbogenlänge d_1 angegebenen Position. Während der Latenzzeit bewegt es sich bis zur durch die Kreisbogenlänge d_2 angegebenen Position. Die Winkeländerung α gibt nun die nötige bzw. nutzbare Auflösung des hochauflösenden Scheinwerfers an. Die Berechnungsschritte sind in den Formeln 2 zusammengefasst.

$$s_1^2 = r^2 + (r + a)^2 - 2 \cdot r \cdot (r + a) \cdot \cos \beta_1 \quad s_2^2 = r^2 + (r + a)^2 - 2 \cdot r \cdot (r + a) \cdot \cos \beta_2$$

$$\gamma_1 = \cos^{-1} \left(\frac{s_1^2 + r^2 - (r + a)^2}{2 \cdot s_1 \cdot r} \right) \quad \gamma_2 = \cos^{-1} \left(\frac{s_2^2 + r^2 - (r + a)^2}{2 \cdot s_2 \cdot r} \right)$$

$$\alpha = \gamma_2 - \gamma_1$$

Formeln 2: Berechnung der Winkeländerung α der beiden sich aufeinander zu bewegenden Fahrzeuge

Die Ergebnisse der Berechnung für verschiedene Kurvenradien und Startabstände zwischen den beiden Fahrzeugen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Wenn sich die beiden Fahrzeuge bis auf 20m aneinander annähern, steigt auf geraden Straßen die Winkeländerung drastisch auf 1.35° innerhalb der Latenzzeit von 50 ms. In Kurven ist dies noch ausgeprägter. Das heißt also, dass durch die Latenzzeit in einem Scheinwerfersystem mit einer Auflösung von 0.1° lediglich 1.35° ausgenutzt werden können - deutlich weniger als der Scheinwerfer eigentlich ermöglicht.

Ein Fahrzeug auf der Gegenfahrbahn in einer Entfernung von 20m entspricht einem Blickwinkel von ca. 8.5° . Außerhalb dieses zentralen Blickfeldes können hochauflösende Systeme also nur sehr eingeschränkt und weiter unterhalb ihrer technischen Möglichkeiten genutzt werden.

Tabelle 3: Berechnungsergebnisse für die Winkeländerung zwischen zwei sich aufeinander zu bewegendes Fahrzeuge für verschiedene Kurvenradien.

α (Kurvenradius, Fahrzeugabstand, Latenzzeit, Geschwindigkeit): α [°]							
Abstand zu entgegengerichteten Fahrzeug [m]	Kurvenradius [m]						
	Gerade Straße	500	400	300	200	100	50
500	0,00	0,16	0,20	0,27	0,40		
450	0,00	0,16	0,20	0,27	0,40		
400	0,00	0,16	0,20	0,27	0,40		
350	0,00	0,16	0,20	0,27	0,40		
300	0,01	0,16	0,20	0,27	0,40	0,78	
250	0,01	0,17	0,21	0,27	0,40	0,79	
200	0,01	0,17	0,21	0,28	0,41	0,79	
150	0,02	0,18	0,22	0,28	0,41	0,80	1,55
100	0,05	0,21	0,25	0,31	0,44	0,83	1,57
90	0,06	0,22	0,26	0,32	0,45	0,84	1,58
80	0,08	0,24	0,28	0,34	0,47	0,85	1,60
70	0,10	0,26	0,30	0,36	0,50	0,88	1,62
60	0,14	0,30	0,34	0,40	0,53	0,92	1,66
50	0,20	0,36	0,40	0,47	0,60	0,98	1,72
40	0,32	0,48	0,52	0,58	0,71	1,10	1,84
30	0,58	0,74	0,78	0,84	0,98	1,36	2,11
20	1,35	1,51	1,55	1,62	1,75	2,15	2,90
10	5,86	6,03	6,07	6,14	6,28	6,70	7,51
5	22,51	22,67	22,71	22,78	22,92	23,31	24,08
	$\leq 0.2^\circ$	hochauflösend					
	$0.2^\circ - 0.5^\circ$	Übergangsbereich					
	$0.5^\circ - 1^\circ$	Mittlere Auflösung					
	$1^\circ - 3^\circ$	Stand der Technik (High Performance)					
	$> 3^\circ$	Grobe Auflösung					

Aus unserem einfachen Modell können wir also zwei Dinge lernen: Einerseits ist die drastische Auswirkung der Latenzzeit auf die nutzbare Auflösung zu betrachten, d.h. dass es unter Umständen gar nicht sinnvoll ist, extrem hochauflösende Scheinwerfer einzusetzen, solange die Latenzzeiten in der gesamten Informationskette nicht verkürzt werden können.

Andererseits können wir schlussfolgern, dass eine hohe Auflösung lediglich im zentralen Blickfeld von ca. $\pm 8.5^\circ$ sinnvoll ist, da in den Randbereichen die Eigenschaften des Systems ohnehin nicht ausgenutzt werden können.

In Bild 6 sind die Ergebnisse einer Untersuchung der Häufigkeit von Kurvenradien auf Straßen in Deutschland [1] dargestellt. Man kann erkennen, dass Kurven mit Radien von 100 m oder kleiner mit einer Häufigkeit von 10% eher selten sind. Dies wären aber die Umstände, unter denen die Matrix-Systeme die im Moment Stand der Technik sind ihre Auflösungsleistung von 1° - 2° zur Gänze ausnutzen können, wie in Tabelle 3 ersichtlich ist.

Auf geraden Straßen und Kurven mit großen Kurvenradien haben hochauflösende Systeme ($<0.2^\circ$ Auflösung) gegenüber dem Stand der Technik (1° - 2° Auflösung) einen großen Vorteil. 90% aller Straßen in Deutschland haben einen Kurvenradius von über 100 m, 75% einen Radius von über 200 m, und beinahe 60% einen Radius von mehr als 300 m - in diesen Situationen bieten hochauflösende Systeme große Vorteile und sind damit ein wichtiger Beitrag zur Verkehrssicherheit.

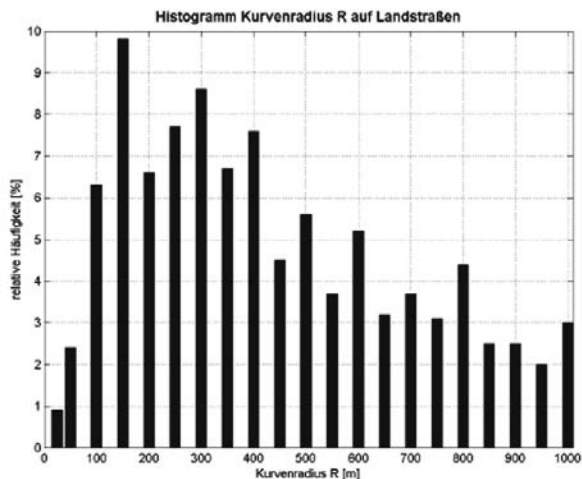


Bild 6: Relative Häufigkeit von Kurvenradien auf Straßen in Deutschland [1]

4. Kontrast

In der bisherigen Diskussion wurde der Kontrast zwischen beleuchteten und ausgeblendeten Bereichen auf der Fahrbahn noch nicht berücksichtigt. Die Anforderungen die diesbezüglich erfüllt werden müssen, können aber durchaus der ausschlaggebende Punkt sein, weswegen sich eine der unter Punkt 1 vorgestellten Technologien gegenüber den anderen durchsetzen kann. In [2] wurde gezeigt, dass die Performance des bildgebenden Elements hier mindestens in einem Bereich von 160:1 - 240:1 innerhalb eines Winkelbereichs von 1° liegen, bzw. diese Werte noch übertreffen muss, da durch kostengetriebene Limitierungen der Objektivqualität eine zusätzliche Verschlechterung des Kontrasts zu erwarten ist. Die aus Projektoranwendungen bekannten Angaben von Kontrastverhältnissen von 10000:1 oder noch höher beziehen sich auf den absoluten Schwarz- und Weißpunkt, und sind mit den Anforderungen in der Entwicklung von Autoscheinwerfern nicht vergleichbar. Hier scheint es momentan dass die effizienteren konstruktiven bildformenden Elemente, die auf durchgehenden optischen Konvertern basieren, hier einen deutlichen Nachteil aufweisen.

5. Zusammenfassung

Um ressourcenoptimiert entwickeln zu können, ist es nötig aus den unterschiedlichen Technologien die im Moment für den Einsatz in hochauflösenden Scheinwerfersystemen in Frage kommen, die geeignetsten auszuwählen. Während die konstruktiven/aktiven bildformenden Bauteile wie Scanner und Pixelarrays einen Effizienzvorteil haben, ist die Umsetzung vor allem was den Kontrast betrifft anspruchsvoller im Vergleich zu destruktiven/passiven Bauteilen (DLP und LCD).

Es muss weiter untersucht werden, was hochauflösend im Zusammenhang mit Scheinwerferanwendungen eigentlich bedeutet. In diesem Kontext sind als wichtiger Faktor die Latenzzeiten des Systems Kamera - Fahrzeug - Scheinwerfer zu berücksichtigen. Unser Vorschlag ist es, hochauflösende Module lediglich im zentralen Bildfeld des Fahrers einzusetzen und in den Randbereichen durch grober aufgelöste Elemente zu ergänzen, um kostenoptimierte Lösungen anzubieten.

-
- [1] Gabriel Schwab: Untersuchung zur Ansteuerung adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfer, Dissertation KIT, 2003
 - [2] Jörg Moisel: Requirements for future high resolution ADB-Modules, Proc. Int. Symp. on Automotive Lighting (p. 161-169), 2015

Laser versus Hochleistungs-LED

Vergleich der Einsatzmöglichkeiten bei hochauflösenden Matrix-Scheinwerfer-Systemen

Christian Schmidt, Benjamin Willeke, Bernd Fischer,
HELLA KGaA Hueck & Co., Lippstadt

Kurzfassung

In a few years there will be automotive headlamps with a resolution much higher than nowadays. At the moment four different technologies are considered to realize such matrix headlamps. Two of these technologies – the DMD- and the LCD-technique – can be operated alternatively with laser diodes or with high power LEDs as light sources. In this paper firstly the advantages and disadvantages of laser diodes compared to high power LEDs are discussed in detail. Afterwards the chances and challenges of both light sources are described if there are especially used in DMD and LCD systems. Right now it is difficult to predict which technology and which light source will succeed in the market.

1. Einleitung

Die Einführung des Blendfreien Fernlichtes (ADB) erfolgte im Jahr 2010 auf Basis von mechatronischen Scheinwerfersystemen, welche im Falle von vorausfahrenden oder entgegenkommenden Fahrzeugen Bereiche der Fernlichtverteilung derart modifizieren konnten, dass eine Blendung der Verkehrsteilnehmer ausgeschlossen war. Dies erfolgte durch Bewegung von Lichtmodulen oder/und Blenden. Seit 2013 verdrängen „Matrix“-Scheinwerfer die mechatronischen Systeme. Bei Matrix Scheinwerfern wird die Adaption der Lichtverteilung durch das Ein- und Ausschalten von LEDs realisiert. Liegt der Fokus aktuell auf Systemen mit einer Kanalanzahl von weniger als einhundert schaltbaren Elementen pro Scheinwerfer, ist für künftige Fahrzeugmodelle mit hochauflösenden Systemen zu rechnen, die mehrere tausend Bereiche schalten können. Grundsätzlich ergibt sich die Frage, welche Lichtquelle für derartige Systeme verwendet wird. Im Folgenden wird die Einsatzmöglichkeit von zwei für den Scheinwerferbereich neuen Lichtquellen diskutiert: Die Laserdiode und die Hochleistungs-LED. Beide Lichtquellen verfügen aufgrund Ihrer hohen Leuchtdichte über das Potential, die Gesamtgröße der zu realisierenden optischen Module zu reduzieren. Dies ist für die Erfüllung aktueller Designvorgaben für Scheinwerfersysteme außerordentlich wichtig.

Zunächst werden die spezifischen Eigenschaften der Laser-Technologie aufgelistet und – soweit erforderlich – mit den Eigenschaften von LEDs verglichen. Für zwei Varianten von hochauflösenden Matrixsystemen wird das Potential beider Lichtquellen diskutiert: für ein LCD- und ein DMD-System.

2. Laserdioden: Vor- und Nachteile

Laserdioden haben Eigenschaften, die sich stark von allen anderen Lichtquellen, auch von Hochleistungs-LEDs, unterscheiden. Im Folgenden sind die wichtigsten Unterschiede aufgelistet. Zwei Vorteile von Laserdioden sind eng miteinander verknüpft. Die Lichtaustrittsfläche ist bei Lasern extrem klein, viel kleiner als bei LEDs. Bei konstantem Lichtstrom bewirkt dies hohe Leuchtdichten auf den fast punktförmigen Flächen.

- Leuchtdichte

Hohe Leuchtdichten sind bei der Scheinwerferauslegung äußerst günstig. Alle optischen Elemente können sehr gering dimensioniert werden und die Größe der Frontlinse kann ebenfalls klein bemessen werden. Unter Design Gesichtspunkten gibt es dadurch ganz neue Möglichkeiten, das Erscheinungsbild des Scheinwerfers zu gestalten. Doch betrifft diese Dimensionsreduzierung ausschließlich die optischen Teile des Scheinwerfers. Kühlkörper, Steuergeräte etc. sind nicht betroffen. Die Komplexität mag hier im Einzelfall höher sein als bei der LED-Technologie.

- Lichtaustrittsfläche

Durch die sehr kleinen Lichtaustrittsflächen von Laserdioden ist es einfacher, Lichtverteilungen auf der Straße zu generieren. Insbesondere ist es leichter, scharf begrenzte Flächen zu erzeugen. Für Abblendlichtverteilungen ist es häufig wünschenswert, viel Licht knapp unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze zur Verfügung zu haben. Mit konventionellen Lichtquellen, auch mit LEDs, ist dies weitaus schwieriger zu realisieren als mit Laserdioden.

- Polarisation

Zu den Eigenschaften von Laserdioden gehört die Generierung von polarisiertem Licht. Wird ein monochromatischer Laser mittels eines Phosphors konvertiert, geht diese Eigenschaft verloren. Auf der Rückseite von Standard LC-Displays ist eine Polarisationsfolie aufgebracht. Wird ein solches Display mit nicht-polarisiertem Licht durchleuchtet, führt dies an der Folie zu einem Verlust von etwa 50 Prozent. Monochromatisches, polarisiertes Laserlicht kann indes

nahezu verlustfrei transmittieren. Die Kombination eines roten, grünen und blauen Lasers gestattet es, weißes Licht mit sehr hoher Effizienz bei der Nutzung eines LC-Displays zu erzeugen.

- Eignung für Scan-Technologie

Die Scan-Technologie für Scheinwerfer ist bereits verschiedentlich diskutiert worden. Dabei wird ein einzelner Lichtstrahl innerhalb eines bestimmten Raumwinkels sehr schnell in sehr kleinen Schritten bewegt. Ähnlich wie bei der Erzeugung eines Bildes mittels einer Kathodenstrahlröhre wird die Lichtverteilung hier aus einzelnen Punkten aufgebaut. Dazu muss der Lichtstrahl angemessen klein und von hinreichender Leuchtdichte sein. Hierfür ist die Lasertechnologie hervorragend geeignet.

- Eignung für Hologramme

Seit einiger Zeit wird systematisch untersucht, inwieweit Hologramme im Bereich der automobilen Lichttechnik eingesetzt werden können. Scheinwerferlichtverteilungen könnten mittels Hologramm-Folien generiert werden. Im Bereich des Styling ergeben sich dadurch völlig neue Möglichkeiten. Laser ist die ideale Lichtquelle für Hologramme. Mit wachsender Lichtaustrittsfläche und mit breiter werdendem Spektrum der Quelle gehen die typischen Hologramm-Eigenschaften verloren.

- Marketing

Endkunden kaufen Fahrzeuge nicht ausschließlich nach ökonomisch rationalen Kriterien. Von neuen Technologien geht häufig ein besonderer Reiz aus. Ein Fahrzeug mit Laser-Technologie anzubieten, kann die Attraktivität des Produktes erhöhen. Unter Marketinggesichtspunkten ist die Fahrzeugbeleuchtung mittels Laser ein interessantes Feature.

Neben den hier genannten Vorteilen von Laserdioden im Vergleich zu LEDs gibt es eine ganze Reihe von Herausforderungen beim Einsatz der Lasertechnologie. Ob Laser in der automobilen Lichttechnik weite Verbreitung finden oder ein Nischenprodukt bleiben wird, wird ganz entscheidend davon abhängen, wie weit es gelingt, diese Herausforderungen zu meistern.

- Lebensdauer

Während die extrem lange Lebensdauer bei den LEDs zu den großen Vorteilen dieser Technologie gehört, ist die Lebensdauer von Laserdioden derzeit ein ungelöstes Problem. Obschon Laserdioden in der industriellen Fertigung seit vielen Jahren eingesetzt werden, ist die Lebensdauer nach wie vor gering. Für eine Zusatzfernlichtfunktion, die selten aktiviert wird, mögen die aktuellen Lebensdauern der Dioden hinreichend sein. Wenn aber Laser-Lichtfunktionen dauerhaft aktiviert werden sollen (z.B. Vorfeldlichtverteilungen, blendfreies Fernlicht, Schlusslicht), dann muss die Lebensdauer der Dioden noch drastisch gesteigert werden.

- Temperaturempfindlichkeit

Die Temperaturempfindlichkeit der Laserdioden hängt mit der Lebensdauer eng zusammen. Während des Fahrens muss eine hinreichend niedrige Betriebstemperatur sichergestellt sein. Der dazu notwendige Aufwand übersteigt den für LED-Systeme deutlich.

- Augensicherheit

Bei allen Laser-Anwendungen ist die Berücksichtigung der Augensicherheit eine zwingende Notwendigkeit. Tritt in einem Schadensfall (z.B. beim Brechen des konvertierenden Phosphors) Laserstrahlung aus, kann dies schwere Augenverletzungen zur Folge haben. Eine fail safe Funktion kann etwa durch zusätzliche Sensoren realisiert werden, welche das Spektrum des emittierten Lichts analysieren und im Fall spektraler Abweichungen das Abschalten der Funktion veranlassen. Doch auch für Einstellungs- und Reparaturarbeiten in Werkstätten müssen das Personal entsprechend geschult und geeignetes Equipment vorgehalten werden.

- Spektrale Eigenschaften

Ein bislang kaum beachteter Punkt beim Einsatz von Laser im Scheinwerfer ist der laserspezifische Farbwiedergabe-Index. Konventionelle Lichtquellen haben kontinuierliche oder nahezu kontinuierliche Spektren. Schmale Lücken im Spektrum sind vernachlässigbar. Bei lasergenerierten Spektren indes gibt es breite Spektralbereiche ohne bzw. nahezu ohne Strahlung. Dadurch entstehen „gaps“ im Spektrum. Wenn es Objekte gibt, die schmalbandig im Bereich dieser Lücken reflektieren, werden diese – angestrahlt im Laser-Licht - nahezu unsichtbar. Ob diese spektralen Lücken zu Sicherheitsproblemen führen, ist bislang noch nicht untersucht worden.

- Preis

Der letzte hier genannte Punkt mag in seiner Bedeutung mittelfristig abnehmen. Doch im Moment ist der Preis für Laserdioden enorm hoch und damit ein stark limitierender Faktor. Deshalb wird Laser kurzfristig ein exklusives Feature im High-end-Segment bleiben. Mittelfristig werden die zusätzlichen Vorteile des Lasers gegen die Mehrkosten abgewogen werden müssen.

3. Laser und Hochstrom-LED im Matrixsystem

Nach der erstmaligen Einführung von Matrixsystemen mit mehr als 80 LED-Lichtquellen im Jahr 2016 wird die Entwicklung von Systemen mit deutlich mehr schaltbaren Bereichen intensiv verfolgt. Aktuell sind dabei vier Konzepte in Untersuchung [1]:

1. Laser-Scanner
2. Hochaufgelöste LED
3. LCD-Technologie
4. DMD-Technologie

Wie oben bereits erwähnt basiert der Laser-Scanner auf der Idee, einen Laserstrahl über einen Leuchtstoff zu leiten entsprechend dem Elektronenstrahl in einer Kathodenstrahlröhre. Die Ablenkung des Laserstrahls wird in diesem Fall mithilfe von beweglichen Spiegeln durchgeführt. Für diese Technologie wird ein Laserstrahl mit hoher Leistungsdichte benötigt. Da dieses Konzept mit LEDs nicht sinnvoll umzusetzen ist, wird der Laserscanner im Rahmen dieses Artikels nicht weiter betrachtet. Zu bemerken ist allerdings, dass der Laserscanner aufgrund der möglichen hohen Effizienz ein für die Zukunft interessantes Konzept darstellt. Der Laserscanner ist die einzige Technologie, bei der für den gewünschten Dynamikbereich kein zusätzlicher Lichtstrom vorgehalten wird [2]. Die hochaufgelöste LED wird im Projekt „μAFS“ untersucht und stellt ein weiteres Konzept dar, um einen hochaufgelösten Scheinwerfer zu realisieren. Dabei wird die Pixelzahl, welche aktuell im Bereich von 10^3 Pixeln liegt, in den nächsten Jahren um mindestens eine Größenordnung vergrößert werden. Da dies eine selbstständige LED-Technologie ist und nicht mittels Laser realisiert wird, wird sie hier nicht weiter behandelt.

Es verbleiben somit die LCD- und DMD-Technologien als HD Umsetzungen, welche sowohl den Einsatz von Lasern als auch von LEDs als Lichtquellen erlauben.

- LCD-Technologie

Bei der LCD-Technologie für Scheinwerfer bedient man sich eines Projektionsmoduls, bei welchem man in der Brennebene statt einer Blende ein LC-Display einfügt. Die Grundkon-

zeption eines Projektionsmoduls bleibt erhalten. Das Schalten der einzelnen Pixel des Displays führt nun entsprechend zu hellen oder dunklen Bereichen in der resultierenden Lichtverteilung. War es mit dem Vario-Konzept möglich, die Form der Hell-Dunkel-Grenze einer Lichtverteilung zu modifizieren, ergibt sich nun die Möglichkeit, jedes einzelne Pixel mit einer Intensität zwischen 0 und 100% zu schalten. Dies führt zu einer deutlichen Funktionserweiterung. Ein wichtiger Aspekt bei dieser Technologie ist die notwendige Verwendung von polarisiertem Licht. Dieser Umstand wird weiter unten noch näher betrachtet.

- DMD Technologie

Die DMD (Digital Mirror Device) Technologie besteht als Kernkomponente aus einem mikro-mechanischen Spiegelarray, wobei jeder Spiegel einen Kantenlänge von ca. 15 µm hat. Diese Miniaturspiegel sind in Arrays von ca. 400.000 bis zu mehreren Megapixeln unter der Bezeichnung DLP von der Firma Texas Instruments erhältlich. Die Hauptanwendung dieser Technologie ist heute in Bildprojektoren zu finden. Jeder einzelne Spiegel ist zwischen zwei Positionen schaltbar. Das Licht der beleuchtenden Lichtquelle wird entweder in die Auskopeloptik oder auf einen Absorber geleitet. Das Schalten der Spiegel erfolgt dabei mit einer Frequenz von mehreren Kilohertz. Auf diese Weise ist eine große Zahl von Helligkeitsabstufungen realisierbar.

Beide genannten Technologien können für bekannte oder neuartige Scheinwerferfunktionen eingesetzt werden. Die notwendige Performance des Moduls ergibt sich dabei aus den zu realisierenden Lichtfunktionen. Betrachtet man das Beleuchtungskonzept für die beiden Technologien, so ist in beiden Fällen eine möglichst parallele Beleuchtung der Kernkomponente (LCD oder DMD) erforderlich. Die Ursache hierfür unterscheidet sich dabei für die Technologien. Das LCD-Display erfordert eine möglichst parallele Beleuchtung, um die optische Weglänge des Lichtes durch die aktive Schicht konstant zu halten. Andernfalls verschlechtert sich das Kontrastverhältnis des Systems. Bei der Beleuchtung des DMD hingegen erfordert der geringe Kippwinkel der Spiegel eine Beleuchtung, welche die Trennung des vom Spiegel reflektierten Lichtes in den beiden Zuständen sicherstellt. Diese auf den ersten Blick ähnlichen Anforderungen an LCD und DMD führen dennoch zu deutlich unterschiedlichen Herausforderungen. Während beim LCD die Diagonale des zu beleuchtenden Feldes eine Größe von beispielsweise 8 cm aufweist, ist dieser Wert beim DMD mit 1 cm für den ersten automotive qualifizierten DMD-Chip erheblich kleiner.

Zwischen Matrix-Systemen und konventionellen mechanischen ADB-Systemen gibt es einen spezifischen Unterschied von großer Bedeutung. Beim mechanischen System wird das

Lichtbündel z.B. beim Durchfahren einer Kurve in den zu beleuchtenden Bereich geschwenkt, ohne dass hierfür zusätzlicher Lichtstrom erforderlich wird. Um einen vergleichbaren Effekt beim Matrix-System zu erreichen, ist entweder zusätzlicher Lichtstrom zu aktivieren oder zuvor absorbiertes Licht „auf Durchlass“ zu schalten. Das heißt, eine Dynamik der Lichtfunktion wird über den Vorhalt von Lichtstrom erreicht. Der Entfall der mechanischen Elemente ist über eine größere Anzahl von Lichtquellen oder leistungsstärkere Lichtquellen zu kompensieren.

Die Aufgabe bei der Entwicklung eines derartigen Moduls liegt also darin, eine Beleuchtungseinheit zu generieren, die das Element LCD oder DLP mit einem hohen Lichtstrom parallel beleuchtet. Eine Festlegung eines minimal notwendigen Nutzlichtstromes ist natürlich projektabhängig und wird signifikant von den geplanten Funktionen beeinflusst. Zur Realisierung einer im wesentlich vollständigen Matrixlichtverteilung sind ca. 3500 lm theoretisch nutzbarer Lichtstrom erforderlich.

Aus diesen Anforderungen wird deutlich, dass sich die beiden Konzepte hier signifikant unterscheiden. Während die Fläche des LCD-Displays eine Größe aufweist, die ein Beleuchtungskonzept mit einer Vielzahl von Lichtquellen zulässt, um eine entsprechende Menge an quasi „parallelem“ Lichtstrom zur Verfügung zu stellen, ist ein DMD-Spiegel auf eine oder wenige Lichtquellen angewiesen, da andernfalls die Winkelanforderung nicht mehr eingehalten wird. Der DMD benötigt also eine Lichtquelle mit kleiner Fläche und hoher Leuchtdichte. Wie oben beschrieben sind dies Eigenschaften, die eine laserbasierte Lichtquelle grundsätzlich erfüllen kann. Die heute zur Verfügung stehenden Weißlicht-Laserquellen liefern allerdings weder den notwendigen Lichtstrom, noch lassen sie sich räumlich eng zusammenführen, so dass die Verwendung eines Lasers für ein DMD aktuell ein optisches Konzept notwendig macht, bei dem Laser und Leuchtstoff getrennt werden und mehrere Laser einen Leuchtstoff beleuchten, um die erforderlichen Performancewerte zu erreichen. Ein derartiges Konzept wurde von Texas Instruments auf der CIE 2016 in Las Vegas vorgestellt (Quelle).

Langfristig sind derart komplexe Beleuchtungssysteme durch neue Lösungen zu ersetzen. Beispielsweise kann über eine Laser-Array ein Phosphor direkt von mehreren Lichtquellen beleuchtet werden. Alternativ kann ein DLP Chips mit größerer Fläche verwendet werden. Für Multimediaanwendungen stehen Chips > 1 Inch Diagonale zur Verfügung. Eine weiterentwickelte Weißlichtlaserlichtquelle könnte die Performanceanforderungen für ein DLP Modul erfüllen. Die Nutzung von Hochstrom-LEDs, die bei Flächen von 2 mm² einen Lichtstrom von >1200 lm emittieren, sind für erste Anwendungen hier eine sehr gute Alternative. Der so zu erreichende Gesamtlichtstrom des Moduls ist allerdings nicht allein für eine komplette Lichtverteilung nutzbar.

Das LCD-System kann aktuell über die Verwendung von Hochstrom-LEDs einen Lichtstrom von theoretisch 4.000 lm zur Verfügung stellen. Bei einer thermischen bedingten Maximalnutzung von 1600 lm ergibt sich auf diese Weise ein gut nutzbarer Dynamikbereich. Die Verwendung eines Weißlicht-Lasers bringt momentan keine deutlichen Vorteile. Im Mischverbau kann ein erhöhtes Maximum im Zentralbereich erzeugt werden, hier gibt es aber auch konventionelle Möglichkeiten.

Das LCD Konzept ist für erste Anwendungen sehr gut mit der Nutzung von Hochstrom LEDs umzusetzen, aber auch hier gibt es eine Zukunft die zum Laser zeigt [3].

Eine Schwachstelle des LCD Konzeptes liegt in der notwendigen Polarisierung des Lichtes. Wird direkt eine polarisierte Lichtquelle verwendet, reduziert sich die Baugröße des Lichtmoduls und zugleich steigt die optische Effizienz. Dies kann über die Nutzung von jeweils roten, grünen und blauen Lasern als RGB Laser LCD Modul erreicht werden. Erste Muster wurden aufgebaut, welche die Vorteile dieses Konzeptes aufzeigen. Allerdings stellt sich die oben erwähnte Frage, ob eine auf drei schmalbandigen Spektrallinien beruhende Ausleuchtung nicht zu Erkennungsschwächen führt.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl die LCD als auch die DLP Technologie können in ersten Applikationen mit Hochstrom LEDs als Lichtquelle realisiert werden. Im Fall des DLP Moduls kann so allerdings nur ein Teilbereich des für einen Scheinwerfer notwendigen Ausleuchtungsbereiches realisiert werden. Die Weiterentwicklung von Weißlichtlaserlichtquellen ist so für die DMD Technologie ein wichtiger Schritt. In jedem Fall wird die Performance von DLP Modulen durch größere Chipflächen deutlich gesteigert. Für LCD Systeme ist bis auf weiteres die Hochstrom LED die beste Lichtquelle. In der Variation des RGB Lasermoduls kann aber auch für diese Technologie der Laser einen zukünftigen Einsatz finden.

In wenigen Jahren wird es Automobilscheinwerfer geben, deren Auflösung um mehrere Größenordnungen über dem liegt, was technisch heute möglich ist. Für deren Realisierung kommen mehrere Technologien und im Fall der DMD- und LCD-Technologien sogar zwei alternative Lichtquellen in Betracht. Welche dieser Ansätze sich durchsetzen werden, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab und ist momentan schwer zu prognostizieren.

Literatur:

- [1] Schmidt, C., Wilks, C. (2014). High Definition Concepts for Next Generation ADB Module. VISION Proceedings.
- [2] BMBF Projektsteckbrief: Photonik Forschung Deutschland ;Förderinitiative „Intelligente Beleuchtung“; Intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer (iLaS)
- [3] Willeke, B., Schüler, F., Kley, F., Fischer, G. (2015). High Resolution Headlamps – Investigation towards a RGB-Laser LCD Backlight. 11th International Symposium on Automotive Lighting – ISAL 2015 (531 – 536). München: Herbert Utz Verlag.

Neuartige Lichtfunktionen auf Basis hochauflöster Scheinwerfersysteme

Dipl. Ing. **C. Gut**, Audi AG, Ingolstadt,
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe;
B. Sc. **J. R. Vargas Rivero**, Audi AG, Ingolstadt;
Dipl. Ing. **S. Berlitz**, Prof. Dr. rer. nat. **C. Neumann**,
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Matrix DMD Technologie mit der Matrix Scanner Technologie verglichen und die Vor- und Nachteile diskutiert. Im Anschluss werden die Eingangsparameter für die Berechnung neuartiger Lichtfunktionen gezeigt. Abschließend wird ein Modell zur Verzerrungskompensation vorgestellt.

Abstract

This paper is comparing the Matrix DMD Technology and the Matrix Scanner Technology followed by a discussion about the pros and cons of these technologies. Subsequent to this, the parameter for calculating new light functions will be explained. A model which shows the distortion compensation concludes the paper.

1. Einführung

Derzeitige Lichtsysteme bieten bereits heute einen hohen Funktionsumfang an. Das Abblendlicht kann beispielsweise in seiner Intensität und dem Ausleuchtbereich an die Umwelt- und Straßenbedingungen angepasst werden. Im Fernlichtbereich können sogenannte Matrix LED Scheinwerfer Objekte entblenden, dimmen oder markieren [1].

Zukünftig sollen neuartige Lichtfunktionen den Fahrer in der Spurführung und Wahrnehmungsaufgabe unterstützen. Durch die geringe Auflösung der derzeitigen Matrix LED Scheinwerfer von weniger als 100 Pixeln ist der Funktionsumfang beschränkt. So ist es beispielsweise nicht möglich eine an die Umwelt und die Straßentopografie angepasste perspektivische Lichtverteilung zu projizieren. Funktionen, die mit anderen Verkehrsteilnehmern interagieren, sowie eine situationsabhängige Ansteuerung können durch die fehlende Flexibilität nur eingeschränkt umgesetzt werden. Die für die Darstellung von neuartigen Lichtfunktionen benötigten Technologien sind im folgenden Kapitel genauer beschrieben.

2. Technologievergleich

Im Folgenden werden zwei Kerntechnologien diskutiert, mit denen neuartige Lichtfunktionen umgesetzt werden können. In der 2014 erstellten Ausarbeitung [2] wurde bereits die strahlgeführte Matrix Scanner Technologie mit der flächenmodulierten Matrix DMD Technologie hinsichtlich benötigter Laserleistung und einem funktionsabhängigen Nutzungsgrad verglichen. In dieser vorliegenden Ausarbeitung wird der Systemwirkungsgrad substantiell untersucht und ein umfassender Vergleich zwischen beiden Technologien auf Systemebene durchgeführt.

Bei den flächenmodulierten Systemen wird die DMD Technologie, auch Matrix DMD Technologie genannt, exemplarisch verwendet, denn der benötigte Chip-Satz liegt bereits als automotiv qualifiziertes Bauteil vor [3]. Substantielle Abweichungen zwischen der DMD- und LCD-Technologie werden in dieser Ausarbeitung mit berücksichtigt.

2.1 Systemwirkungsgrad

Für die Berechnung des Systemwirkungsgrades der Matrix DMD und der Matrix Scanner Technologie gelten folgende Randbedingungen: Für beide Technologien gilt eine Konversionsrate R von $120 \text{ lm/W}_{\text{opt}}$ und eine typische Wall-Plug-Efficiency (WPE) der Laserdioden von 28 % bei 25°C [4].

Der Systemwirkungsgrad wird unabhängig vom funktionsabhängigen Nutzungsgrad der jeweiligen Technologie ermittelt. Der Nutzungsgrad der Matrix Scanner Technologie gibt hierbei das Verhältnis zwischen vorgehaltener und tatsächlich im Mittel abgerufener Laserleistung an. Der Nutzungsgrad der Matrix DMD Technologie hingegen gibt das Verhältnis zwischen dem in der Ziellichtverteilung enthaltenem Lichtstrom und dem Lichtstrom der Lichtquelle an und ist ein Maß für die Absorption. Die funktionsabhängigen Nutzungsgrade, ebenso wie die Abhängigkeit des Nutzungsgrades durch die Anpassung der Lichtverteilung an einer statischen Ziellichtverteilung mittels Dimmung der einzelnen Mikrospiegel, wurde bereits in der Arbeit im Jahr 2014 durchgeführt [2].

Alle Effizienzwerte gelten für einen Temperaturbereich von 20°C bis 25°C , so dass temperaturabhängige Effekte nicht berücksichtigt werden. Somit wird auch eine temperaturabhängige Dimmung der Spiegel in der Matrix DMD Technologie zur Vermeidung des Hinge-Effekts und zur Erhöhung der Lebensdauer nicht berücksichtigt [5]. Der Transmissionsgrad von üblicherweise 85 % der Scheinwerferabschlussscheibe kann bei Bedarf jeweils mit dem Systemwirkungsgrad multipliziert werden.

2.1.1 Matrix Scanner Technologie

Wirkungsgrad Laser-Primäroptik $\eta_{\text{Primäroptik}}$: Die verwendete Primäroptik kann theoretisch so ausgelegt werden, dass maximal 1 % der Laserleistung aufgrund der Beugung für die Anwendung ungenutzt bleibt. Der Wirkungsgrad $\eta_{\text{Diffraction}}$ liegt demnach bei 99 %. Aufgrund der Oberflächenreflexion beträgt der Transmissionsgrad $\eta_{\text{Transmission}}$ ca. 97 % basierend auf einem Brechungsindex des Linsenmaterials von 1,4 und einem Brechungsindex von Luft von 1. Somit ergibt sich eine Gesamteffizienz für die Laser-Primäroptik $\eta_{\text{Primäroptik}}$ von 96 %. Je nach technischer Umsetzung kann noch ein Beitrag für die Strahlkombinierung hinzukommen, welcher hier allerdings nicht weiter berücksichtigt wird [6].

Wirkungsgrad Mikrospiegel $\eta_{\text{Sca_Mirror}}$: Durch eine Bragg Beschichtung ist ein Wirkungsgrad des Mikrospiegels $\eta_{\text{Sca_Mirror}}$ von 99,5 % realisierbar [7].

Sekundäroptik $\eta_{\text{Sca_Se}}$: Fluoreszenzkonverter weisen eine lambert'sche Abstrahlcharakteristik auf. Somit beträgt der ausgeleuchtete Raumwinkel $\Omega_{\text{Konverter}}$ unter der Annahme einer dichroiden Schicht auf der Rückseite des Konverters, genau π . Der Wirkungsgrad der für die Kollimierung und Abbildung benötigten Sekundäroptik setzt sich aus dem Transmissionsgrad und der Beugungseffizienz der Linse, sowie einem Überstrahlverlust zusammen. Deppisch [6] berechnete in ihrer Arbeit den Überstrahlverlust, der dem Anteil an lambert'scher Ausgangsstrahlung entspricht, welcher außerhalb des Linsenkegels mit dem Öffnungswinkel Ω_{Linse} liegt. Zur Berechnung wird von einer Brennweite f der Linse von 35 mm und einem maximalen Linsendurchmesser D_{Linse} von 45 mm ausgegangen. Der von der Brennweite abhängige Wirkungsgrad der Sekundäroptik $\eta_{\text{Sca_Se}}$ kann in diesem Fall mit 35 % angenommen werden. Die oben aufgelisteten Wirkungsgrade sind auch in Tabelle 1 zu finden. Der Systemwirkungsgrad der Matrix Scanner Technologie $\eta_{\text{Sca_Sys}}$ beträgt 33,4 %.

Tabelle 1: Übersicht Systemwirkungsgrad Matrix Scanner Technologie

Beitragendes Element	Wirkungsgrad η
Laser Primäroptik $\eta_{\text{Sca_Pr}}$	96 %
Mikrospiegel $\eta_{\text{Sca_Mirror}}$	99,5 %
Sekundäroptik $\eta_{\text{Sca_Se}}$	35 %
Systemwirkungsgrad $\eta_{\text{Sca_Sys}}$	33,4 %

2.1.2 Matrix DMD Technologie

Der Wirkungsgrad der Laser-Primäroptik η_{DMD_Pr} ist gleich zu dem oben bereits bestimmten Wirkungsgrad der Matrix Scanner Technologie und wird auf $\eta_{DMD_Pr} = \eta_{Sca_Pr} = 96 \%$ gesetzt.

Der Wirkungsgrad der Beleuchtungsoptik η_{DMD_Ilu} ist vom benötigten Kontrast und der damit verbundenen Brennweite abhängig. Deppisch [6] ermittelte in ihrer Arbeit einen Wert von 64 %. Diese umfasst sowohl die Effizienz der Beleuchtungsoptik als auch das Überstrahlen der DMD Chipfläche.

Der Wirkungsgrad des DMD Spiegels η_{DMD_Mirror} kann dem Datenblatt [3] entnommen werden. Die Fenstertransmission ist mit 97 %, die Spiegel Reflektivität mit 88 %, der Füllfaktor mit 92 % und die Diffraktionseffizienz mit 86 % angegeben. Bezugnehmend auf die LCD Technologie ist erwähnenswert, dass der Füllfaktor unabhängig von der Auflösung ist, da die Leiterbahnen, CMOS Speicherzellen und Elektroden hinter den Mikrosiegeln positioniert sind. Dies ist bei der LCD Technologie nur bedingt der Fall und somit hat die Auflösung der LCD Technologie eine direkte Auswirkung auf die Effizienz [8].

Der Wirkungsgrad der Sekundäroptik η_{DMD_Se} ist gegenüber der Matrix Scanner Technologie deutlich höher, da das Licht bereits kollimiert ist. Somit treten keine Verluste in Abhängigkeit der Brennweite auf. Die Effizienz kann, wie auch bei der Laser-Primäroptik, mit 96 % angenommen werden.

In Tabelle 2 ist eine Übersicht über alle Wirkungsgrade sowie der Systemwirkungsgrad η_{DMD_Sys} der Matrix DMD Technologie zu finden.

Tabelle 2: Übersicht Systemwirkungsgrad Matrix DMD Technologie

Beitragendes Element	Wirkungsgrad η
Laser Primäroptik η_{DMD_Pr}	96 %
Beleuchtungsoptik η_{DMD_Ilu}	64 %
DMD η_{DMD_Mirror}	67,5 %
Sekundäroptik η_{DMD_Se}	96 %
Systemwirkungsgrad η_{DMD_Sys}	39,8 %

2.2 Technologie Benchmark

In folgender Tabelle 3 werden zusätzlich zum Systemwirkungsgrad vier Bereiche der Technologien im Detail untersucht, um einen umfassenden Überblick zu geben.

Tabelle 3: Systemvergleich zwischen Matrix Scanner und Matrix DMD Technologie

Thema	Matrix Scanner Technologie	Matrix DMD Technologie
Funktionsprinzip	Ein- oder zweidimensionale Ablenkung.	Licht wird durch die bildgebende Einheit in Pixel unterteilt.
Scheinwerfertyp	Additiv [9].	Subtraktiv [10].
Homogenität der Lichtverteilung	Wertkontinuierliche Bewegung führt zu einer homogenen Lichtverteilung.	Hohe Auflösung von über 400.000 Pixeln [3].
Lichtstärke	Lichtstärke ist abhängig von der Leistung der Laserlichtquelle, dem „Field of View“ (FOV) und der Aufenthaltszeit.	Die Lichtstärke ist abhängig von der Lichtstärke der Lichtquelle, der Absorptionsrate, der Ausleuchtcharakteristik des DMDs sowie dem FOV.
Variabilität der Lichtverteilung	Verschiebung des Lichtschwerpunkts (LSP)	Anpassung der Lichtverteilung durch Absorptionsrate.
Einblendauflösung	Die maximale Leuchtdichte ist auf 2000cd/mm beschränkt. Gemäß [7] folgt daraus eine Auflösung von 0,702°.	Ein DMD hat eine Auflösung von über 400.000 Pixeln. Abhängig vom FOV ergibt sich eine Auflösung <0,014°.
Kontrast	Abhängig von gauß'schem Strahlprofil und dem Übersprechen des Konverters.	Abhängig von Winkeldifferenz zwischen dem An- und Auszustand.
Verschiebeauflösung	Abhängig von der Genauigkeit der Ansteuerung der Laserdioden.	Die Verschiebeauflösung entspricht bei Verwendung eines idealen optischen Systems der Einblendauflösung.

Seitenverhältnis	Das Seitenverhältnis kann durch den Absscannbereich festgelegt werden.	Festes Seitenverhältnis
Farbfehler	Es gibt Farbfehler aufgrund des Übersprechens des Konverters und der Strahlgeometrie.	Es gibt Farbfehler aufgrund des Übersprechens des Konverters und der Strahlgeometrie.
Größe der Sekundär-Optik	Die Sekundäroptik muss für eine hohe Effizienz möglichst groß sein.	Größe der Sekundäroptik hat nur bedingt Auswirkung auf Effizienz.
Sichtbarkeit des Konverters	Die Sichtbarkeit des gelben Konverters ist gegeben.	Die DMD Spiegel werden im „flat“ Zustand geparkt. Der Konverter ist somit nicht sichtbar.
Optische Effekte	Je nach Scanfrequenz kann ein Flimmern und ein Stroboskopeffekt wahrgenommen werden.	Sofern die FVF überschritten wird, sind keine optischen Effekte wahrnehmbar, da alle Spiegel synchron gekippt werden.
Treiber	Hohe Ströme müssen in kurzen Zeitabständen getrieben werden, um Kontrast und Verschiebeauflösung klein zu halten.	Zur Erhöhung der Lebensdauer müssen die Spiegel synchron zur Lichtquelle mit bis zu 4kHz „geflippt“ werden.
Komplexität	Je nach Technologie, ist die Regelung der Resonanzfrequenz notwendig.	Ansteuerung jedes einzelnen Spiegels notwendig.
Lebensdauer	Alterungseffekte von Laserdiode und Konverter.	Alterungseffekte von Laserdiode und Konverter. Der DMD hat ein temperaturabhängiges Lebensdauerbudget [5].
Temperaturbereich	Abhängig vom Laserdioden betriebsbereich und "thermal quenching" des Konverters.	Abhängig vom Laserdioden Betriebsbereich und "thermal quenching" des Konverters. Spiegel unterliegen bei hohen Temperaturen dem "Hinge Memory" Effekt [5].

Beanspruchung Konverter	Laserleistung wird über den Konverter verteilt.	Laserleistung trifft statisch auf einem Konverterpunkt auf.
Erkennung von Fehlerpixeln	Erkennung des Stillstand des Spiegels möglich.	Keine elektronische Pixelfehlererkennung.
Lichtfunktions-effizienz	Ausblendung durch Abschalten der Lichtquelle.	Ausblendung durch Absorption [2].
Auswirkung auf Kamera-bild	Abhängig von der Verschlusszeit der Kamera.	Keine Auswirkungen.
Augensicherheit	Hohe Lichtstärke mit sehr kurzen Einwirkdauern.	Geringe Lichtstärke mit hoher Einwirkdauer.
Systemkomplexität	Hohe Systemkomplexität, da Ablenkungseinheit zwischen Laser und Konverter.	Mittlere Systemkomplexität, da DMD nicht zwischen Laser und Konverter angeordnet ist

3. Optik Parameter

In diesem Kapitel werden Anforderungen hinsichtlich der Auslegung des optischen Systems gestellt. Basis hierfür ist die Einordnung der Lichtfunktionen in Projektionsbereiche. Messungen haben gezeigt, dass eine Projektionsentfernung von 10 m vor dem Fahrzeug für die Darstellung der neuartigen Lichtfunktionen sinnvoll ist, da Sie für den Fahrer unabhängig von der Kopfposition immer erkennbar sind. Enden sollten die Projektionen bei 25 m damit eine Lichtverteilung dem entsprechenden Fahrzeug zugeordnet werden können. Da, abgesehen von Grafikprojektionen gegen eine Wand, die Projektionen auf die Straße erfolgen, sollte die Schärfeebene dementsprechend platziert werden. Dies kann beispielsweise durch Verkippen des bildgebenden Elements erfolgen. Im Fernlichtbereich und bei Projektionen gegen eine Wand wäre die Lichtverteilung dann jedoch außerhalb der Schärfeebene.

Üblicherweise werden Lichtsysteme symmetrisch in einem Fahrzeug verbaut. Für eine präzise Projektion in das Abblendlicht ist die Topografie der Straße und Fahrzeugdynamik zu berücksichtigen. Auf Basis dieser Daten kann zum einen die perspektivische Verzerrung und zum anderen die Überlappung von linker und rechter Scheinwerferlichtverteilung berechnet werden. Hierfür sind hochgenaue Sensordaten mit kleinsten Latenzzeiten notwendig. Wenn

der linke und rechte Scheinwerfer in unterschiedliche Bereiche, wie Fernlicht oder Abblendlicht leuchtet oder jedem Scheinwerfer eine definierte Lichtfunktion zugeordnet wird ist das Problem einer inkorrekten Überlappung von linker und rechter Lichtverteilung vermeidbar.

4. Berechnungsverfahren

Zur Berechnung und Verzerrungskompensation der neuartigen Lichtfunktionen sind zahlreiche Sensorsignale zu berücksichtigen. Im folgenden Kapitel werden diese zunächst aufgelistet und erklärt. Die Sensordaten bilden die Eingangsgröße für die Durchführung eines Berechnungszyklus einer Lichtverteilung. Ein Berechnungszyklus besteht aus fünf einzelnen Berechnungsblöcken, wie auch aus Abbildung 1 ersichtlich wird:

Im ersten Block wird ermittelt ob eine Lichtfunktion aktiviert werden soll. Diese Aktivierung kann manuell oder automatisch erfolgen. Im zweiten Block wird für die jeweilige Funktion die entsprechende Perspektive bestimmt. Im dritten Block wird auf Basis der Topografie und der Objektdaten die Lichtverteilung berechnet. Im vierten Block erfolgt eine Überprüfung hinsichtlich der Sichtbarkeit einer Funktion. Im letzten Block wird die Lichtverteilung ausgegeben. Anschließend beginnt der Berechnungszyklus von neuem.

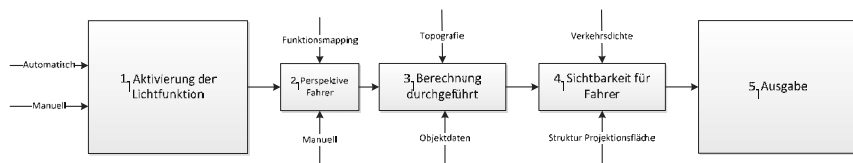


Bild 1: Verfahren zur Berechnung der Lichtverteilung neuartiger Lichtfunktionen

Im folgenden Abschnitt wird der eigentliche Berechnungsblock genauer erklärt. Zur Berechnung wird auf das Lochkameramodell, welches in Abbildung 2 zu sehen ist, verwendet.

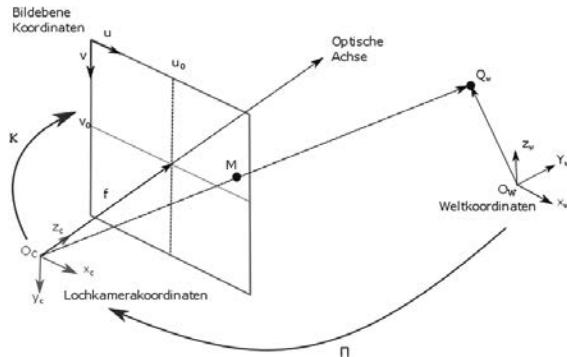


Bild 2: Lochkameramodell nach [11]

Durch das Lochkameramodell kann die dreidimensionale Lichtverteilung auf der Straße in eine zweidimensionale Lichtverteilung auf der Bildebene mit den Bildebenenkoordinaten u und v berechnet werden, sofern der Scheinwerfer als Punktlichtquelle angenommen werden kann. Für die Berechnung der Lichtverteilung auf der Bildebene werden mehrere Gleichungen benötigt die im Folgenden vorgestellt werden und der Quelle von Mariottini [11] entnommen sind. Es gibt zwei Lochkameraparameter. Der intrinsischen Lochkameraparameter K ist wie folgt definiert:

$$K = \begin{bmatrix} k_u f & \gamma & u_0 \\ 0 & k_v f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Gleichung 1}$$

Hierbei gibt f den Abstand von O_c zur Bildebene an und zeigt auf den Referenzpunkt u_0, v_0 auf der Bildebene. Der Parameter γ ist der sogenannte „skew factor“ der auf 0 gesetzt werden kann sofern die Pixel auf der Bildebene quadratisch sind. Die Koordinaten u_0 und v_0 beschreiben den Punkt bei dem die optische Achse ausgehend von O_c die Bildebene trifft. Der extrinsische Kamera Parameter Π setzt O_c in Bezug zu den Weltkoordinaten:

$$\Pi = [R|t] \quad \text{Gleichung 2}$$

Die Koordinaten der Punkte Q_w müssen für die Transformation in homogenisierte Koordinaten \tilde{Q}_w , gemäß Gleichung 3, umgerechnet werden. Die eigentliche Transformation erfolgt gemäß Gleichung 4.

$$\tilde{Q}_w = [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T \quad \text{Gleichung 3}$$

$$\tilde{M} = K\Pi\tilde{Q}_w \quad \text{Gleichung 4}$$

Das Matrix Produkt $\Pi\tilde{Q}_w$ transformiert die homogenisierten Weltkoordinaten in Lochkamerakoordinaten. Anschließend werden die Lochkamerakordinaten durch Multiplikation mit der Matrix K in die Bildebene transformiert:

$$\tilde{M} = [U \ V \ 1]^T \quad \text{Gleichung 5}$$

Die daraus resultierenden Bildebenekoordinaten u_i und v_i können mit Gleichung 6 in Winkel umgerechnet werden:

$$\alpha_i = \tan^{-1}\left(\frac{u}{f}\right); \beta_i = \tan^{-1}\left(\frac{v}{f}\right) \quad \text{Gleichung 6}$$

Die Winkel können für eine beliebige Scheinwerfer Technologie in Pixelpositionen umgerechnet, sowie in einem bestimmten Bild oder Videoformat gespeichert werden.

Basierend auf dem oben vorgestellten Berechnungsmodell sind nun beliebige Lichtverteilungen berechenbar. Hierbei werden drei Fälle unterschieden:

Im ersten Fall erfolgt die Berechnung einer Lichtverteilung ohne Berücksichtigung von Objektdaten und einer perspektivischen Korrektur. Im zweiten Fall erfolgt die Berechnung einer Lichtverteilung anhand von Objektdaten die per Kamera detektiert werden. Im dritten Fall erfolgt die Berechnung einer perspektivisch korrigierten Lichtverteilung. Da eine komplette Darstellung den Umfang dieser Arbeit überschreitet wird darauf verzichtet alle drei Fälle im Detail zu beschreiben.

5. Fazit und Ausblick

Aus dem im Rahmen dieser Ausarbeitung durchgeführten Systemvergleich wird ersichtlich, dass jede Technologie unterschiedliche Vor- und Nachteile hat. Es ist offensichtlich, dass die Eigenschaften einer neuartigen Lichtfunktion, wie beispielsweise Auflösung, Kontrast und Effizienz von der jeweiligen Technologie abhängig ist. Jeder Entwickler muss also selbst entscheiden welche Technologie für seine Lichtfunktion am besten geeignet ist.

Es wurde gezeigt, dass bei neuartigen Lichtfunktionen die perspektivische Verzerrung zu berücksichtigen ist. Für eine korrekte Darstellung gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Die Lichtverteilung der Funktion ist so gewählt, dass Sie unabhängig von Blickwinkel die Anforderungen an die Bilddarstellung erfüllt. Denkbar sind hier beispielsweise einfache Formen wie Striche.

2. Werden komplexere Formen verwendet, muss zur Berechnung der Lichtverteilung die Topografie der Projektionsfläche und die Augenposition des Beobachters berücksichtigt werden. Mit diesen Informationen ist es möglich über das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren eine perspektivisch korrigierte Lichtverteilung darzustellen.

Neuartige Lichtfunktionen haben ein hohes Potential den Fahrer in seiner Spurführung und Wahrnehmungsaufgabe zu unterstützen. Gegenüber anderen Fahrerassistenzsystemen, wie Head-Up-Displays, bieten die Lichtfunktionen auch die Möglichkeit, die Sichtbarkeit von Objekten tatsächlich zu verbessern. Zudem können Lichtassistenz-Funktionen beim zukünftigen pilotierten Fahren dazu beitragen mit der Umwelt zu kommunizieren und zu interagieren.

Auf dem Weg zum hochauflösenden Scheinwerfer müssen jetzt zeitnah die Technologien in die Serie überführt werden. Derzeit forschen die Automobilhersteller und Zulieferer an der LCD [12], der DMD [13] und der Laserscanner Technologie [14]. Sobald eine entsprechende Technologie vorhanden ist, können dann die neuen Lichtfunktionen experimentell untersucht werden.

6. Literatur

- [1] Huhn, W.; Gut, C.; Omerbegovic, S.; Haug, T.; Funk, C. (2015): The advanced ADB system of the new Audi Q7. In: Fudan University (Hg.): Proceedings. The 3rd International Forum on Automotive Lighting IFAL. Kunshan.
- [2] Gut, C.; Rotscholl, I.; Neumann, C. (2014): Theoretische Leistungs- und Effizienzanalyse laserbasierter Pixellichtsysteme. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Tagungsband. Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. Karlsruhe, 06.05.2014. Düsseldorf: VDI Verlag.
- [3] Texas Instruments Incorporated (2015): Datenblatt: DLP3000 DLP 0.3 WVGA Series 220 DMD. Dallas, zuletzt geprüft am 21.03.2016.
- [4] Osram Opto Semiconductors: Datenblatt: Blaue Laser Diode 1.6 W in TO56 Bauform.
- [5] Sontheimer, A. B. (2002): Digital Micromirror Device (DMD) hinge memory lifetime reliability modeling. In: 2002 IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. 40th Annual. Dallas, TX, USA, 7-11 April 2002, S. 118–121.
- [6] Deppisch, U. (2015): Benchmark von flächenmodulierten und strahlgeführten Scheinwerfersystemen. Masterarbeit. Hochschule RheinMain, Wiesbaden Rüsselsheim.
- [7] Gut, C.; Petersen, A.; Jahn, P.; Seitz, M.; Neumann, C.; Berlitz, S. (2015): Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer. In: VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Tagungsband. ELIV - Kongress zur Fahrzeugelektronik. Baden-Baden.
- [8] Reinprecht, M.; Winterer, N.; Hartmann, P. (2015): Solution Paths Towards High-Resolution ADB-Systems. In: T. Q. Khanh (Hg.): ISAL 2015. 11th International Symposium on Automotive Lighting, Bd. 11. Technische Universität Darmstadt, S. 177–186.
- [9] Götz, M.; Eichhorn, K. (2005): Optical Technologies for Future Headlamps. In: H. F. Schlaak (Hg.): 6th International Symposium on Automotive Lighting. Technische Universität Darmstadt. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, S. 307–316.
- [10] Kauschke, R. (2006): Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern. Dissertation. Universität Paderborn, Paderborn.
- [11] Mariottini, G.L.; Prattichizzo, D.: The Epipolar Geometry Toolbox. Siena.
- [12] Bundesministerium für Bildung und Forschung (01.04.2014): Volladaptive Lichtverteilung für eine intelligente, effiziente und sichere Fahrzeugbeleuchtung. Hesse, H.
- [13] Bhakta, V.; Ballard, B. (2015): High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP® technology. In: T. Q. Khanh (Hg.): ISAL 2015. 11th International Symposium on Automotive Lighting. Technische Universität Darmstadt, S. 483–494.
- [14] Bundesministerium für Bildung und Forschung (01.08.2014): Intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer. Berlitz, S.

Ein effizienter hochauflösender ADB-Scheinwerfer auf Basis von mikrointegrierten LED-Arrays

An efficient and high-resolution ADB headlamp based on micro-integrated LED arrays

Dr. I. Möllers, Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt;

Dr. J. Moisel, Daimler AG, Ulm;

Dr. R. Fiedlerling, OSRAM GmbH, München;

Hr. S. Grötsch, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg

Kurzfassung

Mit der Entwicklung und Verfügbarkeit neuartiger innovativer LED-Pixellichtquellen werden in diesem Artikel Prototypenscheinwerfern vorgestellt, die Hauptlichtverteilungen mit hochauflösender ADB-Funktionalität (ADB, engl. Addaptive Driving Beam) ohne mechanische Aktoren erzeugen. Ausgehend vom Stand der Technik und grundsätzlichen Anforderungen an ADB-Scheinwerfer werden der Aufbau der Prototypenscheinwerfer sowie die Funktionsweise der einzelnen Systemkomponenten Lichtquelle, Optiksystem und Kühlsystem des hochauflösenden Reichweitensmoduls beschrieben. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass mit diesen neuen Lichtsystemen sehr effiziente und hochflexible Lichtlösungen für den Einsatz in Serienscheinwerfern in wenigen Jahren möglich werden können.

Abstract

With the development and availability of new and innovative LED pixelated light sources this article presents headlamp prototypes being able of providing high-resolution ADB (Addaptive Driving Beam) functionality for main light functions without a necessity of any mechanical actuators. Based on the state of the art and on principal requirement for ADB headlamps the design of the prototype headlamps as well as the functionality of each single sub-system light source, optical system and cooling system of the high-resolution high beam module is being described. The achieved results show that very efficient and highly flexible optical solutions for use in series headlamps should be possible with these new light systems in the upcoming years.

1. Einleitung

Adaptive Frontscheinwerfersysteme stellen heute einen starken Trend in der automobilen Beleuchtungstechnik dar. Aktuelle Systeme im Markt ermöglichen mit bis zu 100 einzelnen

ansteuerbaren, diskret aufgebauten LEDs die Funktion eines blendfreien Fernlichts mit einer Winkelauflösung im Bereich von etwa 1° [1].

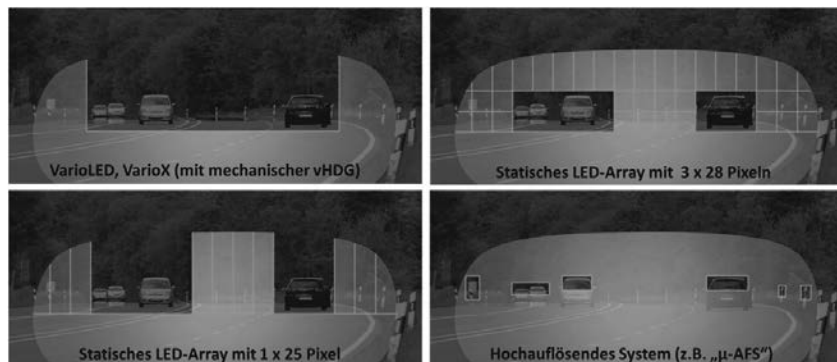


Bild 1: Lichtverteilungen unterschiedlicher AFS/ADB-Systeme

Bild 1 zeigt für vier unterschiedliche Lichtsysteme mit unterschiedlicher Auflösung und jeweils der gleichen, typischen Verkehrssituation das mögliche Lichtbild mit entsprechend erforderlichen bzw. möglichen Entblendungsbereichen. Mit höherer Auflösung können zum einen diese Bereiche reduziert werden, so dass für den Fahrer ein Sicherheitsgewinn durch einen insgesamt größeren beleuchteten Bereich verbleibt. Zum anderen sind für weitere sicherheitsrelevante und komfortbezogene Funktionen wie z.B. Spurmarkierung, eine dynamische aber mechanikfreie Leuchtweitenregelung oder auch individuell konfigurierbare Lichtverteilungen deutlich höhere Auflösungen zum aktuellen Stand mit 1° (s. Bild 1 „Statisches LED-Array mit 3 x 28 Pixeln“) erforderlich. Diese Anforderungen können nur über hochintegrierte und sehr fein auflösende Lichtquellen sowie neue lichttechnische und thermische Konzepte im Scheinwerfer erzielt werden.

Im BMBF-Verbundprojekt „µ-AFS“ wurde von den Partnern Daimler, den Osram-Bereichen Specialty Lighting und Osram Opto Semiconductors, Infineon, den Fraunhofer Instituten IZM und IAF sowie Hella ein hochauflösender ADB-Scheinwerfer mit 3072 einzeln ansteuerbaren LED-Pixeln im Reichweitenmodul erfolgreich entwickelt.

Dabei wurde ein neuer innovativer Weg beschritten, bei dem die LED-Pixel nicht mehr als diskrete LED-Chips, sondern mit mindestens 256 Pixeln in einem Optohalbleiterelement realisiert sind [2][3]. Eine feinst strukturierte, direkte Verbindung zum ansteuernden Siliziumchip macht eine sinnvolle pixelweise Ansteuerung in dieser Form erst möglich. So können einerseits den 1024 LED-Pixeln auf einem einzigen Halbleiterchip mithilfe der

integrierten Schaltungen die Lichtmuster über wenige Datenleitungen individuell eingeschrieben werden. Andererseits verspricht die deutlich reduzierte Anzahl der Verbindungen zwischen LEDs und Systemschaltungsträger für die Industrialisierung eine hohe Zuverlässigkeit. Die realisierbare Pixelanzahl pro Scheinwerfer ermöglicht einen großen Ausleuchtbereich mit Reserve für das mechanikfreie Kurvenlicht. Unter den aktuell in der Forschung befindlichen Konzepten zu Scheinwerfern mit hoher ADB/AFS-Auflösung (AFS, engl. Adpative Front Lighting System) besetzt das Konzept eine attraktive Position: Die realisierte Auflösung erlaubt einerseits die volle Umsetzung neuer hochauflösender Lichtfunktionen und andererseits die leichte Integration in Fahrzeugelektronikkonzepte mit noch handhabbaren Datenmengen. Neben den Lichtquellenleuchtdichten, die nahe am Status Quo aktueller LEDs liegen, besticht die Lösung auch durch herausragende Effizienz, die durch passive, lichtmodulierende Ansätze nicht erreicht werden können. Das gilt sogar dann noch, wenn die Siliziumverlustleistung direkt unter den lichtemittierenden Schichten mit einbezogen wird. Die Verlustleistung zur Stromregelung der LEDs fällt ansonsten in getrennten Steuergeräten an.

Das folgende Kap. 2 beschreibt zunächst die Lichtquelle und die Ansteuerung bevor in Kap. 3 der Aufbau des Scheinwerfers mit den lichttechnischen Systemen sowie dessen Thermomanagement insbesondere der hochauflösenden Lichtquelle dargestellt wird. Das Kap. 4 ordnet ausgehend vom aktuellen technischen Stand die Entwicklung und die Fahrzeugintegration dieser neuen Lichttechnologie ein. Kap. 5 fasst die wesentlichen Erkenntnisse kurz zusammen.

2. μ AFS-Lichtquelle

Die μ AFS-Komponente stellt eine neuartige Lichtquelle dar, bei der einzeln ansteuerbare Pixel mit einer Größe von $115\mu\text{m} \times 115\mu\text{m}$ und einem Pitch von $125\mu\text{m}$ in beide Richtungen realisiert wurden. Jeder Quadratmillimeter Fläche der LED-Chips enthält 64 LED-Pixel – bei 16mm^2 Gesamtchipfläche stellt die Komponente insgesamt 1024 Pixel zur Verfügung. Bild 2(a) zeigt den Querschnitt einer konventionellen Dünnschicht-LED. In Bild 2(b) wird der schematische Aufbau eines pixelierten LED-Arrays gezeigt, welches mittels Flipchip-Verbindungstechnik auf Waferlevel mit dem intelligenten Siliziumträger kontaktiert wurde [4]. Um eine individuelle Ansteuerung jedes einzelnen Pixels der LED-Arrays zu erreichen, wurde ein spezifischer Treiberchip mit konfigurierbaren High-Side-Stromquellen entwickelt. Das Ein- und Ausschalten der Pixel erfolgt in Echtzeit direkt über den Datenstrom. Damit ist eine unabhängige, individuelle PWM-Ansteuerung jedes Pixels möglich.

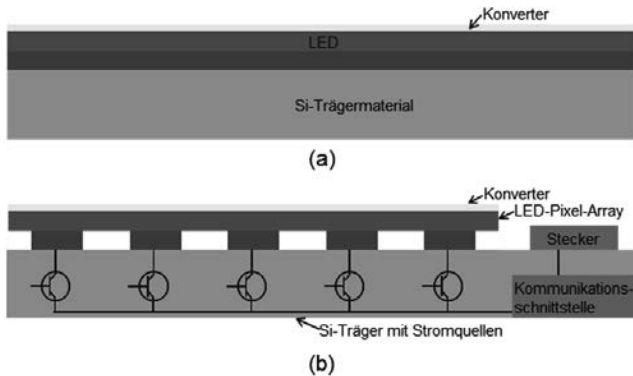


Bild 2: Schematische Schnittzeichnung (a) Konventionelle Dünnfilm-LED, (b) Pixelierte LED Matrix mit Integrierten Schaltungen im Silizium-Trägerwafer und Metallstrukturen zur Verbindung von LED- und Silizium-Bereichen

Bild 3 zeigt einen Demonstrator (links) und die Projektion eines Schriftzuges mit einer 1024 Pixel μ -AFS-Komponente (rechts).

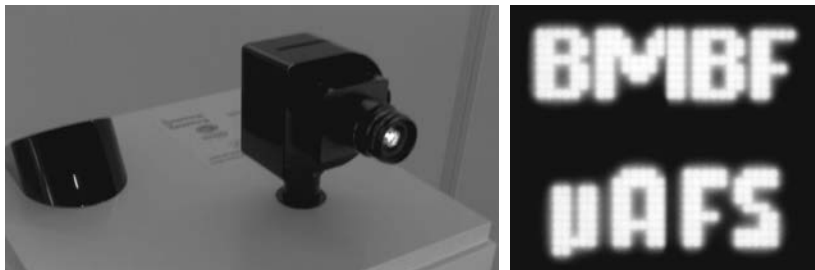


Bild 3: Exponat (links) und Projektion eines Schriftzuges mit einer μ -AFS-Komponente (rechts)

Um die μ -AFS-Komponente in einem System verwenden zu können, wird diese über ein Interface auf einer Adapterplatte befestigt (Bild 4 links) und mit der FR4 Platine kontaktiert, welche mit den zum Betrieb der Komponente nötigen Peripheriebauteilen bestückt ist.

Dieses Lichtquellenmodul stellt die thermische, mechanische, elektrische und optische Schnittstelle bereit, die eine komfortable Anbindung an die Fahrzeugarchitektur erlaubt. Je nach kundenspezifischen Wünschen und Anforderungen ist es mit geringem Aufwand möglich, das modulare Aufbaukonzept anzupassen und die Anzahl der μ AFS-Komponente je Lichtquellenmodul zu skalieren. D.h. für Fahrzeuge im Mid-Class Segment kann beispiels-

weise eine μ AFS-Komponente pro Scheinwerfer eingesetzt werden, in Premiumfahrzeugen können zwei oder mehrere dieser Komponenten Verwendung finden. Bild 4 zeigt auf der rechten Seite eine Leuchtdichteaufnahme bei $25^\circ\text{C } T_s$ (Adapterplattentemperatur). Jedes der 256 eingeschalteten Segmente wurde mit 11mA bestromt, dabei betrug der erreichte Lichtstrom ca. 3Lumen (lm) pro Pixel.

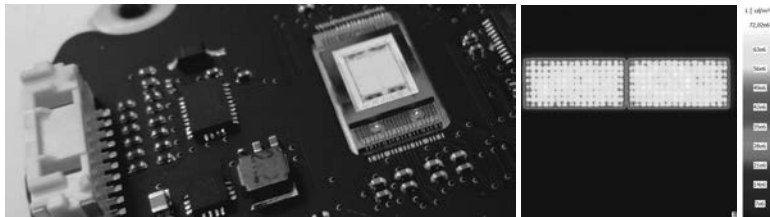


Bild 4: Lichtquellenmodul bestehend aus FR4-Board mit Interface und μ AFS-Chip (links), Leuchtdichteaufnahme mit 256 von 1024 eingeschalteten Pixel (rechts)

Zur Ansteuerung von höchstintegrierten Pixel-Systemen auf LED-Basis (>1000 Pixel) kommen hochentwickelte elektronische Lösungen zum Einsatz, Bild 5 zeigt eine derartige Systemarchitektur.

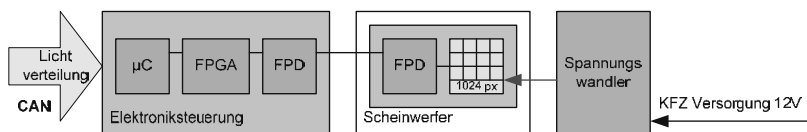


Bild 5: Elektronikkomponenten zur Ansteuerung und Signalverarbeitung für 1024 LED-Pixel

Der Spannungswandler versorgt einen Kanal (1024 Pixel) mit einem Maximalstrom von 15A bei einer Spannung von 4,5V, der Wandler wird mit der Bordnetzspannung von 12V gespeist.

Zur Adressierung von 1024 Pixeln werden 4 serielle Datenkanäle parallel mit einer Frequenz von jeweils 50MHz von der Elektronik gesteuert. Jeder Kanal überträgt einen Datenstrom zur Einstellung der Lichtintensität der Pixel mittels Puls-Weiten-Modulation (PWM) für jede einzelne Pixel. Es kann eine Bildwiederholrate von 762 Bildern pro Sekunde erreicht werden. Die Hauptbestandteile des Elektroniksystems sind ein Mikrocontroller und ein Field Programmable Gate Array (FPGA). Der Mikrocontroller bildet die Schnittstelle zwischen der Datenquelle zur Bereitstellung der Lichtverteilung und der Datenverarbeitungseinheit im

FPGA. Das FPGA stellt eine hochleistungsfähige dedizierte Hardware zur parallelen Datenverarbeitung bereit. Eine beispielhafte Funktion, die im FPGA umgesetzt wird, ist die Gamma-Korrektur. Dabei handelt es sich um einen Algorithmus, der die nichtlineare Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges berücksichtigt.

Die Spannungsversorgung und die elektronische Steuerungseinheit sind räumlich abgesetzt vom Pixel-System im Scheinwerfer angeordnet. Eine Vielzahl von parallelen Signalen verläuft zwischen Steuerungselektronik und Scheinwerfer. Um die Anzahl der Signalkabel zu reduzieren, wird eine Serializer/Deserializer-Lösung verwendet. Hierzu kommt der Industriestandard FPD-Link III für serielle Hochgeschwindigkeitsübertragung von Videodaten zur Anwendung. Vom Scheinwerfer zur Steuerungselektronik ist ein Diagnosepfad implementiert, der zur Temperaturüberwachung und zum Auslesen von LED-Pixel-Parametern dient.

3. μ AFS-Scheinwerfer

Mit dem primären Ziel die Funktionalität der hochaufgelösten pixelierten Lichtquellen insbesondere im automobilen Umfeld demonstrieren und testen zu können, wurden Scheinwerfer auf Basis der Serienscheinwerfer des Mercedes-Benz BR212M mit den zuvor beschriebenen Lichtquellen entwickelt und aufgebaut (s. Bild 6 links).



Bild 6: Foto des linken Scheinwerferprototypen (links), Lichttechnisches Funktionsprinzip Lichtquelle-Optik-Lichtverteilung am Beispiel des linken Scheinwerfers (rechts)

Diese haben die Aufgabe, (neben den Signalfunktionen wie Blinklicht, Tagfahrlicht/Positionslicht und Abbiegelicht) die Hauptlichtverteilung bestehend aus einem statischen Grundlicht des Serienscheinwerfers und dem im Folgenden näher beschriebenen hochaufgelösten μ AFS-Reichweitemodul zu erzeugen. Mit diesem wird dann ein vollständig mechanikfreier Scheinwerfer mit frei programmierbarer Reichweitelichtverteilung möglich. Es können dann sowohl bereits aus mechanischen Schwenksystemen bekannte Funktionen, wie dynamisches Kurvenlicht und vertikale Hell-Dunkel-Grenze (vHDG), sowie auch neue

ADB-Funktionen, wie z.B. mehrkanalige, der Form und Größe verschiedener Verkehrsteilnehmer angepasste Entblendungsbereiche oder Schildentblendung, dann ausschließlich elektronisch erzeugt werden.

Um diese Lichtverteilungen erzeugen und sinnvoll einsetzen zu können, müssen die Scheinwerfer und Module verschiedene lichttechnische Anforderungen erfüllen. Die in diesem Zusammenhang wesentlichen Zielwerte für die Entwicklung sind:

- a. eine hohe maximale Beleuchtungsstärke,
- b. ein großer Ausleuchtbereich der Gesamtlichtverteilung mit hoher Pixelauflösung,
- c. eine hohe horizontale und vertikale Auflösung sowie
- d. eine hohe Effizienz des Gesamtsystems.

Das neu entwickelte Reichweitelichtsystem besteht aus zwei Lichtmodulen (LM, s. Bild 6 rechts) mit jeweils einem Optiksistem und zwei Lichtquellen mit insgesamt 3 μ AFS-Komponenten und entsprechend 3072 Pixeln. Die Lichtquelle des Lichtmoduls „B“ enthält eine μ AFS-Komponente mit 1024 Pixeln (s. Bild 6 rechts unten „B-2“), das Lichtmodul „A“ enthält zwei μ AFS-Komponenten (A-1 und A-3). Fahrzeuginnenseitig ist das Lichtmodul „A“ und fahrzeugaußenseitig das Modul „B“ positioniert. Die Gesamtlichtverteilung für den linken Scheinwerfer setzt sich dabei aus den Lichtverteilungen der einzelnen Lichtquellen und Lichtquellenmodule entsprechend der Prinzipdarstellung in Bild 6 rechts zusammen, wonach LM „A“ beide Außenbereiche und LM „B“ den zentralen Bereich der jeweiligen Lichtverteilung eines Scheinwerfers erzeugen.

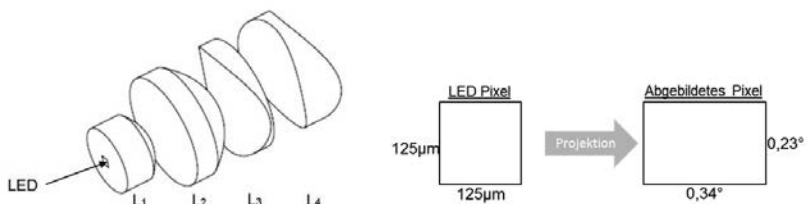


Bild 7: Linsengeometrie und Abfolge eines Optiksystems (links), Prinzip der Pixelabbildung durch das Linsensystem in den Verkehrsraum (rechts)

Die beiden Optiksysteeme bestehen jeweils aus 4 unterschiedlichen Linsen, die für beide Optiksysteeme baugleich sind. Bild 7 links zeigt schematisch die Abfolge von LED und Anordnung und Linsengeometrie der Linsen L1 bis L4 eines jeden Optiksysteems. Zwei plankonvexe Sammellinsen L1 und L2 bilden die Lichtquelle effizient im gleichen Seitenver-

hältnis quadratisch ab. Zwei Zylinderlinsen L3 und L4 als Auskoppellinse des Systems ergeben zusammen einen sogenannten Anamorphoten, der die symmetrische Abbildung der quadratischen Pixel der Lichtquelle in der horizontalen um etwa den Faktor 1,5 aufweitet. Damit werden die Pixel rechteckförmig in den Verkehrsraum mit einem pixelbezogenen Winkel von horizontal $0,34^\circ$ und vertikal von $0,23^\circ$ abgebildet (s. Bild 7 rechts).

In Bild 8 werden die mit diesen Systemen möglichen Lichtverteilungen auf Modulebene aus Simulationen und lichttechnischen Messungen dargestellt.

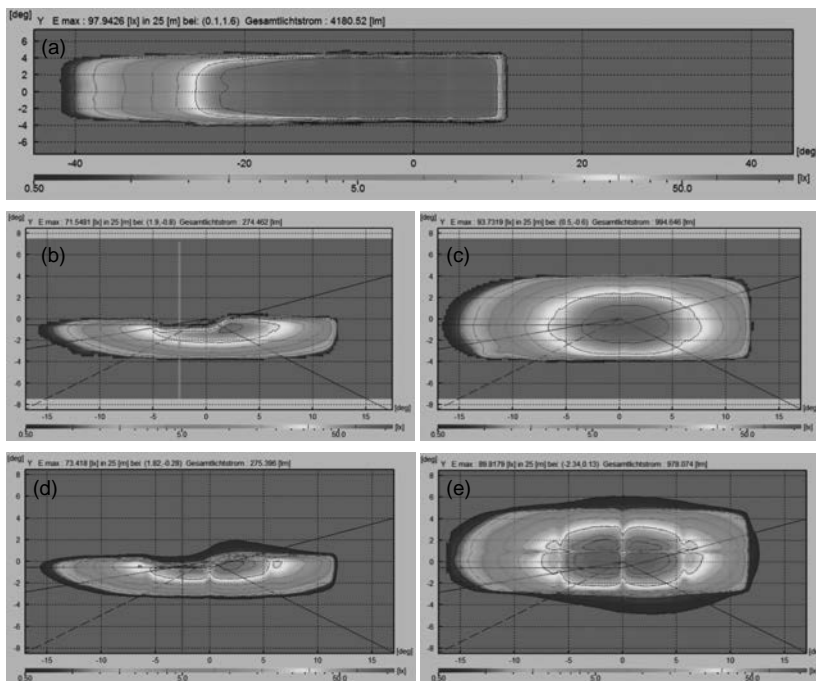


Bild 8: (a) Simulierte Gesamtlichtverteilung „Alle Pixel zu 100% (3lm/Pixel) eingeschaltet“, (b) simulierte Abblendlichtverteilung (ABBLV), (c) simulierte Fernlichtverteilung (FLV), (d) gemessene ABBLV, (e) gemessene FLV

Unter Annahme, dass alle Pixel voll mit 3lm/Pixel betrieben werden könnten, wäre mit diesem Optiksistem eine Beleuchtungsstärke von nahezu 100lx mit einer Gesamtbreite der Lichtverteilung von insgesamt -40° bis $+11^\circ$ bezogen auf den linken Scheinwerfer simulativ erreichbar (s. Bild 8(a)). Im Bereich zwischen ca. -20° und -40° werden die Pixel durch die „Off-Axis“-Anordnung der Lichtquelle nach außen hin zunehmend verzerrt abgebildet. Der

Bereich nicht verzerrter Pixel mit dem Abbildungsverhältnis entsprechend Bild 7 rechts liegt im Winkelbereich zwischen -11° und $+11^\circ$. Simulativ ist damit eine Systemeffizienz des Optiksystems von ca. 45% zu erwarten. In Bild 8(b) und Bild 8(c) sind die Simulationsergebnisse einer über Pixeldimmung sinnvollen Abblendlicht- und Fernlichtverteilung dargestellt. Im Vergleich dazu zeigen Bild 8(d) und Bild 8(e) die entsprechend ermittelten Messwerte eines lichttechnischen Systems mit Lichtquellen, die mit ca. 3lm/Pixel im Zentralbereich und entsprechend der auch in den Simulationen angenommenen Pixeldimmung betrieben wurden. Es wird deutlich, dass bei einer realen Lichtverteilung, wie sie in der Simulation zu Grunde gelegt wurde, die simulierten Werte hinsichtlich Gesamtlichtstrom und Beleuchtungsstärke mit den aufgebauten Reichweitelichtmodulen im Wesentlichen erreicht werden. Dabei liegt die gemessene Systemeffizienz des 4-linsigen Optiksystems mit ca. 43% sehr nah an den simulierten Werten. Es konnte zudem gezeigt werden, dass dieses System aus μ AFS-Lichtquelle und Optiksystem zulassungsfähige Lichtverteilungen erzeugt.

Zusammen mit dem Grundlichtmodul der Scheinwerfer können mit dem μ AFS-Reichweitemodul voll nutzbare Lichtverteilungen mit hochauflösendem, frei programmierbaren Reichweiteanteil eingeprägt werden. Die in Bild 9 dargestellte Sammlung von Lichtverteilungen (bei (a) – (h) im vorderen Bereich jeweils mit zwei Lichtkegeln der Grundlichtverteilung) deutet diese Möglichkeiten an: Bild 9 (a) zeigt eine simulierte Lichtverteilung, (b)-(h) zeigen Fotos aus Fahrersicht im Lichtkanal verschiedener Lichtverteilungen zweier Scheinwerfer und (i)-(l) die Lichtverteilungen eines einzelnen linken Reichweitemoduls ohne Grundlicht. Ein Vergleich der simulierten (a) und der mit dem System erzeugten Lichtverteilung im Lichtkanal als Foto (b) verdeutlicht die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und real mit den Prototypenscheinwerfern erzeugten Lichtverteilung; über eine entsprechende elektronische Pixeldimmung im unteren Bereich des Reichweitemoduls könnte die Anbindung des Reichweitemoduls zur Grundlichtverteilung noch deutlich verbessert werden. In (d) ist im Vergleich zu (c) eine Pixelzeile zusätzlich ausgeschaltet, so dass die Hell-Dunkel-Grenze (HDG) von $v-0,57^\circ$ auf $v-0,8^\circ$ absinkt. In (e) ist in gleicher Weise eine weitere Pixelzeile ausgeschaltet, so dass die HDG auf insgesamt $-1,03^\circ$ abfällt. Dieses zeigt die Funktion der dynamischen Leuchtweitenregelung. Ergänzend ist ein Fernlicht (Bild 9 (f)) ein um 7° (Bild 9 (g)) und 10° (Bild 9 (h)) nach links geschwenkte Fernlichtverteilung dargestellt, die damit ein dynamisches Kurvenlicht erzeugen.

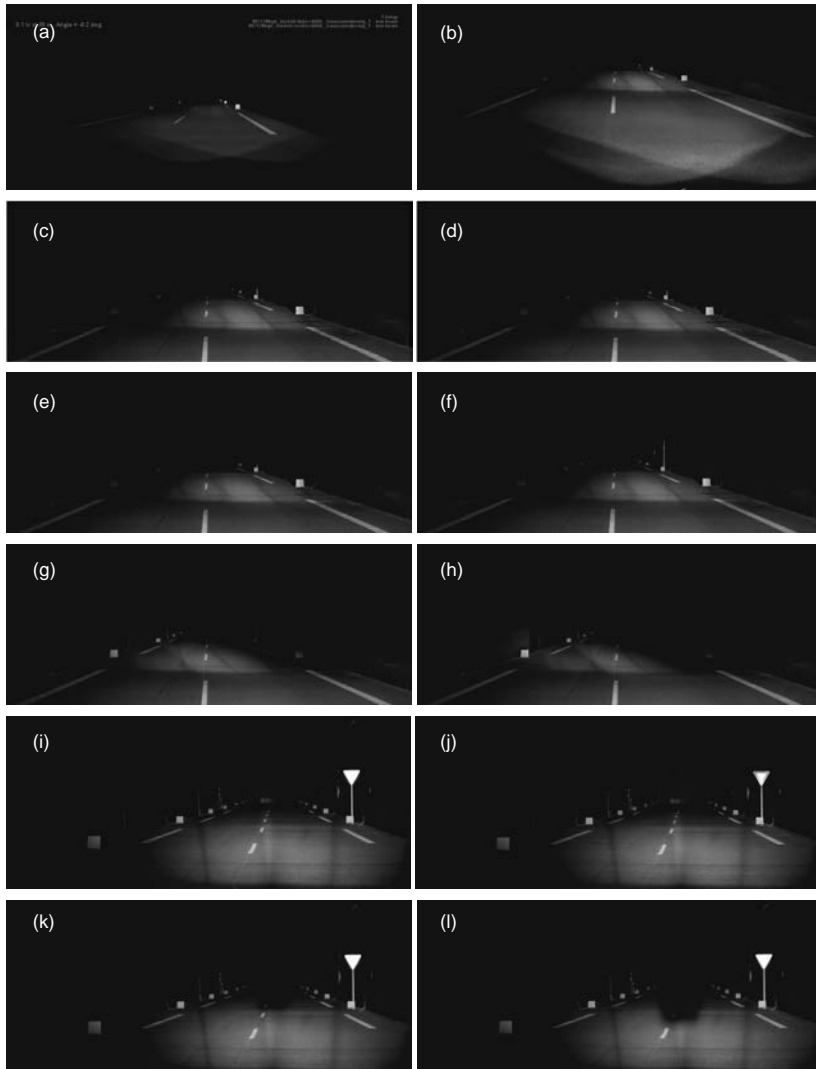


Bild 9: (a) Simulation Grundlicht + μ AFS-Reichweite aus Fahrersicht; nachfolgend Fotos: (b) FLV aus zwei Scheinwerfern, (c) ABBLV v-0,57°, (d) wie zuvor nur v-0,8° (HDG -1 Pixelzeile nach unten), (e) ABBLV v-1.03° (-2 Pixelzeilen), (f) FLV, (g) FLV h-7° (Schwerpunkt 20 Pixelspalten nach links), (h) FLV h-10° (30 Pixelspalten nach links); folgend nur linkes Reichweitemodul: (i) FLV, (j) FLV mit Schildentblendung, (k) FLV mit Entblendungsbereich von 16 Pixelzeilen/8 -spalten, (l) wie zuvor, jedoch mit 18/10

Um die Potentiale der Lichtquellen bestmöglich nutzen zu können, müssen diese im Scheinwerfer effizient gekühlt werden, so dass die Temperatur der Lichtquellen in allen Betriebszuständen möglichst gering ist. Dazu ist ein neuartiges Kühlsystem mit zentraler Wärmesenke entwickelt worden, mit dem unabhängig davon, wo die Lichtquellen eingeschaltet werden und die thermische Verlustleistung erzeugt wird (z.B. Fernlicht geradeaus oder Fernlicht geschwenkt), annähernd gleiche Temperaturen für alle Lichtquellen erreicht werden. Die Wärmesenke basiert auf einem z.B. aus der PC-Technik bekannten Prinzip von Heatpipes, die mit Kühlblechen verbunden sind [5]. Die Heatpipes transportieren die thermische Energie von den Lichtquellen zu den Kühlblechen und begünstigen so ein thermisches Gleichgewicht im System. Der Kühlkörper als Wärmesenke wird aktiv über einen Radiallüfter und einen Luftführungs kanal mit Luft im Scheinwerfer umströmt und gibt die Energie an die Luft ab. Die Entwärmung des Scheinwerferinnenraums erfolgt über die gesamte Kunststoffgehäuseoberfläche des Scheinwerfers.

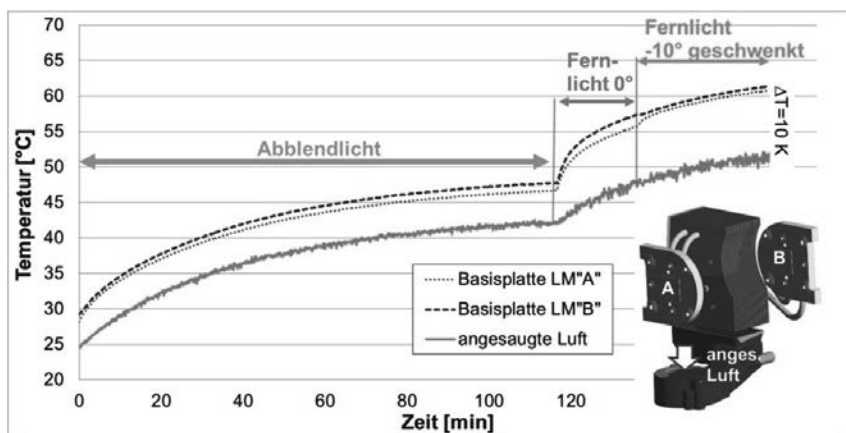


Bild 10: Diagramm mit Temperaturverlauf der Basisplatten beider Lichtmodule und vom Lüfter angesaugter Luft im Scheinwerfer bei einer Scheinwerferumgebungstemperatur von 25°C mit Darstellung des Kühlsystems mit Lüfter und Luftführung (links)

Das Diagramm in Bild 10 zeigt den gemessenen zeitlichen Temperaturverlauf beider Basisplatten des Kühlsystems sowie der angesaugten Luft. Bis ca. 110min. wurde der Scheinwerfer mit Abblendlicht (s. Bild 8 (d)) incl. eingeschaltetem Grundlicht betrieben. Die thermische Verlustleistung des Grundlichtmoduls liegt für alle Lichtverteilungen bei ca. 12W; die thermische Verlustleistung beider μ AFS-Lichtmodule beläuft sich für eine Abblendlichtverteilung auf ca. 11W. Bei Betrieb mit Fernlichtverteilung (sowohl geradeaus als auch

geschwenkt um -10°) beträgt die thermische Verlustleistung ca. 25,5W. Im Fernlicht-Geradeausfall liegt der größere Teil der Verlustleistung auf Modul B, bei geschwenktem Fernlicht ist die Verteilung der thermischen Verlustleistung auf beiden Lichtmodulen nahezu gleich. Die verschiedene Verteilung führt zu einer geringen maximalen Temperaturdifferenz von 2K aufgrund der unterschiedlichen Verlustleistungen auf den beiden Lichtmodulen und bestätigt die sinnvolle Wirkungsweise der zentralen Wärmesenke. Zwischen angesaugter Luft und Basisplattentemperatur ergibt sich eine maximale Temperaturdifferenz von 10K. Bezieht man diese Differenz auf die gesamte Verlustleistung von 25,5W, dann errechnet sich der thermische Widerstand des Kühlsystems auf $< 0,4 \text{ K/W}$ für die zentrale Wärmesenke des Reichweitensmoduls. Dieser Wert ist im Vergleich sehr gering und verdeutlicht die besonders hohe Kühleffizienz. Für den Scheinwerfer verbleibt bei 25°C Umgebungstemperatur eine Lichtquellenbasisplattentemperatur unterhalb von 65°C in allen Betriebszuständen, so dass ein sehr effizienter Betrieb der μAFS -Lichtmodule bei geringer Temperatur möglich ist.

4. Fahrzeugintegration und Erprobung

Der in diesem Projekt entwickelte Scheinwerfer gehört zur mittlerweile dritten Entwicklungs-Generation von Pixelscheinwerfern: die erste Generation hatte 32 Pixel pro Modul, die zweite bereits 96 Pixel. Beide Generationen (s. Bild 11) sind mittlerweile mit etwas geänderter Pixelzahl am Markt erhältlich: Im Mercedes-Benz CLS (seit 2014, 24 Pixel) und in der Mercedes-Benz E-Klasse (2016, 84 Pixel).

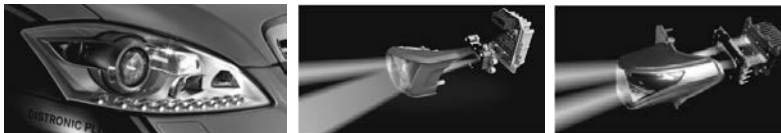


Bild 11: 96-Pixel im ESF (Experimental-Sicherheits-Fahrzeug) 2009 [6], Pixelmodule aus MB-CLS [7] und MB-E-Klasse [1]

Für diese beiden Generationen war es noch möglich, ein Ansteuerkonzept zu modifizieren das noch aus der Welt der Schrittmotoren stammt. Insgesamt sind diese mit diskreten LEDs aufgebauten Lichtmodule in sinnvollem Maße nur sehr begrenzt evolutionsfähig. In der jetzigen dritten Generation erlauben die 3072 Pixel pro Scheinwerfer völlig neue Lichtverteilungen und Funktionen. Gleichzeitig hat sich die Zahl und Qualität der im Fahrzeug vorhandenen Sensoren (Kameras, Radar) und anderer Datenquellen (GPS, Inertialsystem) erhöht. Um diese Freiheitsgrade vollumfänglich nutzen zu können wurde ein völlig neues Ansteuerkonzept entwickelt. Kern dieses Konzeptes ist ein MatLab/Simulink-Modell, das im

Fahrzeug echtzeitfähig auf einem speziellen Rechner läuft. Eingangsdaten sind die im Versuchsfahrzeug (Mercedes-Benz E-Klasse BR212M) vorhandenen Sensor- und Fahrzeugdaten. Aus diesen wird eine Soll-Lichtverteilung berechnet. Diese wird dann an ein zweites Steuergerät übermittelt, welches die Leistungstreiber enthält und die Daten soweit aufbereitet, dass sie direkt an die intelligente LED gesendet werden können. In der einfachsten Form ist die Soll-Lichtverteilung eine nachgebildete Fernlichtverteilung, aus der andere Verkehrsteilnehmer ausgeblendet werden (Teilfernlicht). Durch die seitliche Verschiebung der Lichtverteilung auf den LED-Pixeln kann ein Kurvenlicht dargestellt werden und durch die vertikale Verschiebung eine hochdynamische Leuchtweitenregelung.

Für den Betrieb des Versuchsfahrzeuges spielt natürlich die Fahrsicherheit eine besondere Rolle. Deswegen wurden die Serienbauteile und -steuergeräte (u.a. für Fahrtrichtungsanzeiger und Grundlicht) soweit wie möglich übernommen. Der Fahrzeugumbau (insb. Verlegung der Kabelsätze) erfolgte bereits 2015, mit einem Update auf bessere Scheinwerfer-Komponenten ist das Fahrzeug seit Mitte Februar 2016 einsatzbereit (s. Bild 12). In der verbleibenden Projektlaufzeit wurde noch das Software-Modell stark erweitert und erste Probandenuntersuchungen durchgeführt.

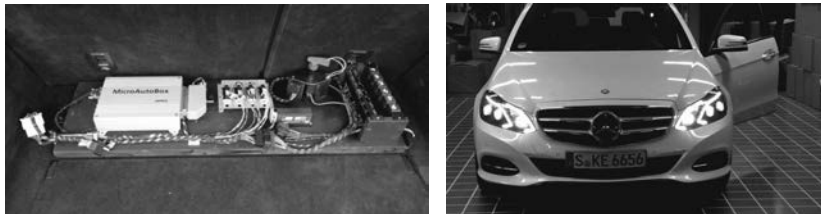


Bild 12: Ansteuereinheit für den Betrieb der μ AFS-Scheinwerfer im Kofferraum und Bild von der Inbetriebnahme.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit den vorgestellten Scheinwerferprototypen wird ein weiteres Kapitel in der Evolution automobiler Lichtsysteme eröffnet. Das dargestellte Konzept zur Erzeugung hochpixelierter Scheinwerferlichtquellen vereint zwei Kernaspekte in einzigartiger Weise: 1. Die zunehmende Pixelanzahl erzwingt eine höhere Integration um die großen Datenmengen beherrschbar zu machen. 2. Die integrierte, aktive Ansteuerung der LED-Pixel-Matrix ermöglicht den insgesamt effizientesten Ansatz, da nur dort aktiv Licht bereitsteht wo es benötigt wird und nicht passiv unterdrückt werden muss. Dieses Konzept wurde erfolgreich in Form der μ AFS-Komponenten und Lichtmodule umgesetzt. Zudem werden mit dem hier vorgestellten

Optiksystem zur Erzeugung von sinnvollen Lichtverteilungen hohe Systemeffizienzen von über 43% bei gleichzeitig horizontaler Aufweitung der abgebildeten Lichtquellen für sinnvolle Lichtverteilungen mit großer horizontalem Ausleuchtbericht z.B. für die Funktion dynamisches Kurvenlicht erreicht. Das neuartige Kühlsystem mit einer zentralen Wärmesenke ermöglicht durch einen sehr geringen Wärmewiderstand von unter 0,4K/W einen besonders effizienten Betrieb der Lichtquellen. Die aufgebauten Prototypenscheinwerfer kombinieren hochintegrierte und effiziente Lichtquellen mit sehr effizienten Optiksystemen sowie besonders guten Kühleigenschaften des Systems und stellen somit ein neuartiges und hochinnovatives Scheinwerferkonzept dar, mit dem in wenigen Jahren auch für Jedermann besondere und die Sicherheit verbessernde Nachtfahrerlebnisse Realität werden können.

Danksagung

Die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse wurden im Projekt „Integrierte μ -strukturierte Leuchtdioden als intelligente Lichtquellen für neuartige adaptive Frontscheinwerfersysteme“ (μ -AFS) erzielt. Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das im Rahmen des Programms ‚Photonik Forschung Deutschland‘, Bekanntmachung ‚Integrierte Mikrophotonik‘ dieses Projekt unter dem Förderkennzeichen 13N12514 unterstützt hat.

Literaturangaben

- [1] F.-J. Kalze, C.-U. Knaack, B. Böke, „Mehrzeiliges Scheinwerfersystem in der Mercedes-Benz E-Klasse“, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), 02/2016, p. 16-22
- [2] S. Grötsch et al., Integrated High Resolution LED Light Sources in an AFS/ADB Headlamp, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, September 2015
- [3] T. Liebetrau et al., Ein neuer Ansatz für hochauflösende LED-Pixel-Scheinwerfer, Congress on Electronics in Vehicles (ELIV), Baden-Baden, Oktober 2015
- [4] H. Oppermann, M. Hutter: Chapter 7: Au/Sn Solder. in “Handbook of Wafer Bonding”, Ed. P. Ramm, J.J.Q. Lu, M.M.V. Taklo, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KG, Weinheim 2012, pp. 119-138, ISBN: 978-3-527-32646-4
- [5] M. A. Schlüter, Innovative Kühlkonzepte für LED-Scheinwerfer, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2011
- [6] J. Moisel, R. Ackermann, M. Griesinger, “Adaptive Headlights utilizing LED-Arrays“, Proc. Int. Symposium on Automotive Lighting, 29.-30.9.2009, Darmstadt, p. 287 – 296
- [7] M. Maier, J. Moisel, F. Herold, „Multibeam-Scheinwerfer in der Mercedes-Benz CLS-Klasse“, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) 02/2015, p. 16-20

Matrix-Beam Algorithm: How fast is possible?

Sascha Saralajew, Gennady Benderman,
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach

Abstract

Matrix-beam headlamp systems become more and more established in the automotive lighting. The advantage of such systems is given by the function of masked Dynamic Light Assist, which allows large recognition distances for the driver with reduced glaring of other traffic participants in several road situations. Preceding or oncoming traffic and traffic signs are detected and tracked by the front camera. In the following calculation, objects being glared by the high beam are masked out by dimming or switching off specific matrix pixel. This process is part of the matrix-beam algorithm.

Coming headlight systems like DMD (Digital Micromirror Device) and LCD (Liquid Crystal Display) promise high resolution, which leads to increasing computational expense of the matrix-beam algorithm. This paper takes a closer look at the runtime of two different tasks, gap calculation and light distribution morph. For that, the matrix-beam algorithm is defined as a mathematical problem. Different solutions from the field of algorithmic geometry are presented and implemented on different target systems with sequential or parallel processing including an FPGA. Then, comparison among methods is performed. Further, we estimate a limit for the maximum amount of pixels which can be calculated by sequential processing in a given maximal computation time.

1. Introduction

In recent years the development of selective light emitting headlamp systems, so-called matrix-beam systems, has got an increasing popularity [1, 2]. This is due to the high potential to raise the safety of the driver and other traffic participants using new headlamp functions by night, such as the glare-free high beam, see Figure 1. That leads to rapidly increasing focus on software development and make automobile manufactures face new challenging tasks. That fact is exemplified by the glare-free high beam function based on the recognition of traffic participants by the driver assistance camera. Detecting traffic participants the matrix-beam system has to react as fast as possible to avoid glaring. Unfortunately, the decision

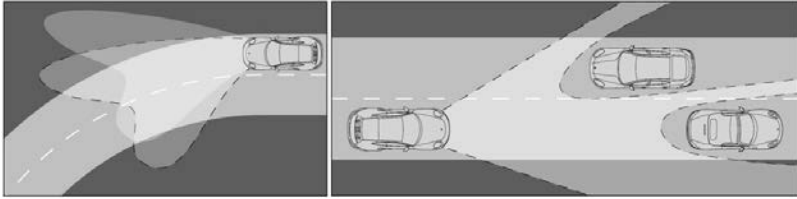


Fig. 1: Visualization of the bending light (left) and glare-free high beam (right)

which parts of the headlamp light distribution produce a glaring effect for the traffic participants is non-trivial. This is due to the fact that an algorithm has to check the glaring potential for the detected traffic participants of each selective tunable part of the headlamp light distribution. If this decision is done by a complex mathematical operation, the computational costs will be extraordinary high which will lead to a worse real-time capability of the system.

In this contribution, a study of methods is presented which are the fundamental main parts of an algorithm for a matrix-beam system, the matrix-beam algorithm. We define the main parts to:

1. Light distribution morph: The modulation of a defined headlamp light distribution due to changed conditions.
2. Gap calculation: The computation of selective switchable parts of the headlamp light distribution producing a glaring effect for a given object and which have to be turned off.

Based on these main parts we give a mathematical description of the problems, present general solving algorithms and construct special algorithms for an efficient solving with respect to time and space complexity. Moreover, we consider the algorithms with respect to sequential and parallel computing methods. Therefore, implementations on a microcontroller and an FPGA (Field Programmable Gate Array [3]) are analyzed.

2. Mathematical Description

The basis of a matrix-beam system is the selective light emitting. In a traditional headlamp system the light distribution is generated by a single light source. In contrast, a matrix-system models the whole light distribution by an arbitrary number of light distribution segments. These parts are called pixels P_i of the matrix-beam system, see Figure 2.a.

Considering the light distribution of a pixel on a sensor plane:

$$E := \{(x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3 | ax + by + cz = d\}$$

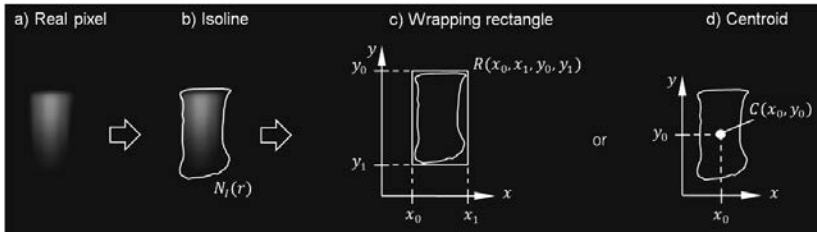


Fig. 2: Visualization of the pixel approximation process

in a fixed distance d , it seems impossible to well define the complex light distribution $I(\vec{x})$, $\vec{x} \in E$ by a closed formula. Therefore, one reasonable step is to approximate the pixel light distribution by a closed curve on the sensor plane. For this purpose we define a parameter r and the curve to be the isoline:

$$N_i(r) := \{\vec{x} \in E | I(\vec{x}) = r\}$$

Due to the continuity of $I(\vec{x})$ the isoline $N_i(r)$ exists and is closed. Unfortunately, these isolines are again too complex for a closed mathematical description in general, see Figure 2.b. Thus, at first we define the curve to be the smallest wrapping rectangle $R_i(x_0, x_1, y_0, y_1)$ around the isoline $N_i(r)$ of the pixel P_i . We skip a formal definition of the wrapping rectangle R_i and refer to Figure 2.c. For example, like in [4] the sensor plane E is defined to the x - y plane in a distance of 25m. The threshold r is the glaring boundary of 0.5 lux – in sense to the measure point B50L of [4] – and the wrapping rectangles are aligned to the x , y axis.

A second reasonable step is the definition of a centroid $C_i(x_0, y_0)$ for each pixel. There exist several possible definitions such as the geometric centroid of the isoline or the expected value of the pixel light distribution. Again we refer to Figure 2.d for visualization.

One main part of a matrix-beam algorithm is defined to the gap calculation. The driver assistance camera detects an object like a traffic participant. Normally the object is described by a rectangle R'_0 in the camera coordinate system. This object R'_0 is transformed in the headlamp coordinate system and described by R_0 . Now, the task is to solve which pixel P_i produces a glaring with respect to the object R_0 . Mathematically the yielded problem is a *polygon intersection problem* [5] on the definition of R_i or a *point in polygon problem* [6] based on C_i , see Figure 3.

The second main part is a light distribution modulation like for bending light, see Figure 1. Given a set of pixels $P := \{P_i | i = 1, \dots, n\}$ and a set of scaling factors $S_j := \{s_i^j | i = 1, \dots, n\}$, $S_j \subseteq \mathbb{R}^n$ describing the intensity of pixels a light modulation is defined by a function

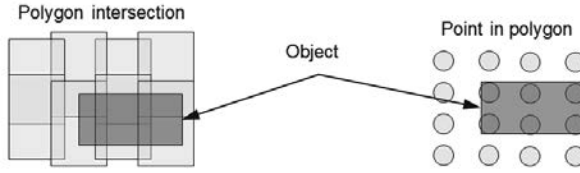


Fig. 3: Polygon intersection and point in polygon problem

$$f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n: f(S_j, S_k, t) = S$$

where S_j is the initial set of scaling factors and S_k the target set of scaling factors. The parameter t describes the influence of an external action, like time or swivel angle. Without loss of generality, we assume $t_j \leq t_k$, $t \in [t_j; t_k]$ and further $f(S_j, S_k, t_j) = S_j$, respectively, $f(S_j, S_k, t_k) = S_k$. The function f realizes the morphing of the set S_j to S_k and is called *morphing function*. This transformation works at S depending on t . Thus, the operation is potentially complex. Finally we define an index function

$$G: P \rightarrow \mathbb{N} \times \mathbb{N}: G(i) = (l, k)$$

which defines the position of each pixel P_i in a grid of natural numbers. Moreover, by fixing the index k or l we can define a column-wise ordering or, respectively, a row-wise ordering of the pixels. In the use case of bending light the light modulation between the light distribution states S_j and S_k depends on the swivel angle t . Further, the shift between the states is described row-wise using G . The function f has to be a smooth function.

3. Solving Approaches

In the following section we describe possible solving methods for both problems with respect to the processing. Further we estimate the complexity in the big O notation [7].

3.1 Sequential calculation

In sequential calculation, we try to avoid functions working on each single pixel with floating point operations like $(+)$, (\cdot) because such operations are time consuming. In the following, we consider the time and space complexity over n the number of pixels P_i .

The decision whether there is an intersection between two arbitrary convex polygons has a time complexity of $O(\log_2 n^* + \log_2 m^*)$ where n^* is the number of corners of the first polygon and m^* the number of corners of the second polygon [5]. According to the previous section, we restrict ourselves to rectangles. Therefore, the decision whether there is an intersection between one object and n pixels has a time complexity of $O(n)$. This result holds also for the point in polygon problem. Unfortunately, the general algorithms are based on floating point

Algorithm 1: Solving the rectangle intersection problem

Input:

- Set P of n pixels with the corresponding wrapping rectangles $R_i(x_0, x_1, y_0, y_1)$
- Object $R_0(x_0, x_1, y_0, y_1)$

Output:

- Set \bar{P} with pixels that do not intersect R_0

Initialization phase:

1. Define M to a sufficiently large number like ∞ , $M \leftarrow \infty$
2. Sort all pixels P_i in descending order with respect to x_0
 - a. Define the "index storage" $idx_{x_0} \leftarrow \emptyset$ and "sorted storage" $sort_{x_0} \leftarrow \emptyset$
 - b. Store in idx_{x_0} the list of indices that sort $R_i(x_0)$ in descending order
 - c. Extend the beginning of the list idx_{x_0} with the virtual initial index zero
$$idx_{x_0} \leftarrow (0, idx_{x_0})$$
 - d. Store in $sort_{x_0}$ the list of sorted elements $R_i(x_0)$ in descending order
 - e. Extend the beginning of the list $sort_{x_0}$ with the virtual initial state M

$$sort_{x_0} \leftarrow (M, idx_{x_0})$$
3. Sort all pixels P_i in ascending order with respect to x_1
 - a. Repeat step 2.a – 2.d with idx_{x_1} , $R_i(x_1)$ and $sort_{x_1}$ in ascending order
 - b. Extend the beginning of the list $sort_{x_1}$ with the virtual initial state $-M$

$$sort_{x_1} \leftarrow (-M, idx_{x_1})$$
4. Repeat step 3. with idx_{y_0} , $R_i(y_0)$ and $sort_{y_0}$
5. Repeat step 2. with idx_{y_1} , $R_i(y_1)$ and $sort_{y_1}$

Working phase:

```

 $n_1 \leftarrow n + 1$ 
 $idx_0 \leftarrow 1, idx_1 \leftarrow 1, id_{y_0} \leftarrow 1, id_{y_1} \leftarrow 1$ 
 $n_2 \leftarrow \frac{n_1}{2}$ 
while  $n_2 \geq 1$  do // search non-overlapping indices
     $\bar{n} \leftarrow \lfloor n_2 \rfloor$  // floor function
    if  $R_0(x_0) \geq sort_{x_1}(id_{x_0} + \bar{n})$  do:  $id_{x_0} \leftarrow id_{x_0} + \bar{n}$ 
    if  $R_0(x_1) \leq sort_{x_0}(id_{x_1} + \bar{n})$  do:  $id_{x_1} \leftarrow id_{x_1} + \bar{n}$ 
    if  $R_0(y_0) \leq sort_{y_1}(id_{y_0} + \bar{n})$  do:  $id_{y_0} \leftarrow id_{y_0} + \bar{n}$ 
    if  $R_0(y_1) \geq sort_{y_0}(id_{y_1} + \bar{n})$  do:  $id_{y_1} \leftarrow id_{y_1} + \bar{n}$ 
     $n_2 \leftarrow \frac{\lceil n_2 \rceil}{2}$  // ceiling

```

end

// store non-glaring pixels

$$\bar{P} \leftarrow \left(\bigcup_{i=2}^{id_{x_0}} P_{idx_{x_1}(i)} \right) \cup \left(\bigcup_{i=2}^{id_{x_1}} P_{idx_{x_0}(i)} \right) \cup \left(\bigcup_{i=2}^{id_{y_1}} P_{id_{x_{y_1}}(i)} \right) \cup \left(\bigcup_{i=2}^{id_{y_0}} P_{id_{x_{y_0}}(i)} \right)$$
return \bar{P}

operations. For example, in a really efficient programming of the point in polygon problem there remains at least one calculation of a determinant [6]. Thus, we search for improvements of the algorithms for our special purpose. Due to the restriction to rectangles, we construct the Algorithm 1 to decide if there is an intersection between a given set of pixels P and a rectangle object R_0 .

The proposed algorithm works as follows: in the initialization phase we transform the pixels borders in a sorted order and store the indices that sort the borders. It can be interpreted as classical map structure with keys (the indices that sort the borders) and values (the sorted borders). We execute the initialization phase only once and store the map. After the initialization phase we compute in the working phase which pixels produces no glaring for the incoming object. This is done in two steps. In the first we compute with divide and conquer approach which pixels are the last that do not contribute a glaring. For example in the first line we consider the left border from the object and compute the last index over the right borders of the pixels that does not glare the object. For this purpose we need the values of the map. After this first step we know for each border of the object that all indices smaller than the computed last index produce no glaring. Therefore, in the second step we compute the union over all these indices using the keys of the maps.

Due to the initialization phase we have to keep $O(n)$ elements in the memory. More precisely we duplicate the memory size compared to the original input. The computation of the respective indices that contribute no glaring is done in $O(\log_2 n)$. Unfortunately, to compute the union we need again a linear time of $O(n)$. Nevertheless, we need only few floating point operations compared to the general algorithm. Thus we preserve a linear improvement in the time complexity for our proposed method.

To solve the point in polygon problem more efficiently than the general algorithm we design an approximating algorithm to work on rectangle objects only. Further we assume that we can define an index function G which orders the elements row- and column-wise in a k -nearly-perfect grid structure. A k -nearly-perfect grid structure is a grid structure in which each line crosses at most k lines of an ideal grid. Under these conditions we can construct an algorithm with a time complexity $O(\log_2 n + k^2)$ and a space complexity like the input size of P . The algorithm makes at most an error of k . More precisely, compared to the exact solution, the algorithm can possibly decide to turn off k lines more than required. This can be also interpreted as an inherent safety gap.

To demonstrate the solving of the light distribution morph problem, we consider a special algorithm for the bending light. The difficulty in this problem is the approximation of the morphing function f due to the swivel angle t without floating point operations. In the application of the bending light we assume that we have an index function G and an initial state S_0 of scaling factors describing the light distribution of the matrix-beam system. Moreover, we consider the centroid definition of each pixel. Based on the above definitions the bending light problem is described as follows: The initial state S_0 corresponds to the swivel angle $t = 0$. If we consider two arbitrary row-neighbored pixels, for example

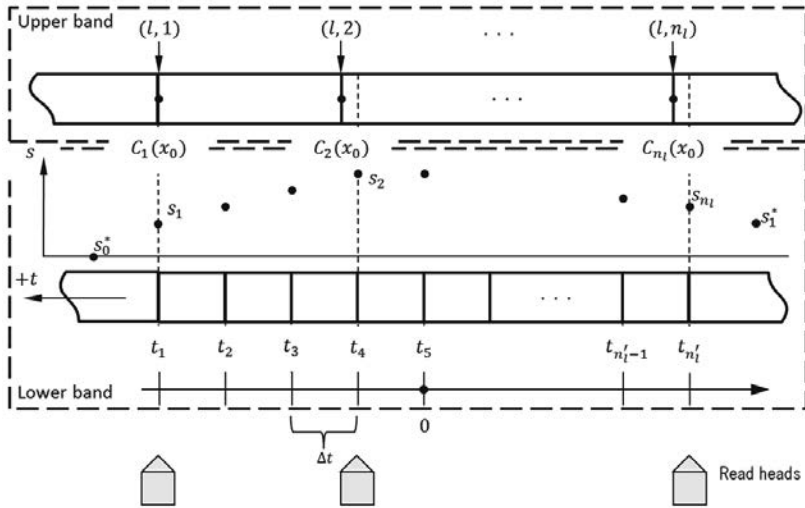


Fig. 4: Sketch of the bending light algorithm – band machine

$G(P_{i_1}) = (l, k)$ and $G(P_{i_2}) = (l, k + 1)$, then the morphing function f_{i_1} for the single pixel P_{i_1} is defined as $f_{i_1}(s_{i_1}^0, s_{i_2}^0, t) = s_{i_1}$ with $t \in [C_{i_1}(x_0); C_{i_2}(x_0)]$ assuming $C_{i_1}(x_0) \leq C_{i_2}(x_0)$. The initial scaling factor $s_{i_1}^0$ of the pixel P_{i_1} is transformed to the initial state of the pixel P_{i_2} by evaluating f_{i_1} .

Due to the complexity of the initial phase of the algorithm we do not describe the algorithm in a pseudo-code. Nevertheless, we give a sketch of the idea. We assume that we want to shift the row l and the row-wise ordering is defined like in Figure 4 – see upper band. Further, we define a step size $\Delta t > 0$ and the set T of sampling points:

$$T := \{t' = \Delta t \cdot k \mid k \in \mathbb{Z}, C_1(x_0) \leq t' \leq C_{n_l}(x_0)\}$$

for approximating the morphing function f . Next, we approximate all the pixel positions $C_i(x_0)$ of the row l to the nearest neighbor $t'_i \in T$. Finally we construct a list like in Figure 4 – see lower band. The list can be interpreted as a tape with a step size Δt and the signals as the scaling factors s_i at positions t_i that correspond to a $C_i(x_0)$. Additionally, we compute the signal for all tape states T by evaluating the morphing function at all the sampling points using the respective border states as input, see Figure 4 with assumed linear interpolation between two given states. To preserve a well-defined behavior we extend the borders of the list by virtual states with infinite length and default scaling states s_0^* and s_1^* . Finally we

construct a tape machine with n_l read heads each at a position t_i that corresponds to a $C_i(x_0)$. The read heads define the scaling factors for each P_i . If a swivel angle t forces at the tape machine, the (lower) band is moved to the respective direction (reverse to the definition of the t axis) by $\left\| \frac{t}{\Delta t} \right\|$ steps (rounding function) and the read heads stack the signals (scaling factors) of the band to the pixels.

After the initialization the algorithm need only one division and the followed read out of the tape machine. Therefore we get a time complexity $O(n)$. Under the assumption that we want to morph each scaling factor of the n pixels, we have space complexity independent of n . But dependent on Δt with $O\left(\frac{1}{\Delta t}\right)$.

3.2 Parallel calculation

To begin with, for the implementation of the algorithms on an FPGA n wrapping rectangles $R_i(x_0, x_1, y_0, y_1)$ for respective n pixels P need to be saved easily accessible. For a certain limited number of pixels P internal memory of the FPGA can be used. Since floating-point values need plenty of logic components, fixed-point representation in two's complement format with case-dependent word length and fraction length are applied. The requested resolution of angles decides on the fixed-point format. Additionally, there is one grey level value $s_i \in S_j$ per pixel.

For an optimal use of strengths of an FPGA like pipelined processing, a fluent and deterministic use of memory is recommended. Here, the pixel rectangles R_i are read out from the internal memory one by one without any stops or jumps of the address. In this case, it can be easily realized without any arbiters, since the described system is the only one to access the memory. The same fixed-point representation applies for the objects.

Having m different objects rectangles R_{O_i} in the respective headlamp coordinate systems, intersection of each matrix pixel with each object needs to be checked. The result is m 1-bit streams. Each streamed bit represents an on/off-state of the specific pixel P_i depending on the particular overlap with one of the objects R_{O_i} . To leave a pixel in an on-state all m bits must be '1', otherwise it gets switched off.

The bending light of the light distribution is more computation-intensive than gap calculation. The determining input parameter t is the swivel angle. The fixed-point representation is again the same as for pixel object rectangles.

Similar to the previous section we construct the algorithm on the basis of the centroid definition $C_i(x_0, y_0)$ and considering the shift of the row l . Different to the previous algorithm we calculate the morphing function f during the runtime. However, we use the same notation

Algorithm 2: Pseudo-code of bending light for parallel computing

Input:

- Set of n_l pixels in the centroid form $C_i(x_0, y_0)$, $i = 1, \dots, n_l$ and the respective scaling values $S_0 := \{s_1, \dots, s_{n_l}, s_1^*\}$ with the virtual state s_1^*
- Swivel angle $t > 0$
- Morphing function f

Output:

- List S of updated pixel scaling factors in the ordering $s_{n_l}, s_{n_l-1}, \dots, s_1$

Working phase:

```

 $S \leftarrow s_1^*$ 
 $k \leftarrow n_l - 1$ 
for  $i \leftarrow n_l - 1$  to 1 do:
    if  $t > C_{i+1}(x_0) - C_i(x_0)$  do:
        append  $S$  by  $s_1^*$ 
         $t \leftarrow t - (C_{i+1}(x_0) - C_i(x_0))$ 
    else:
        append  $S$  by  $s = f(s_k, s_{k+1}, t)$ 
         $s_1^* \leftarrow s$ 
         $k \leftarrow k + 1$ 
    end
end
return  $S$ 

```

as in the previous algorithm, see Figure 4 upper band. We emphasize that depending on the sign of the swivel angle t , the read-out order of the row pixels needs to be changed. More precisely, we start the evaluating of the s_i on the side of the band where the read head falls in the virtual state due to given t . For our explanation, we define $t > 0$. Considering Figure 4 (band-machine) we observe that we start with the evaluating at C_{n_l} . The pseudo-code for this case is given in Algorithm 2. The principal of the algorithm can be easily transferred to calculating multiple rows.

The most costly arithmetic operation is the division. Depending on the requested clock frequency and bit depths of the input parameters, it takes several clock cycles to calculate the result. As a consequence, a bunch of buffering registers is indispensable to keep the pipelined processing without interrupts.

4. Results

4.1 Sequential calculation

We implement the algorithms in different languages and devices:

1. In MATLAB (The MathWorks, Inc.) on an Intel Core i7 2.9GHz
2. In C on a MicroAutoBox II (dSpace GmbH) DS 1401 MAB 900MHz
3. In C on a Aurix TC297 300MHz Tricore

Table 1: Time complexity of the algorithms for sequential programming

	Device No. 1	Device No. 2	Device No. 3
Gap calculation, general	~ 3000 μ s	~ 65 μ s	~ 172 μ s*
Gap calculation, proposed	~ 100 μ s	~ 14 μ s	~ 37 μ s
Bending light algorithm, general	~ 726 μ s	~ 23 μ s	~ 61 μ s*
Bending light algorithm, proposed	~ 297 μ s	~ 12 μ s	~ 31 μ s*

Table 2: Space complexity of the algorithms for sequential programming

	Device No. 1	Device No. 2	Device No. 3
Gap calculation, general	10752 bit		
Gap calculation, proposed	21504 bit		
Bending light algorithm, general	8064 bit		
Bending light algorithm, proposed	39232 bit		

We chose the Aurix TC297 because it is available for automotive usage. During the tests we assume a matrix-beam system with n equal 84 pixels. For gap calculation, we assume the wrapping rectangle description R_i and solve the polygon intersection problem with the general method [6] and the proposed one. Further we compute the non-glaring pixels for only one incoming object R_O . For the bending light experiment we shift 84 pixels. Further, we chose Δt to 0.1. To compare our method to the general algorithm for bending light algorithm – sequential evaluating of f – we also implement them. The runtime results are presented in Table 1. We describe with μ s* a time that is estimated on the basis of the observed behavior for the proposed general gap calculation. Further, we assume that this estimation is valid due to the fact that we use for the device 2 and 3 the same source code.

The memory usage of the different methods is presented in Table 2. We emphasize that we assume for all numbers in the memory a float format of 32 bit independently of the necessity of such a large number format.

4.2 Parallel calculation

Parallel calculation is tested on an evaluation board with Altera's FPGA Cyclone V (5CSXFC6D6F31C8ES). The logic and memory utilization for the implementation of gap calculation and swivel function on the FPGA can vary depending on the number of used buffers and certainly on the word length of the input parameters. Table 3 shows the chosen parameter formats and the resulting resolution. Both pixel and object rectangles R can be combined to 64 bit values each with their intensity.

Table 3: Properties of input parameters

Parameter	Signed	Word length bits	Fractional bits	Resolution
$R_i(x_0, x_1, y_0, y_1)$	x	[14 14 14 14]	[8 8 8 8]	0.0039°
S_j		8	0	0.39 %
t	x	14	8	0.0039°

Table 4: Synthesis information of presented algorithms:

Gap calculation		Bending light algorithm	
Logic Utilization (ALM [3])	54 of 41910	Logic Utilization (ALM [3])	728 of 41910
f_{max}	539 MHz	f_{max}	117 MHz
DSP Blocks	0	DSP Blocks	2
block memory bits	0	block memory bits	2400

The results of the algorithm synthesis are presented in Table 4 assuming a 300 by 100 pixel matrix saved in the FPGA's internal memory. Since gap calculation is an essential comparison of edge positions of one specific object and pixel rectangles, logic utilization is very low and the maximum reachable clock frequency is more than 500 MHz. The swivel algorithm needs more logic elements, some Digital Signal Processor (DSP) blocks for multiplication operations and the reachable clock frequency is still over 100 MHz. For a minimum clock frequency of 100 MHz, the fixed-point division module takes 8 pipeline stages and is thus the longest procedure, since multiplication on DSP blocks and other operations are done in one clock cycle each. There are also 2400 bits of internal memory allocated for one intensity row. The controlling and pixel reading modules are implemented, but not described closer and their allocation is not included in the shown results. Storing of 30000 pixels takes $30\,000 \cdot 64$ bits of block memory, the other input parameters are buffered in logic registers.

5. Conclusions

Nowadays, the gap calculation runs as a few more driver's assistance systems on the Aurix microcontroller used in section 4. Assuming an allowed calculation time of 0.1 ms per object and $O(n)$ for the proposed algorithm, a maximum of around 227 pixels is reachable. The needed memory size is doubled compared with the general algorithm.

The proposed algorithm for bending light calculation is less computing-intensive, 270 pixels can be processed in 0.1 ms, however the amount of storage is extraordinary high with respect to the general solution.

Here, the FPGA can make a lot of his strengths. Since a pipelined process is used, there is no specific calculation time. The calculated intensities of pixels can be directly sent to the receiver before all pixels are modulated and the transmission line is the limiting factor. If the presented modules run with a clock frequency of 100 MHz, it will take about 300 μ s to read out and process 30 000 pixels. Additionally, the number of pipeline stages needs to be taken in account, which is at least 14, especially because of the computing-intensive light morph. Another advantage of FPGA procession is the parallel calculation of gap calculation for multiple objects. A growing number would only lead to few more pipeline stages and linear growing logic utilization. The limiting factor for FPGAs is the access to memory blocks. For a specific higher number of pixels, an external memory needs to be used and possibly shared with other modules having access to it, which would lead to a slowdown of the process. Further, a morphing function which cannot be simplified to row or column-wise evaluation seems to be more complex than considered cases. Due to the memory expansion of the proposed sequential algorithm, this method isn't efficiently computable on the general morphing function evaluation. Thus, the parallel processing is more suitable. Based on our studies, the real-time requirements on the system cannot be achieved by sequenced processing for expected increasing pixel numbers any more. Therefore, the parallel calculation like by FPGAs becomes more important. Further, under the assumption of a runtime of 0.1 ms to preserve the real-time capability on the device 3 the limit for sequential processing is around 200 pixels as our results show.

- [1] Hummel, B.: Blendfreies LED-Fernlicht., Universität Karlsruhe Dissertation 2009
- [2] Totzauer, A.: Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht. München: Herbert Utz Verlag 2013
- [3] Altera Corp.: Cyclone V Device Handbook - Vol.1: Device Interfaces and Integration (2015)
- [4] ECE 123: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen (AFS) für Kraftfahrzeuge. Economic Commission for Europe – 24.8.2010
- [5] Barba, L., Langerman, S.: Optimal detection of intersections between convex polyhedra. Symposium on Discrete Algorithms 26 (2015) S. 1641-1654
- [6] Hormann, K., Agathosb, A.: The point in polygon problem for arbitrary polygons. Computational Geometry 20 (2001) 3 S. 131-144
- [7] Knuth, D.: The art of computer programming, Vol. 1 (3rd ed.): fundamental algorithms. Addison-Wesley 1997

Hochauflösende 3D-PMD-Kamera zur Gefahrenerkennung in der Kraftfahrzeugtechnik

High resolution 3D PMD camera for assistance on mobile machines

M.Sc. **Henrik Lietz**, Hochschule Ravensburg-Weingarten, Weingarten

Kurzfassung

Für die Fahrerassistenz bieten photonic mixing device (PMD)-Kameras ein großes Einsatzpotenzial, da sie die Aufnahme dreidimensionaler Objekte in Echtzeit erlauben. Eine große Limitierung stellt jedoch ihre geringe Sensorauflösung dar. Zur Auflösungssteigerung eignen sich ganz besonders Multiframe-Superresolution (SR)-Verfahren, welche die laterale Sensorauflösung virtuell erhöhen. Aus der Überlagerung von Mehrfachaufnahmen resultiert eine gesteigerte Informationsdichte im Ergebnisbild. In vorliegender Arbeit werden 4 SR-Algorithmen aus dem Ortsbereich miteinander verglichen und im Kontext der Objekterkennung für Fahrerassistenzsysteme bewertet.

Abstract

PMD cameras offer a great application potential for driver's assistance on mobile machines because they enable reconstruction of three-dimensional surfaces in real time. However, a great limitation is their low sensor resolution. For increasing spatial resolution so-called multi-frame super-resolution (SR) methods are well suited. These methods overlaps several low-resolution images to increase spatial resolution of an optical system virtually. This work compares and evaluates 4 spatial domain SR algorithms in the context of object detection for driver's assistance.

1. Einführung

Die Objekterkennung stellt für viele Anwendungen in der Kraftfahrzeugtechnik eine Schlüsselanforderung dar. Je genauer Objekte erkannt und klassifiziert werden, desto zuverlässiger arbeiten Fahrerassistenzsysteme.

Ein großes Einsatzpotenzial bieten PMD-Kameras. Diese lichtlaufzeitmessenden Kameras erlauben die Objekterfassung dreidimensionaler Oberflächen in Echtzeit. Dabei generieren sie gleichzeitig ein Amplituden- und Entfernungsbild der Objektszene. Das gegenwärtige Problem stellt jedoch die geringe laterale Auflösung der PMD-Sensoren dar. Gerade für Anwendungen im Außenbereich sind große Pixelabmessungen mit hoher Empfindlichkeit not-

wendig, um das Nutzsignal vom umgebenden solaren Spektrum zuverlässig trennen zu können. Dort sind mit Stand der Technik Auflösungen im 1k-Bereich erhältlich, womit sie eher einem Sensor als einer bildgebenden Kamera gleichen. Zwar lassen sich damit Objekte zuverlässig erkennen, jedoch ist eine Objektklassifizierung nur bedingt möglich. Auflösungssteigernde Verfahren, ohne Modifikation sensorspezifischer Eigenschaften, sind bereits aus der zweidimensionalen Bilderfassung bekannt. Sie lassen sich unter dem Begriff „Superresolution“ zusammenfassen und erhöhen die laterale Abtastrate durch Einbringen zusätzlicher Stützstellen.

Einführend werden die theoretischen Grundlagen zum Funktionsprinzip von PMD-Kameras erläutert und Verfahren zur Auflösungssteigerung durch Superresolution (SR) vorgestellt. Im Anschluss wird das Potenzial einer auflösungsgesteigerten PMD-Kamera für die Kraftfahrzeugtechnik erörtert. Darauf folgt die Auswertung von SR-Ergebnissen, die im Kontext der Fahrerassistenz bewertet werden. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Arbeit.

PMD-Kamera

Die Entfernungsmessung bei PMD-Kameras (photonic mixing device, Photomischdetektor) erfolgt über Laufzeitmessungen des Lichts. Üblicherweise emittiert die aktive Beleuchtungseinheit der PMD-Kamera ein periodisch modulierte Signal, das von der Objektoberfläche reflektiert wird. Aus der Phasendifferenz des emittierten und reflektierten Signals wird der entsprechende Entfernungswert berechnet. Weit verbreitet ist der Einsatz mehrerer IR LEDs, die in den Halbraum strahlen. Aus dem Ein- und Ausschaltverhalten von LEDs lässt sich ein sinusförmiges Modulationssignal annähern. Durch optische Verluste (Absorption, Streuung, usw.) ist das reflektierte Signal in seiner Amplitude verkleinert, wie in Bild 1 illustriert. Abhängig von der Objektentfernung variiert die Phasendifferenz, da sich die Laufzeit des Lichts ändert. Nach [1] und [2] ergibt sich die Objektentfernung d in Abhängigkeit der Phasendifferenz φ_d , konstanter Lichtgeschwindigkeit c und definierter Modulationsfrequenz f_{mod} zu Gleichung 1:

$$d = \frac{\varphi_d \cdot c}{4\pi \cdot f_{mod}} \quad (1)$$

Zur schnellen und zuverlässigen Rekonstruktion des reflektierten Signals eignet sich die sogenannte 4-Phasen-Messung. Mit Kenntnis über ein periodisches (hier sinusförmiges) Modulationssignal und vier äquidistanten Einzelmessungen (sampling point), lässt sich das reflektierte Signal eindeutig rekonstruieren (siehe Bild 1). Da jede Einzelmessung (sampling point) einer Bildaufnahme in voller Pixelauflösung entspricht, wird diese in der Literatur oftmals als Phasenbild bezeichnet. Die Amplitudenwerte im SR-Ergebnis ergeben sich durch Summation der Intensitätswerte aller vier Phasenbilder [3].

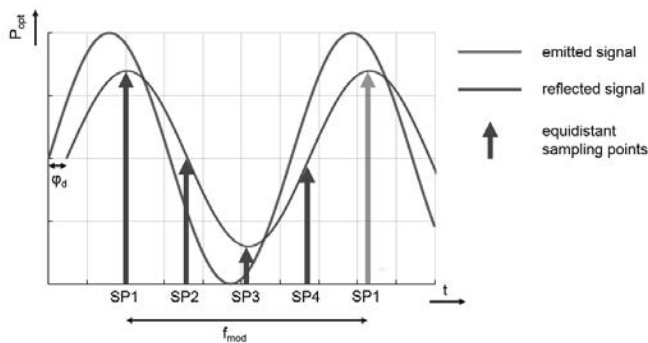


Bild 1: Abhängig von der Objektentfernung ändert sich die Phasendifferenz zwischen emittiertem und reflektiertem Modulationssignal. Optische Verluste verkleinern die Amplitude des reflektierten Signals.

Superresolution

Eine Auflösungssteigerung der PMD-Sensoren durch Verkleinerung der Pixelflächen ist ungeeignet, weil dadurch weniger Licht auf einzelne Pixel fällt und das Signal-Rausch-Verhältnis abnimmt. Als Folge kann das Nutzsignal vom Umgebungslicht nicht unterschieden werden. Eine Vergrößerung der Sensorfläche führt zu einem Kostenanstieg, da die abbildende Optik entsprechend skaliert werden muss.

Eine kostengünstige Lösung bietet die virtuelle Auflösungserhöhung durch den Einsatz von SR-Algorithmen. Diese erhöhen die laterale Abtastrate durch Einbringen zusätzlicher Stützstellen. Während Singleframeverfahren diese Stützstellen lediglich interpolieren, erzeugen Multiframeverfahren zusätzliche „reale“ Stützstellen durch sequentielle Mehrfachaufnahmen. Jede Einzelaufnahme einer Bildfolge ist dabei um einen Bruchteil der Pixelabmessung relativ zueinander verschoben. Die ortsgenaue Überlagerung dieser Einzelaufnahmen erhöht die Informationsdichte im SR-Ergebnis.

Multiframeverfahren können in zwei Ansätze unterteilt werden: bekannter und unbekannter Subpixelversatz. Methoden, die nach einem willkürlichen Subpixelversatz arbeiten, benötigen einen zusätzlichen Algorithmus zur Abschätzung des Versatzes. Beim bekannten Subpixelversatz werden in der Regel bessere SR-Ergebnisse erzielt, da der Versatz genauer bekannt ist. Nach Vandewalle [4] führt die Interpolation eines niedrig aufgelösten Bildes zu besseren Ergebnissen als die SR-Überlagerung einer Bildfolge mit ungenauen Bewegungsparametern.

2. Bedeutung der Auflösungssteigerung für die Fahrzeugtechnik

Bei der Fahrerassistenz spielt die Objekterkennung eine wesentliche Rolle. Umfeldsensoren wie Radar oder Ultraschall überwachen den Sicherheitsabstand zum Vorherfahrenden und erleichtern das Einparken. Zusätzliche optische Systeme erkennen Verkehrszeichen oder Objekte, die sich im Bewegungsradius des Fahrzeugs befinden. Einen Schritt weiter geht das autonome Fahren, das ein Fahrzeug ohne menschlichen Einfluss sicher im Straßenverkehr bewegt. Hierzu sind hohe Anforderungen an die Umgebungsüberwachung gestellt und oftmals bilden optische Systeme Schlüsseltechnologien dafür.

PMD-Kameras bieten ein großes Einsatzpotenzial, da sie mehrere Assistenzsysteme vereinen können. Neben der Reflektanz unterschiedlicher Objektoberflächen, messen sie zusätzlich deren Entfernung zum Fahrzeug pixelweise. Als Ausgabedaten ergeben sich Intensitäts- oder Amplitudenbilder und Entfernungsbilder. Wegen der Nutzung einer aktiven Beleuchtung im nahen IR, sind Messungen bei Tag und Nacht gleichermaßen möglich. Mit einer erhöhten lateralen Auflösung, lassen sich Objekte besser klassifizieren und es erschließen sich neue Anwendungsbereiche für PMD-Kameras bei der Überwachung des Fahrzeugumfeldes.

Eine sicherheitsrelevante Fahrerassistenz ist die Kollisionsvermeidung. Objekte, die sich im Bewegungsradius des Fahrzeugs befinden, können eine Kollisionsgefahr darstellen. Abhängig von Größe und Beschaffenheit des Objekts variiert das Gefahrenpotenzial für Fahrzeug und Insassen. Eine präzise Bestimmung von dessen räumlicher Ausdehnung, Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit ist für die Ermittlung des Gefahrenpotenzials entscheidend. Nur für eindeutig erkannte Objekte ist eine Klassifizierung möglich. Liegen Objektgrößen unterhalb der Auflösungsgrenze des optischen Systems, werden diese nicht oder zu spät erkannt.

Die Verkehrszeichenerkennung erhöht sowohl die Sicherheit als auch den Fahrkomfort. Hier sind die Amplitudendaten von übergeordneter Bedeutung. Sie resultieren aus dem Reflexionsverhalten der Objektoberfläche und können beispielsweise Auskunft über Form und Beschriftung eines Verkehrszeichens geben. Mit Größenordnungen um die 50 cm sind die Objektanmessungen von Verkehrszeichen eher gering. Darin enthaltene Buchstaben und Symbole sind nochmals bedeutend kleiner, so dass hohe Anforderungen an das Auflösungsvermögen der Kamera gestellt sind.

3. Methoden

Die vorliegende Arbeit vergleicht 4 aus der zweidimensionalen Bilderfassung bekannte SR-Algorithmen hinsichtlich einem Einsatz in der Fahrzeugtechnik. Wie bereits in der Einführung erläutert, lässt sich das Auflösungsvermögen eines optischen Systems durch Anwendung

von SR-Algorithmen erhöhen. In [5] werden 9 niedrig aufgelöste Amplitudenbilder, nach dem Multiframeverfahren mit bekanntem Subpixel-Versatz, zu einem hochaufgelösten SR-Bild überlagert. Bei der verwendeten PMD-Kamera handelt es sich um den Mobile-3D-Sensor „O3M150“ von der ifm electronics GmbH. Folgende SR-Algorithmen werden in [5] hinsichtlich Auflösungssteigerung und Qualität der SR-Ergebnisse untersucht:

- Bikubische Interpolation (Int)
- Iterated back projection (IBP), nach Irani et al. [6]
- Robust SR (RSR), nach Zomet et al. [7]
- Structure adaptive normalized convolution (StrAdNC), nach Pham et al. [8]

Das Auflösungsvermögen in LP/mm dient als Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen.

Ermittlung auflösbarer Objektgrößen

Zur Bestimmung der minimalen Gegenstandsgröße wird angenommen, dass ein Objekt zuverlässig erkannt wird, sobald es einen Pixel vollständig abdeckt. Des Weiteren wird die geometrische Sensorauflösung als Auflösungsgrenze des gesamten optischen Systems angenommen. Anhand der Pixelbreite erfolgt die Ermittlung der kleinstmöglich auflösbaren Objektbreite in 50 m Entfernung.

Die theoretische, räumliche Auflösungsgrenze f_{grenz} eines digitalen Bildsensors in horizontaler Richtung steht in direktem Zusammenhang zur Pixelbreite b , wie Gleichung 2 aufzeigt:

$$f_{\text{grenz}} = \frac{1}{2 \cdot b} \left[\frac{\text{LP}}{\text{mm}} \right] \quad (2)$$

Der Faktor 2 ergibt sich aus der Angabe des Auflösungsvermögens in Linienpaaren pro Millimeter (LP/mm). Ein Linienpaar besteht aus einer schwarzen und einer weißen Linie, die jeweils eine Pixelreihe oder -spalte vollständig abdeckt. Folglich entspricht die Pixelbreite b einer Linie oder einem halben Linienpaar. Aus Gleichung 2 lässt sich mit bekanntem Auflösungsvermögen in LP/mm die zugehörige, theoretische Pixelgröße berechnen.

Durch Projektion lässt sich aus der Bildgröße y' (entspricht Pixelbreite b) in der Bildebene und dem Abbildungsmaßstab β' der Optik die zugehörige Objektgröße y (entspricht Objektgröße B) in der Gegenstandsebene bestimmen.

Aus der allgemeinen Abbildungsgleichung $\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}$ und dem Abbildungsmaßstab $\beta' = \frac{a'}{a} = \frac{y'}{y}$ nach Schröder [9] lässt sich der Vergrößerungsfaktor β' in Abhängigkeit der Gegenstandsweite a gemäß Gleichung 3 berechnen.

$$\beta' = \frac{f'}{a + f'} \quad (3)$$

Die in die Objektebene projizierte Gegenstandsgröße y (Pixelbreite B) ergibt sich nach Gleichung 4 aus der Bildgröße y' und dem Abbildungsmaßstab β' zu:

$$y = \frac{y'}{\beta'} \tag{4}$$

Für sämtliche Berechnungen sind die Vorzeichenkonventionen der geometrischen Optik zu beachten.

4. Daten

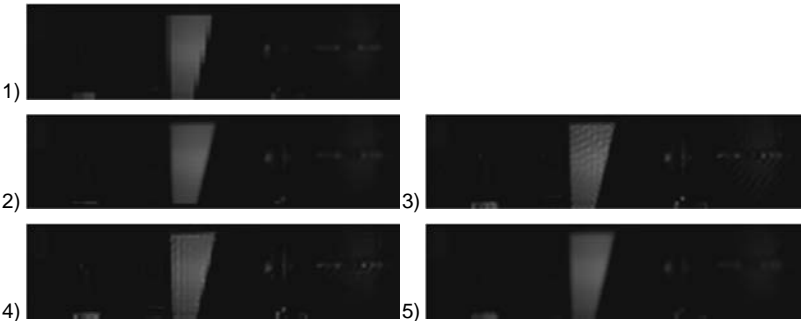


Bild 2: Amplitudenbilder der Objektszene. 1) Ursprungsbild, keine SR; 2) bikubische Interpolation; 3) iterated back projection; 4) robust SR und 5) structure adaptive normalized convolution.

Tabelle 1: Vergleich der SR-Algorithmen hinsichtlich ihres Auflösungsvermögens, ihrer theoretischen Pixelbreite b und der projizierten Pixelbreite B in 50 m Entfernung.

SR-Algorithmus	SFR-Ausgabewert bei einem Kontrast von 10%	Theoretische Pixelbreite b	Objektgröße B in 50 m Entfernung
Ursprungsbild, keine SR	SFR = 2,3 LP/mm	218 μ m	1,31 m
Int	SFR = 6,1 LP/mm	82 μ m	0,49 m
IBP	SFR = 7,3 LP/mm	69 μ m	0,42 m
RSR	SFR = 8,7 LP/mm	58 μ m	0,35 m
StrAdNC	SFR = 5,3 LP/mm	94 μ m	0,57 m

5. Ergebnisse

Die Gegenüberstellung der Amplitudenbilder in Bild 2 zeigt für alle vier SR-Algorithmen eine deutliche Auflösungssteigerung. Erscheint die schräge Kante im ursprünglichen LR-Bild noch stark stufenförmig, verläuft sie in den SR-Ergebnissen deutlich schärfer abgegrenzt. Wie bereits in [5] beschrieben, werden mittelwertbildende und kantenverstärkende SR-Algorithmen unterschieden. Mittelwertbildende Algorithmen (Int und StrAdNC) führen zu einem homogenen Gesamteindruck, allerdings erscheinen Kontrastübergänge verwaschen. Kantenverstärkende Algorithmen (IBP und RSR) bilden Kontrastübergänge schärfer ab, erzeugen jedoch Artefakte im SR-Ergebnis.

Tabelle 1 stellt die räumliche Frequenzantwort (SFR), die theoretische Pixelbreite b und die projizierte Pixelbreite B in 50 m Entfernung gegenüber. Der objektive Vergleich aus Tabelle 1 bestätigt den subjektiven Eindruck aus Bild 2. Das Auflösungsvermögen einer PMD-Kamera lässt sich mit Hilfe von SR-Algorithmen erhöhen. Das Auflösungsvermögen steigt von ursprünglichen 2,3 LP/mm auf maximal 8,7 LP/mm für den RSR-Algorithmus. Damit kann das ursprüngliche System in 50 m Entfernung Objekte mit einer Breite von 1,31 m auflösen. Nach Anwendung des RSR-Algorithmus schrumpft diese auf 0,35 m. Dies entspricht einer Verkleinerung der physikalisch vorgegebenen Pixelgröße von 218 μm auf eine virtuelle Pixelgröße von 58 μm .

6. Diskussion

Die Auflösungssteigerung verbessert die Objekterkennung signifikant. Das ursprüngliche Kamera-Setup kann in 50 m Entfernung Objekte in der Größenordnung von PKW klassifizieren. Nach Anwendung der RSR können auch schmale Objekte in der Größenordnung von Fahrrädern und Personen detektiert werden. Für die Verkehrszeichenerkennung ist das erzielte Auflösungsvermögen jedoch noch nicht ausreichend. Im besten Fall lässt sich die Form des Verkehrszeichens ermitteln, darin enthaltene Symbole oder Schriften können jedoch nicht aufgelöst werden.

Die Ergebnisse kantenverstärkender SR-Algorithmen zeigen deutlich ausgeprägte Artefakte, die während dem SR-Prozess entstehen. Für die Objekterkennung stellt das vermutlich kein Problem dar, da Kanten dennoch deutlich zu erkennen sind. Die glättende Wirkung der mittelwertbildenden Algorithmen ergibt für das menschliche Auge ein angenehmeres Ergebnis, jedoch werden Kanten verbreitert und die Auflösungssteigerung fällt geringer aus. Daher eignen sich für die Objekterkennung kantenverstärkende SR-Algorithmen besser.

7. Zusammenfassung

Mit der Adaption von, aus der zweidimensionalen Bilderfassung bekannten, SR-Algorithmen lässt sich auch das laterale Auflösungsvermögen von PMD-Kameras deutlich steigern. Der Vergleich von 4 SR-Algorithmen aus dem Ortsbereich zeigt für die robust SR nach Zomet et al. die besten Ergebnisse. Mit Überlagerung von 9 Einzelbildern lassen sich um den Faktor 3,8 kleinere Objekte auflösen. Das bedeutet, dass sich in 50 m Entfernung Objekte mit einer Breite von 0,35 m erfassen lassen können. Dies verbessert die Objekterkennung signifikant und eröffnet neue Möglichkeiten bei der Objektklassifizierung.

Die Ergebnisse dieser Arbeit entstanden innerhalb des Forschungsprojekts „Superresolution 3D-Kamera“, das im Rahmen der innovativen Projekte vom Land Baden-Württemberg gefördert wird. Es beinhaltet Untersuchungen zur Auflösungssteigerung von PMD-Kameras durch den Einsatz von Superresolution-Algorithmen.

8. Literaturangaben

- [1] Heinol, H. G.: Untersuchung und Entwicklung von modulationslaufzeitbasierten 3D-Sichtsystemen,“ Universität Siegen Diss. 2001
- [2] Schmidt, M.: Analysis, Modeling and Dynamic Optimization of 3D Time-of-Flight Imaging Systems. University Heidelberg Diss. 2011
- [3] Lange, R.: 3D Time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology. Universität Siegen Diss. 2000
- [4] Vandewalle, P, Süsstrunk, S. u. Vetterli, M.: A frequency domain approach to registration of aliased images with application to super-resolution. EURASIP Journal on Applied Signal Processing (2006) S. 1-14
- [5] Lietz, H. u. Eberhardt, J.: Super-resolution PMD camera for applied metrology. Proc. SPIE 9751 (bevorstehende Veröffentlichung 2016)
- [6] Irani, M. u. Peleg, S.: Improving Resolution by Image Registration. CVGIP: Graphical Models and Image Processing 53 (1991) S. 231-239
- [7] Zomet, A., Rav-Acha, A. u. Peleg, S.: Robust Super-Resolution. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference 1 (2001) S. 645-650
- [8] Pham, T. Q., van Vliet, L. J. u. Schutte, K.: Robust Fusion of Irregularly Sampled Data Using Adaptive Normalized Convolution. EURASIP Journal on Applied Signal Processing (2006) S. 1-12
- [9] Schröder, G.: Technische Optik. Würzburg: Vogel 1990

Aktives Ausrichten für Kameras in der Fahrzeugtechnik Klebstoffe für hochgenaues Ausrichten von Komponenten mit großen Produktionsstückzahlen

Active Alignment for Automotive Cameras Adhesives for high precision alignment of components for high UPH processes

B. Eng **Maximilian Baum**,
DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA, Windach

Abstract

Requirements in optical performance of mobile and automotive cameras modules (e.g. for rear view or sign recognition) are becoming higher and in an increasing demand in functionality, more and more modules must use new techniques for a more precise positioning during the assembly processes.

To achieve a very accurate placement of lenses, as well as sensor chips, two main strategies are in use in today's high-end mass productions: active and passive alignment. The adhesives have to be optimized for either of these processes, depending on the final ability of the optical component and the sensor chip to be actively switched on during the bonding process or just being hold in place by the pick and place equipment.

While passive alignment achieves around $3\sigma \pm 25 \mu\text{m}$, the alignment accuracy of high end cameras with an active alignment process can reach $3\sigma < \pm 5 \mu\text{m}$ (XYZ) and a tilt accuracy of ± 0.1 deg. For high throughput, adhesives need to have very short tack times, with high bond strength and survive extreme reliability requirements like in automotive applications after final cure.

1. Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik

Um den Fahrer eines Fahrzeuges bei Fahrt oder während des Einparkens zu unterstützen, werden in der Fahrzeugtechnik mehr und mehr Kameras eingesetzt. Bild 1 zeigt exemplarisch, wo überall schon heute Kameras im Fahrzeug Verwendung finden:

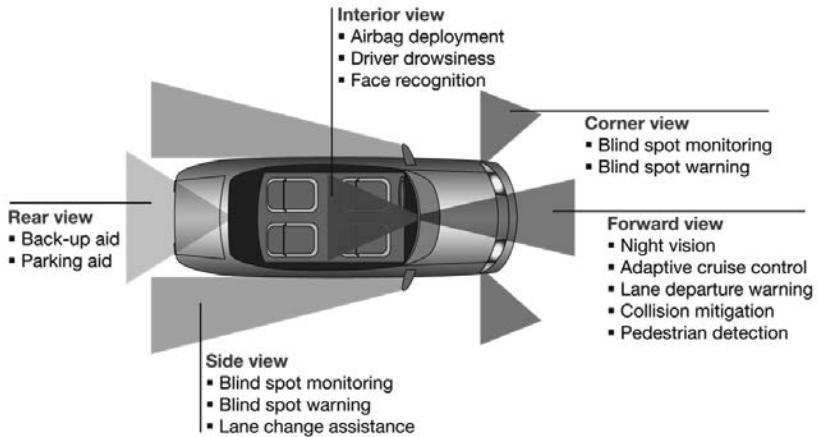


Bild 1: Kameras im Automotive-Bereich

Durch die steigenden Anforderungen an die Auflösung und die Funktionalität von optisch aktiven Modulen (z.B. bei der Schilderererkennung) wird auch das Ausrichten der optischen Komponenten immer wichtiger. Insbesondere bei sicherheitsrelevanten Bauteilen wie der nach vorne gerichteten Kamera, die auch zur Kollisionsvermeidung und zur Fußgängererkennung eingesetzt wird, ist eine gleichbleibende und hohe Qualität der eingebauten Komponenten notwendig.

Neben den bereits von Rückfahrkameras bekannten Monokameras kommen im nach vorne gerichteten Bereich immer häufiger Stereokameras zum Einsatz, um nicht nur reine Bildinformationen vom Geschehen vor dem Fahrer zu erhalten, sondern auch Tiefeninformationen verarbeiten zu können. So lässt sich beispielsweise errechnen, ob bei der Kombination aus der gemessenen Entfernung zum vorausfahrenden Fahrzeug, dessen Geschwindigkeit und der eigenen Geschwindigkeit ein Bremsvorgang eingeleitet werden sollte. Die hier gewonnenen Informationen können wiederum einem Steuergerät zur Verfügung gestellt werden, welches einen Aktor an der Bremse ansteuert.

Diese Technologien werden üblicherweise in Oberklassemodellen der Fahrzeughersteller eingeführt und nach und nach in die Mittelklassemodelle übernommen.

2. Widerspruch zwischen Performance und Herstellkosten

Beim Verbreitern der Technologie auf die mittleren und kleineren Fahrzeugklassen werden auch die im Zuge der Kosteneinsparung zu erzielenden Herstellkosten reduziert. Das wird einerseits über die Massenproduktion und die Kostensenkung durch einen höheren Automatisierungsgrad erreicht, andererseits durch größer werdender Toleranzen der einzelnen Komponenten.

Insbesondere bei den optischen Komponenten hat ein Vergrößern der Herstelltoleranzen eine deutlich niedrigere Qualität zur Folge. Deshalb muss im Produktionsprozess eine Möglichkeit vorgehalten werden, etwaige Produktionstoleranzen wieder ausgleichen zu können. An dieser Stelle kommt das aktive Ausrichten der einzelnen Komponenten in den Produktionsprozess: Bildfeldwölbung, Verkippung der optischen Achse zur mechanischen Achse und im kleinen Rahmen auch Verzeichnung können über ein Ausrichten der Optik zum Sensor ausgeglichen werden.

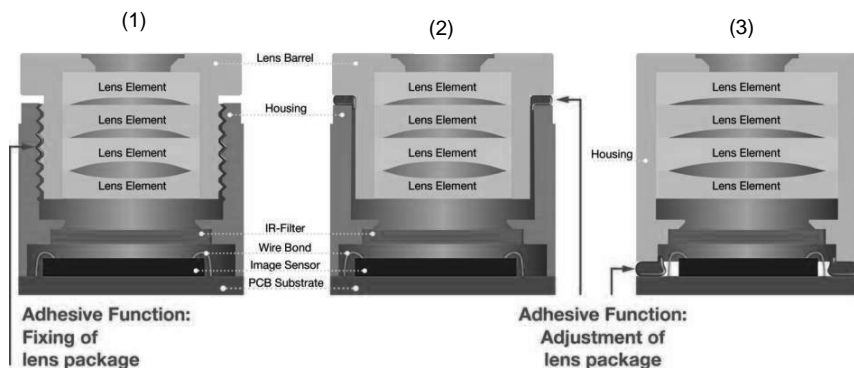


Bild 2: geschraubtes Objektiv(1), aktiv ausgerichtetes Objektiv (2) & (3)

1. Wie in Bild 2 gezeigt, wird zuerst der Klebstoff dosiert, je nach Design entweder auf die PCB oder auf das Gehäuse. Üblicherweise kommen hier Volumendispenser zum Einsatz, um das verwendete Klebstoffvolumen konstant zu halten.
2. Danach wird das Objektiv auf die Klebstoffraupe gesetzt und mit Hilfe von Objekterkennung und Live-Kontrastmessung aktiv zum Sensor ausgerichtet. Hierzu wird der Sensor im Vorhinein aktiv geschaltet und die Bilddaten ausgewertet, meist unter Hinzunahme von MTF-Messungen.

3. Nach der erfolgreichen Ausrichtung wird der Klebstoff kurz mit Licht fixiert, um die Maschine möglichst schnell wieder frei zu bekommen und einen hohen Durchsatz zu erzielen. [2]
4. Ein Warmhärtungsschritt stellt schließlich die Endfestigkeit und Zuverlässigkeit sicher. Da die optischen Komponenten nicht durch zu große Hitze beschädigt werden dürfen, sind niedrige Temperaturen (ca. 80°C) notwendig.

Der Ablauf beim aktiven Ausrichten sieht schematisch wie folgt aus:

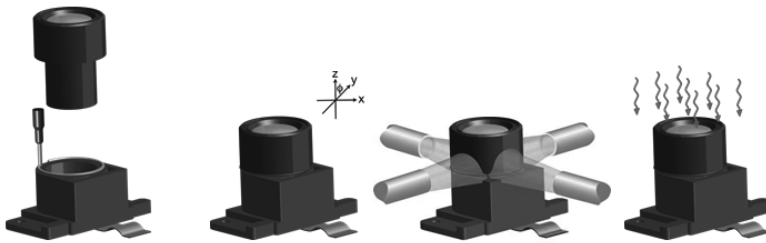


Bild 3: Prozess des aktiven Ausrichtens von Objektiv zu Sensor [1]

Nach dem Warmhärteschritt ist der Klebstoff sowohl in den Schattenzonen als auch in den nicht von Licht anfixierten Bereichen ausgehärtet. Die optische Performance bleibt durch die nur gering ausgasenden und nicht kondensierenden Bestandteile des Klebstoffes über den kompletten Lebenszyklus der Kamera erhalten.

Darüber hinaus ist es wichtig, dass die Optik auch unter steigender Beanspruchung wie hohen Temperaturunterschieden oder äußeren Einflüssen in der fixierten Position verbleibt. Daher werden die Klebstoffe auch in Umwelttests in ihrer Haftung und im dynamischen Verhalten geprüft und bestätigt.

Die zu erreichenden Genauigkeiten liegen je nach Designansatz bei $3\sigma < \pm 5\mu\text{m}$ (XYZ) und gewähren eine Verkippungsstabilität von $\pm 0.1^\circ$. Gleichzeitig erreicht der Klebstoff die gewünschten geringen Taktzeiten sowie hohe Verbundfestigkeiten und erfüllt noch weitere extreme Zuverlässigkeitsanforderungen.

3. Über DELO Industrie Klebstoffe

DELO Industrie Klebstoffe ist ein führender Hersteller von Industrieklebstoffen mit Sitz in Windach bei München und Tochterunternehmen in den USA, China und Singapur. Mit seinen 500 Mitarbeitern erwirtschaftet das Unternehmen einen Umsatz von 80 Mio. Euro. Es entwickelt maßgeschneiderte Spezialklebstoffe und Gerätesysteme für High-Tech-Branchen – vom Automobilsektor und der Luftfahrt über die Optoelektronik bis hin zur Elektronikindustrie.

DELO bietet eine breite Auswahl an Klebstoffen für Anwendungen in Automotive-Kameras, von Active Aligment-Klebstoffe mit niedrigstem Schrumpf und geringer Ausgasung bis hin zu Klebstoffen für IR-Filter Verklebungen, um lichtdichte Verklebungen prozesssicher zu realisieren.

4. Kontakt

B. Eng. Maximilian Baum
Product Manger Camera Adhesives



DELO-Allee 1
86949 Windach
Tel.: +49 8193 9900-686
Fax.: +49 8193 9900-5686
Mobil: +49 171 261 3576
E-Mail: Maximilian.Baum@DELO.de

www.DELO.de

5. Literaturangaben

- [1] Video zu Active Alignment: <https://youtu.be/atnFHdTJxuw>
- [2] Patent: US8786713B1

Auslegung von Lichtassistenzfunktionen mittels einer Simulations- und Messumgebung

Design of Lighting Assistance Functions by means of an Environment for Simulation and Measurements

Dipl.-Ing. **Carsten Simon**, Dr.-Ing. **Matthias Butenuth**,
Karsten Schulze, IAV GmbH, Chemnitz & München

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die Auslegung neuer Lichtassistenzfunktionen (LAF) im Front- und Heckbereich am Beispiel eines innovativen markierenden Lichts und einer intelligenten Heckleuchte vorgestellt. Dabei wird sich auf einen zukunftsweisenden szenenbasierten Entwicklungsprozess mit abgeleiteten Werkzeugen bezogen, welcher auch für andere sicherheitskritische Assistenzsysteme geeignet ist. Das Design der LAF wird in der Konzeptphase begonnen und bis zum Aufbau von Demonstratoren beschrieben.

Abstract

This paper shows the design of new front and rear lighting assistance functions (LAF) using the example of an innovative marker light and a smart taillight. The process is realized with a trendsetting scene based development process with its derived tools, which is applicable for other safety critical driver assistance systems too. The design of the LAF begins with the concept phase and leads to the buildup of demonstrators.

1. Szenenbasierter Entwicklungsprozess

Lichtassistentz ist ein relativ neuer Bereich innerhalb der Fahrerassistenzsysteme. Vorherrschende Serienprodukte konzentrieren sich auf die Reduzierung von Blendung über die Maskierung oder Herabsetzung des Fernlichtes unter Nutzung einer Grauwertkamera zur Erkennung relevanter Objekte. Einige höher entwickelte Seriensysteme der Ober- und Luxusklasse verfügen über kontextbasierte Lichtverteilungen oder die Möglichkeit, Objekte gezielt hervorzuheben. Mit der Verbreitung von immer leistungsfähigeren Lichtaktoren wie dem Matrix Beam oder dem zukünftigen DMD-Pixellicht, wird eine vollständig variable Lichtverteilung ermöglicht. Diese Entwicklung schafft die Basis für innovative Lichtassistentzsysteme, die den Lichtaktor als zusätzliche Mensch-Maschine-Schnittstelle für Fahrer und Verkehrs-

teilnehmer nutzen können. Die Assistenzfunktionen werden sich zusammen mit den zugehörigen Akteuren stetig weiter entwickeln und in Zukunft eine neuartige Entwicklungsumgebung benötigen. Diese sollte von der Entwicklung zukünftiger Fahrerassistenzsysteme inspiriert sein und die gleichen Qualitätsstandards erreichen [1].

Der szenenbasierte Designprozess [2] startet mit der Spezifikation für das Wunschverhalten der Funktion. Dieser erste Schritt, als Ergänzung des Lastenheftes, wird mit der Simulations-Software *IAV SceneSuite* umgesetzt. Das Ergebnis sind verschiedene Visualisierungen der Fragestellung und abgeleiteter Anforderungen im HTML-Format. Abschließend werden funktionale Anforderungen an Sensorik und Aktorik anhand dieser Szenen abgeleitet, um einen ersten Satz von virtuellen Prototypen definieren zu können. Der Algorithmus der Lichtassistenzfunktion kann mit dem Szenenkatalog prototypisch erstellt und im Software-in-the-Loop Verfahren unter Mithilfe der virtuellen Sensoren und Akteuren getestet werden. Das virtuelle Systemabbild kann dabei beliebig verfeinert werden, wenn es für Spezifikation oder Test notwendig ist. Im nächsten Schritt folgt der prototypische Aufbau, hierbei kommt die Entwicklungsumgebung *IAV Licht- & Fahrerassistenzhalle* zum Einsatz [Bild 2]. Dort kann im Hardware-in-the-Loop Verfahren ein Demonstrator oder das ganze Fahrzeug im Hinblick auf Lichtassistenzfunktionen analysiert werden. Als Grundlage dienen erneut die Szenen, welche das Prüfobjekt mittels Restbussimulation und einer LED-Videowand stimulieren und eine weitestgehend automatisierte Analyse der Systemgrenzen erlauben.

2. Anforderungsanalyse und Konzepterstellung mit *IAV Scene Suite*

Virtuelle Umgebungen sind im Bereich der Funktionsentwicklung vom Design bis zum Test verbreitet und entwickeln sich zur Steigerung der Qualität und Effizienz stetig weiter. Die Anforderungsanalyse hingegen erfolgt auch heute noch unter Zuhilfenahme von textuellen Lastenheften. Ein neuer Ansatz ist die Nutzung einer virtuellen Umgebung *IAV Scene Suite* zur szenenbasierten Anforderungsanalyse, um einen Top-Down Ansatz in der Spezifikation von der Funktionalität hin zur Komponente zu gewährleisten. Mit der Erweiterung LiGhtS [Bild 1] ist es möglich synthetische und gemessene Lichtverteilungen direkt in die Szenen einzubetten. Die Lichtverteilung kann in jeder beliebigen Position horizontal oder vertikal dargestellt werden, da ein 3D Modell die 2D Repräsentation berechnet. Dies erlaubt die Ausgabe einer Bodenlichtverteilung, oder auch die Lichtstärke auf Augenhöhe, um beispielsweise Blendung von Fußgängern zu analysieren. Die vertikale Ansicht ist für Maskierung und Markierung von Objekten sinnvoll.

Der Prozess zur Erstellung der notwendigen Szenen gliedert sich in mindestens drei Schritte. Der erste Schritt ist die Problemformulierung mit sogenannten Basisszenen in denen Use-

cases und Misusecases gesammelt werden. Das virtuelle Abbild der Umwelt umfasst nicht die zu entwickelnde Funktion selbst. Dies bedeutet zum Beispiel bei der Entwicklung eines Fernlichtassistenten, dass kein Abblenden in den Szenen erfolgt, jedoch andere Funktionen, wie ein Kurvenlicht, gewohnt agieren. Auf Grundlage dieser Szenen wird als zweiter Schritt die Spezifikation der Funktion erstellt und mit zeitlich gesetzten Specicons [Bild 1] visualisiert. Die Szenen dienen auch zur Ableitung anderer Anforderungen, wie der Scheinwerfauflösung oder nötiger Sensorsichtfelder. Zum Erreichen einer großen Robustheit, ist der letzte Schritt eine Szenenvariation der Basisszenen durch Modifikation funktionsrelevanter Parameter. Dieser Katalog wird im weiteren Verlauf im Closed-Loop Verfahren als Testfallkatalog genutzt, was eine optimale Testabdeckung und Verfolgbarkeit der Anforderungen garantiert. Das resultierende Funktionsverhalten wird dabei zur Auswertung mit den Specicons verglichen. Die Szenen inklusive Specicons und funktionaler Reaktion werden direkt mit den abgeleiteten Anforderungen zur Visualisierung dieser verknüpft. Dies ermöglicht die Nutzung der Spezifikation von diversen Domänen entlang des Entwicklungsprozesses.

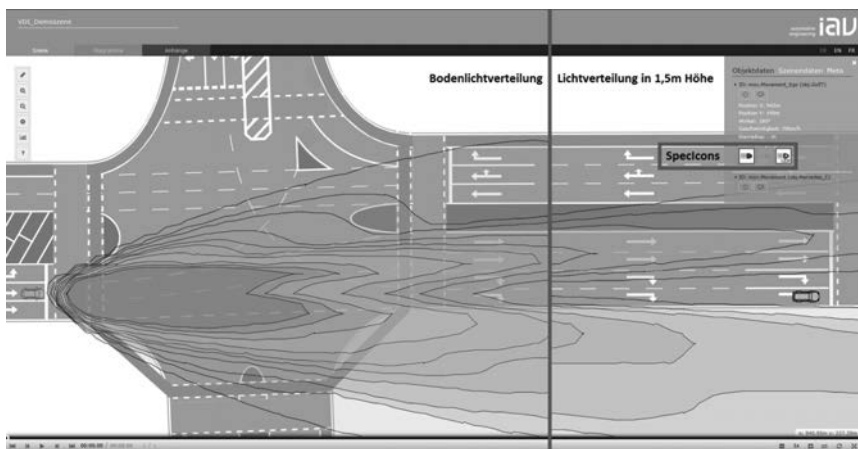


Bild 1: SceneSuite Szene zeigt maskiertes Dauerfernlicht eines Matrix Beams

Für die zwei LAF wurden Szenen im Stadt- und Überlandgebiet mit unterschiedlichen Objekten und Fragestellungen erstellt. Anhand dieser wurden Spezifikationen von Objektklassen, Gefahrenklassen, Sensoren, Aktoren sowie abgeleiteten Systemreaktionen erstellt. Die szenenbasierte Problemformulierung führte zu vielfältigen Lösungsansätzen für jede Fragestel-

lung, da über die visuelle Darstellung unkompliziert domänenübergreifend Experten befragt werden konnten.

Grundsätzlich werden für das markierende Licht drei Objektkategorien benötigt. Fahrzeuge stellen die erste Klasse dar. Funktionen aus dieser Kategorie sind beispielsweise die Markierung von Ausweichpfaden oder unbeleuchteten Fahrzeugen. Die zweite Kategorie stellen statische Objekte dar. Hier sind Funktionen wie die Markierung von Verkehrszeichen, Straßeneinmündungen und Unfallfahrzeugen zu nennen. Die dritte Kategorie stellen verletzte Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Radfahrer dar. Die Funktionsideen sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Tabelle 1: Auszug aus dem Funktionsumfang des markierenden Lichts.

	Geringe Gefahr (Subjekt hat genügenden Abstand zur Straße)	Mittlere Gefahr (Subjekt nah der Straße)	Große Gefahr (Subjekt nah oder auf der Straße und bewegt sich auf Fahrzeug zu)	Kritische Gefahr (Subjekt im Fahr- schlauch)
Fußgänger	Untere 20% dynamische Schraffur 45°	Untere 50% dynamische Schraffur 45°	Untere 90% Schraffur in Rich- tung der Bewe- gung	100% blinkende Vollmarkierung und Bewegungskorridor
Kind	Untere 50% dynamische Schraffur 45°	Untere 50% dynamische Schraffur 45°	100% blinkende Vollmarkierung	100% blinkende Vollmarkierung und Bewegungskorridor
Gruppe	Umrandung	Umrandung	Wie Fußgänger	Wie Fußgänger
Verdeckter Fußgänger	Keine Reaktion	Haltelinie für Subjekt	Haltelinie und blinkende Voll- markierung	Wie Fußgänger
Fahrradfahrer	Untere 20% voll beleuchtet	Untere 50% voll beleuchtet	Untere 90% voll beleuchtet	100% blinkende Vollmarkierung und Bewegungskorridor

Die intelligente Heckleuchte umfasst Funktionen für den rückwärtigen Verkehr, welche die-
sen auf Eigenschaften des Egofahrzeuges oder verdeckte Gefahren hinweisen. Es wurden
drei Prototypen aufgebaut, um die Potentiale bzw. Degradation der Funktionen auf verschie-
dener Hardware zu bewerten. Neben einer modifizierten Serienrückleuchte, kommt ein dy-

namisches Spiegeltunnel- [Bild 3.2] und Pixelrücklicht [Bild 3.3] mit einer Auflösung von maximal 16x40 Pixeln (1 Pixel/cm²) zum Einsatz.

Tabelle 2: Auszug aus dem Funktionsumfang der intelligenten Heckleuchte.

Funktion	Beschreibung
Movement-Assist	Visualisiert Längs- und Querbewegung des Fahrzeuges
Inform-Assist	Visualisiert Hinweise und Gefahren vor dem Fahrzeug
Rear-Assist	Visualisiert Maß des Kollisionszeitpunkt
Drive-Mode-Assist	Visualisiert gewählten Fahrmodus
Safety-First-Assist	Visualisiert eine vorsichtige Fahrweise (manuelle Aktivierung)
Thank-You-Assist	Visualisiert positive Rückmeldung (manuelle Aktivierung)

Nicht jede Funktionalität kann auf jedem Demonstrator sinnvoll umgesetzt werden, weshalb zur Bewertung von Intuition und Nutzwert eine Nutzerstudie durchgeführt wurde. Ergebnisse der Studie sind, dass ein Pixelrücklicht in nahezu jeder Funktion die beste Lösung darstellt und LAF im Heckbereich Informationen zur Kollisionsvermeidung übertragen können. Der dynamische Spiegeltunnel ist intuitiv bei der Beschleunigungsdarstellung über Kippen des Tunnels hin zur resultierenden Beschleunigung [Bild 3.2].

4. Closed-Loop Optimierung der Demonstratoren

Die entwickelten Algorithmen wurden zunächst mit *Scene Suite Connect* über den Szenenkatalog im Closed-Loop Verfahren getestet und optimiert [3]. Anschließend erfolgte der Hardwareaufbau unter Nutzung der *Licht- & Fahrerassistenzhalle* [Bild 2]. Die drei intelligenten Heckleuchten wurden als portable Demonstratoren aufgebaut. Die Stimulation der Funktionen erfolgt aus den Szenen bzw. darin nachgebildeten virtuellen Sensoren [Bild 2]. Bei der Einbindung einer Kamera in das Testsystem ist es möglich eine LED-Videowand zur Stimulation zu nutzen.

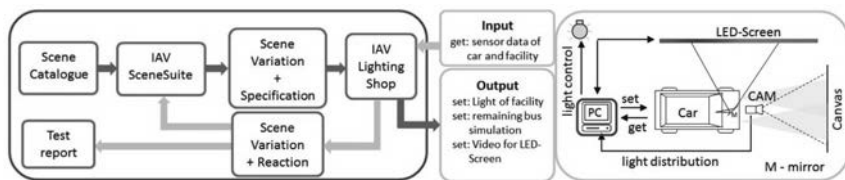


Bild 2: Schematischer Testaufbau eines Lichtsystems in der Licht- & Fahrerassistenzhalle

Das markierende Licht [Bild 3.1] zeigt die Lichtverteilung auf einem Messschirm, welche optisch von der LED-Videowand entkoppelt ist. Daher sind die Umgebung und das markierte Objekt, welche auf der LED-Videowand abgebildet werden, nicht sichtbar. In dieser Szene werden Fußgänger in drei Gefahrenstufen (v.l.n.r. gering, kritisch, mittel) dargestellt. Eine Serienabbildlichtverteilung wird emuliert und dient als Referenz zur Ermittlung des Nutzwertes. Das mittlere Bild [Bild 3.2] zeigt den Spiegeltunnel-Demonstrator mit aktivem Movement-Assist. In dieser Szene befindet sich das Fahrzeug in einer Linkskurve. Über die virtuelle Messung von Lenkwinkel, Beschleunigung und Geschwindigkeit wird die Bewegung des Fahrzeuges intuitiv visualisiert. Die Beschleunigung des Fahrzeuges wird auf dem Pixellichtdemonstrator [Bild 3.3] über drei Linien dargestellt, welche sich über den Wert der Fahrpedalstellung zu einem Pfeil formen. Dargestellt ist die maximal mögliche Beschleunigung des Fahrzeuges.

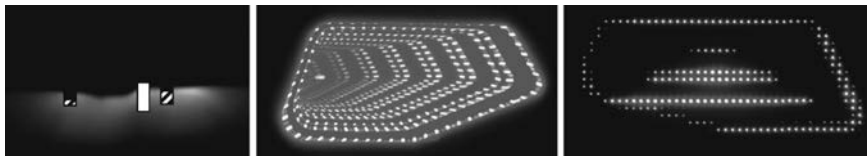


Bild 3: (1) – Markierendes Licht für Fußgänger verschiedener Gefahrenstufen: (2) – Spiegeltunnel Rücklicht zeigt Fahrzeugbewegung nach links: (3) – Pixelrücklicht zeigt Beschleunigung

Mit der Entwicklung von LAF im Front- und Heckbereich konnten nicht nur die Funktionen an sich evaluiert werden, sondern auch die zugehörige Prozesskette und deren Entwicklungswerkzeuge. Ein zukünftiger Entwicklungsschritt ist eine Fahrzeugintegration der Demonstratoren mit zugehöriger Sensordatenverarbeitung zur Stimulation der LAF im realen Straßenverkehr.

- [1] Schonlau, B., Schulze, K., Dr. Butenuth, M.: Automatisierte Closed-Loop-Tests für Lichtassistenzsysteme. ATZ 10 (2014), 42-47.
- [2] Wehner, U., Schulze, K., Schonlau, B., Rudolf, L.: Entwicklung von Assistenzfunktionen am Fließband. ATZ 02 (2010), 92 – 97.
- [3] Bogdanow, S., Marutzky, M., Zschoppe, R., Voigt U.: Neue Testmethoden für kamerabasierte Lichtassistenzsysteme, ATZ 10 (2011), 752-756.

Rapid Prototyping of headlamp light distributions

**Sascha Saralajew, Simon Mates, Karol Stefaniak,
Henning Zimmermann,**
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach

Abstract

In this contribution, we present a rapid prototyping method that allows the evaluation and visualization of headlamp light distributions from simulated data in a real environment. For this, simulation data is transformed into image data, such that a projection system replicates the beam path of an automotive headlamp. As a result, we obtain a geometrically exact imitation of a headlamp light distribution with accurate intensities and only marginal color deviations. Distributions calculated from measured input data of a real headlamp show a relative mean error of about 6 % compared to their real counterpart, which underlines the good quality of our approach.

1. Introduction

The development process of an automotive headlamp is determined by the design with respect to geometric restrictions and styling demands. A crucial role in the functional design of headlamps is played by demands on the light output itself. Light sources and optics are being optimized to precisely tailor the light distribution of a vehicles headlamp to fulfill various desirable characteristics. For example, the light distribution has to be valid with respect to the law [1] and it should illuminate the traffic space as homogeneously as possible.

During the design process there are two main ways to assess light distributions: one possibility is the simulation by use of ray tracing methods within an appropriate software framework (e.g. [2]), and the other possibility is the development of a physical prototype. The former option uses simulation data making it possible to evaluate the luminous homogeneity as well as the luminous intensity by examination of false color images of the simulated distributions. Moreover, using spectral data of the light source it is possible to simulate optical effects depending on the spectral intensity distribution of the light passing through an optical system, such as color effects in the cut-off-line of the low beam.

The benefit of physical prototypes is the possibility of evaluating the light distributions in a real environment. However, the development of a prototype demands an advanced stage within the headlamp development cycle, whereas simulations are possible in an early stage

of the development process. A further advantage of simulations is that they are much more inexpensive in comparison to a real prototype.

The method we propose for building a prototypical model of a light distribution is flexible and it can be based on simulated or measured input data. We use an extended IES-file [3] as data source of our modeling and a high power video projector as target system. In addition to the common IES-file standard we use the spectral approximation onto the CIE¹⁾ 1931 XYZ color space [4] to model headlamp light distributions in intensity and chromaticity. We emphasize that the proposed rapid prototyping approach renders light distributions independent of the projection distance. Thus it can be considered and evaluated in real space and is not restricted to monitor screens. Furthermore, we overcome the necessity of a large number of expensive headlamp prototypes and enable progress without the availability of such a prototype in an early stage of development.

2. Related Work

From Michenfelder [5, 6] a system is known which models a headlamp light distribution using multiple projectors. The disadvantage of the system is that it is valid for fixed distances only, which is due to the use of more than one projector.

During the concept studies of contrast-adaptive headlamps and glare effects of traffic signs, Jürgens [7] used a single projector to model light distributions. Unfortunately, his method is also restricted to fixed distances. Additionally both methods consider intensities only and both neglect the chromaticity of light. The works of Menk [8, 9] are related to our proposed color modeling and inspired our considerations of color space approximation in general. However, the method proposed by Menk projects virtual content onto real objects which differs from our goal.

3. Mathematical Description of the System

The data basis of our modeling is the description of a headlamp light distribution in the IES-file standard which can be extracted from simulated or measured data. One important assumption of the IES-file standard is that the considered light source is point like. This assumption is valid for sufficiently large projection distances. For a projector headlamp, the assumption holds true for distances down to a few meters, as we observe in section 5. Thus we do not consider this assumption as a restriction in the realm of our measurement range.

¹⁾ Commission Internationale de l'Éclairage (engl.: International Commission on Illumination)

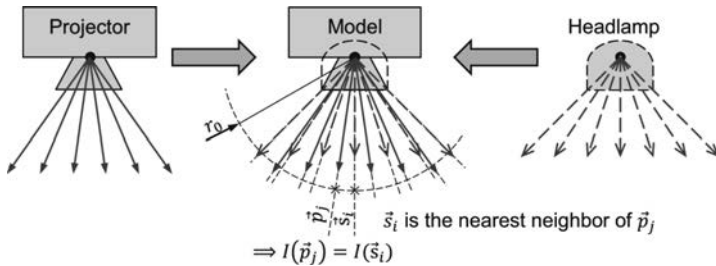


Fig. 1: Visualization of the key idea of the proposed method

The IES-file standard is based on a spherical coordinate system with a point light source at the origin and spherical coordinates (r, φ, ϑ) . Further, both the polar angle φ and the azimuth angle ϑ are restricted to an observation area $[\varphi_0, \varphi_1] \times [\vartheta_0, \vartheta_1]$ and they are discretized into a defined number of steps. Varying the radial distance r for fixed values φ and ϑ yields the parametrization of a ray. For each ray in the discretized observation area the emitted luminous intensity I_v ($[I_v] = cd$) of the point light source is given.

In this contribution, we extend the treatment of luminous intensity I_v with the triplet (X, Y, Z) of tristimulus values according to CIE 1931 XYZ color space. If only a standard IES-file without color information is used with our rapid prototyping method, then similar to Jürgens [7] and Michenfelder [5, 6] we get a luminous intensity model of the headlamp light distribution.

In Figure 1 the key idea of the rapid prototyping process is depicted. We assume that the projector can be modeled by a reverse pinhole camera which conforms to the projector light source being point like. In our approach, we consider light emitted by the projector and the headlamp – described within the respective IES-file – radiating from the same origin. We then solve the nearest neighbor problem of assigning each headlamp ray with its corresponding closest projector ray and match the luminous properties of all neighbor pairs to the values defined within the IES-file.

Mathematically we formulate this problem as follows: given a set of headlamp rays $S := \{\vec{s}_i = \vec{s}(r, \varphi_i, \vartheta_i) | i = 1, \dots, n\}$, a set of projector rays $P := \{\vec{p}_j = \vec{p}(r, \varphi_j, \vartheta_j) | j = 1, \dots, m\}$ and a function $I: \mathbb{R}^3 \rightarrow C: I(\vec{s}) = (X, Y, Z)^T$, where $(X, Y, Z)^T \in C$ is the tristimulus triplet corresponding to ray \vec{s} . Due to the point light nature of the source, all rays diverge with increasing distance r . Thus we can map all the rays of S and P to a virtual plane of fixed distance $r_0 > 0$. The nearest neighbor of a ray \vec{s} can be found by evaluating the expression

$$p(j) = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \|\vec{s}(r_0, \varphi_i, \vartheta_i) - \vec{p}(r_0, \varphi_j, \vartheta_j)\|,$$

with $\|\cdot\|$ being the Euclidean norm. We define the (X, Y, Z) -triplet of each ray \vec{p}_j using

$I(\vec{p}_j) = I(\vec{s}_{p(j)})$. The set S and the function $I(\vec{s})$ with $\vec{s} \in S$ is defined by the extended IES-file. The projector rays P are part of an idealized reverse pinhole camera model with a camera intrinsic matrix K and a lens distortion model k , see [10, 11]. Such models are also known as projector models and are described by a set of equations and parameters. In a real system, light emitted by the projector originates from a pixel area inside the projector. The method we describe relates all rays radiating from a projector pixel (u, v) to one model ray \vec{p} . A world coordinate (x, y, z) relates to \vec{p} if and only if the following transformation is valid: At first the point (x, y, z) is mapped to a virtual plane by

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{z} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}.$$

Then the lens distortion k is modeled by the radial distortion coefficients k_1, k_2 and k_3 , the tangential distortion coefficients p_1 and p_2 and the squared radius $r' = x'^2 + y'^2$:

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} = k(x', y', r') = \begin{pmatrix} x'(1 + k_1 r' + k_2 r'^2 + k_3 r'^3) + 2p_1 x' y' + p_2(r' + 2x'^2) \\ y'(1 + k_1 r' + k_2 r'^2 + k_3 r'^3) + p_1(r' + 2y'^2) + 2p_2 x' y' \end{pmatrix}$$

Finally, we map the point (x'', y'') onto the pixel sensor plane by the equation

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ 1 \end{pmatrix}$$

using the camera intrinsic matrix

$$K = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

with the focal lengths f_x and f_y , the offsets to principle point c_x and c_y and the skewness s .

4. Calibration of the System

The following calibration steps are the basis for an accurate modeling of the light distribution. We emphasize that these steps are influenced by the lens system of the projector. Therefore, it is necessary that the zoom setting is fixed during the whole calibration process and stays fixed afterwards.

4.1 Geometrical Calibration

In this section of the paper we describe the method which is used to secure the geometric accuracy of the projection by estimating the intrinsic parameters for the matrix K and the distortion function k . The most difficult problem during calibration is to determine specific points of a calibration target like a checkerboard. In camera calibration this is done by capturing an image and the utilization of image filters to extract the calibration points. Normally in projector calibration this problem is solved by considering the projected image of

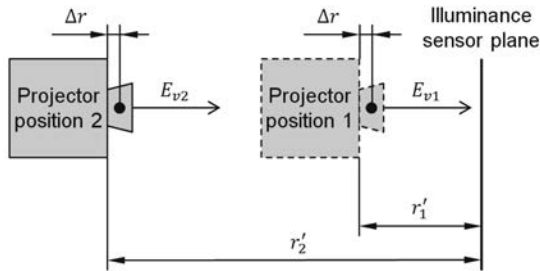


Fig. 2: Sketch of the experimental setup to estimate the point light source position

the projector by a camera. Based on the analysis of the camera image the parameters of the projector model are estimated. A very outstanding and promising method for projector calibration is the method proposed by Moreno [11] which uses structured light and local homographies to overcome the difficulties of projector calibration. Compared to other approaches it is more robust and has higher precision since it calibrates the projector independent to the camera model.

During the process the focus stays fixed and has to be set on the calibration target.

4.2 Estimation of the Point Light Source Origin

In general, it is not possible to directly measure the luminous intensity I_v which is the basic information of an IES-file. The idea to overcome this problem is to measure the illuminance E_v ($[E_v] = lux$) and to calculate the luminous intensity by the inverse-square distance law:

$$E_v = \frac{I_v}{r^2}$$

For this purpose we need to determine the distance r from the illuminance sensor to the theoretical center of the projector point light source. We measure the screen distance r' from a known reference point of the projector which allows a reproducible measurement over time. As reference point we chose front surface and estimated the offset Δr from this surface to the center of the point light source.

The offset Δr can be determined with two different illuminance measurements, which are obtained at two different positions of the projector (see Figure 2). Mathematically, this problem can be formulated as

$$E_{v1}(r'_1 + \Delta r)^2 = E_{v2}(r'_2 + \Delta r)^2$$

with the solution

$$\Delta r = \frac{\sqrt{E_{v1}} \cdot r'_1 - \sqrt{E_{v2}} \cdot r'_2}{\sqrt{E_{v2}} - \sqrt{E_{v1}}}.$$

To get an accurate estimation of Δr it is necessary to focus the projector in both positions to the sensor plane. Moreover, we align the projector orthogonal to the sensor plane to keep the inverse-square distance law valid.

The distance between the origin of the point like source and projection screen then is

$$r_i = r'_i + \Delta r.$$

4.3 Luminance and Colorimetric Calibration

Besides the correct geometric treatment of the rapid prototyping model, our goal is to reproduce the luminous intensity as well as color perception of simulated light distributions.

In general, the information about corresponding quantities is contained within XYZ-data (according to CIE 1931 XYZ color space) obtained by spectral simulation. The goal of the calibration described below therefore is to translate each XYZ-triplet from the input data, into the three additive primary color values of an RGB color space for the projector, such that the projected rays resemble the simulated rays as best as possible.

The conversion is done using a 3x3 color-mixing matrix \mathbf{M} and calculating the product

$$M((R, G, B)^T) = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} a_R \cdot R^{\gamma_R} \\ a_G \cdot G^{\gamma_G} \\ a_B \cdot B^{\gamma_B} \end{pmatrix}$$

allowing distinct gamma curve parameters a_i and γ_i for each channel. To estimate the 15 parameters of this equation we measure the tristimulus values of projected pixels actuated with a given set of interpolation points. Afterwards we estimate the parameters of the above equation by using a minimization scheme over a respective energy function inside an iterative random sample consensus algorithm (RANSAC). Due to the RANSAC we are able to handle outliers with the proposed method well. Measurements were therefore performed using a spectrophotometer positioned at the focal plane of the beam path gathering direct light from the projector.

To relate XYZ-coordinates of projected pixels, which correspond to specific illuminances on the projection screen, to the luminous intensity values inside the IES-file we use the inverse-square distance law (see section 4.2) and multiply X , Y and Z with the squared distance r^2 to the point source origin.

For XYZ-values outside the gamut of the projector, in analogy to [8, 9] the RGB-value with closest distance in CIE 1976 $L^*a^*b^*$ color space is used.

5. Results

To evaluate our method we gauged a PDLS+ (Porsche Dynamic Light System Plus) LED headlamp of a Porsche Carrera type 991 using a photogoniometer. Our aim is to compare the model of the headlamp light distribution based on the measured XYZ-data to the real headlamp. In this way, we assure that the observed differences between the prototype model and the real headlamp stem from our method and/or the calibration.

Investigations were performed using a Panasonic PT-DZ21K video projector with a Panasonic ET-D75LE lens system. The projector has a resolution of 1920×1200 pixels and it operates on a three chip DLP technology using four UHP mercury lamps and offers a maximum optical output of 20 000 lm. With a horizontal image angle of $\pm 15^\circ$ and vertical image angle of $\pm 10^\circ$ the prototype model is restricted to these boundaries.

The geometrical calibration was done using a 6×9 checkerboard for six different orientations of the calibration target. Thus we calibrated to 324 sample points. To capture the images of the checkerboard we use a Nikon 700D digital single lens reflex (SLR) camera. We set the coefficients k_3 , p_1 and p_2 of the reverse pinhole camera model to zero since we could not observe an improvement of the standard deviation in our results. With these settings, we reach an overall mean re-projection error of 0.16 pixels (see Figure 3) based on the estimated geometrical coefficients.

The estimation of the point light source distance is realized measuring illuminance in several different positions. We measured illuminance at eight distance steps distributed in the range between 1 m and 4 m. To estimate Δr we compute the arithmetic mean over all possible measurement point combinations and consider the standard deviation. We get the result Δr equals 0.0125 m with standard deviation 0.0015 m.

We estimate the color space of the projector using a $12 \times 12 \times 12$ grid of measurement points in the RGB color space using a Konica Minolta CL-500A spectrophotometer. The measurement points are taken at the axis of the optical center assuming a large homogeneity of the light output. Hence the projection center can be seen as sample point to describe the photometric behavior of each pixel. The RGB values of each of the 1 728 data points were mapped to tristimulus values XYZ using the proposed color space model M and compared to the XYZ coordinates obtained by measurement of the PDLS+ headlamp. To calculate the difference between modeled and observed XYZ-values we use the relative Euclidean distance. Using RANSAC we get a consensus set size of 1 023 measurement points with a relative distance smaller than 5%. This means that we model 1 023 measurement points with an error less than 5%. Taking all measurement points into account we get an averaged error of 16%.

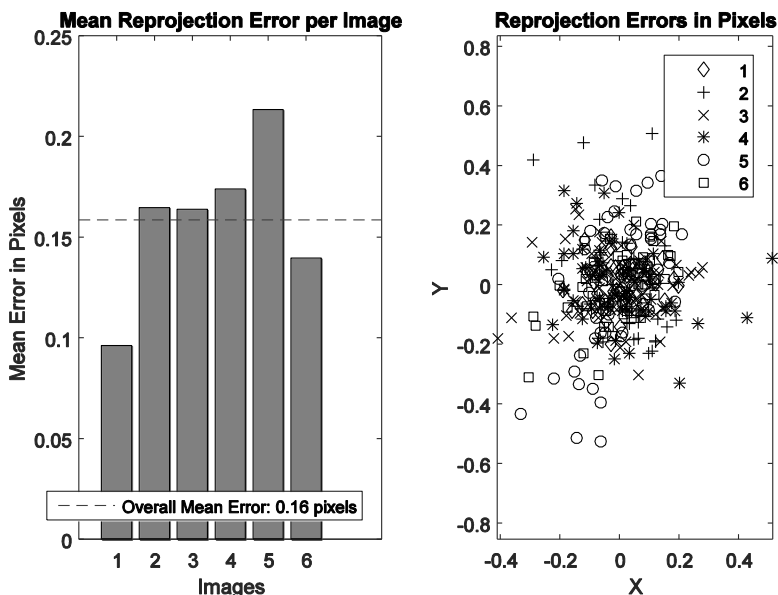


Fig. 3: Re-projection error of the geometric calibration of a Panasonic PT-DZ21K projector

The method we propose allows for an efficient implementation in a numerical computation framework. Using MATLAB (a product of The MathWorks, Inc.) on an INTEL Core i7 CPU we reach a rendering time of 0.6 s for images with the resolution 1920×1200 and a resolution of 2501×477 in the extended IES-file.

The comparison between light distributions is done using a Techno Team Color LMK luminance camera. Both light distributions are imaged on a white screen in the distance of 5 m. This short distance is chosen to use the full dynamic range of the luminance camera. Further we use a careful alignment to preserve an accurate adjustment of the models to the luminance camera. In Figure 5 and Figure 6 we depict a false color image of the difference between an image of a real headlamp and one of a rapid prototype model (see Figure 4). We observe a maximum error of 28.14 Cd/m^2 , see Table 1.



Fig. 4: Image of the modeled high beam of a Porsche PDLs+ LED headlamp



Fig. 5: Absolute quadratic mean error between modeled and real high beam distribution

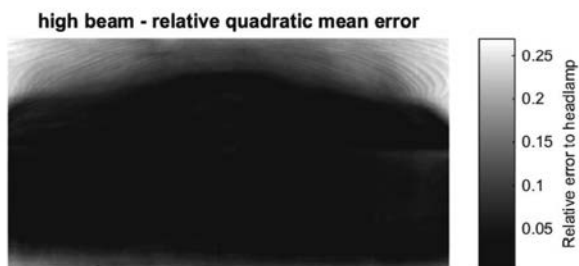


Fig. 6: Relative quadratic mean error between modeled and real high beam distribution

Table 1: Errors between modeled and real high beam

	Mean XYZ	X	Y	Z
Absolute Mean Error [Cd/m ²]	1.99	1.48	2.01	1.84
Absolute Maximum Error [Cd/m ²]	28.14	27.52	27.70	41.70
Relative Mean Error	0.06	0.05	0.05	0.05
Relative Maximum Error	0.27	0.27	0.27	0.29

6. Conclusion

The assumption, that the point source model for the headlamp imposes only a mild restriction to real headlamps is confirmed by the comparison of our prototype light distribution model with a real headlamp.

Our estimated color space reaches good yet improvable accuracy. However, adding quadratic terms into the color mixing function or a more detailed treatment of the gamma curves could not increase the accuracy significantly. The projector used showed anomalous behavior for low RGB values that is not describable by a closed mathematical equation.

To overcome this fact we tried the proposed method of [8, 9] using a look-up-table. However this approach was not able to achieve better results, leading to impractical behavior for low RGB values which results in sharp color gradients and color gaps in colorful areas like the cut-off-line. This is due to the linear interpolation method of tetrahedral division. The inaccurate behavior of single color channels of the projector realizes a non-smooth interpolation over the whole color space which leads to described instable interpolation performance.

Due to these studies we conclude that the conversion using a color-mixing matrix with our proposed method leads to the best results for our use case. Surprisingly, the result of our comparison shows a great agreement between the light distributions of the real headlamp and our rapid prototype model. Moreover we made the same comparison experiment on different headlamp distributions, e.g. low beam with similar results. Based on these results we conclude that our approach is valid and fulfills our initial goals.

For the comparison we use a headlamp with an LED light source. Fortunately, the spectral characteristic of the projector UHP mercury lamps is similar to the one of the LED. We benefit from this fact regarding color temperature and color perception. If we judge both light distributions on a white screen by a human observer we get a high resemblance which is due to similar spectral characteristics. We emphasize that we cannot model the full spectral behavior of the headlamp light distribution, and only approximate within the CIE 1931 XYZ color space. Thus our proposed model increases in accuracy if the similarity of the spectral characteristics of projector light source and headlamp light source increases.

Naturally the method we describe is restricted by the optical performance of the projection system in use. The possibility to create the rapid prototype model with multiple projectors to increase light output is unrewarding, because in this case the point light source assumption which is the basis of our approach does not apply. More precisely, using such an approach we get the same restrictions as described in [5, 6] such as the projection has to be fixed to a specific projection distance.

Brightness modifications of LED light sources controlled by pulse width modulation leave the spectral emission characteristics unaltered. Due to the integral character of the XYZ coordinates, brightness modifications of LED headlamps are modeled simply by introducing a scale factor, eliminating the need of input data for different brightness settings, which confirms with our observations. The same reasoning justifies that this does not work for halogen headlamps.

- [1] ECE 123: Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles. Economic Commission for Europe – 2010-08-24
- [2] Hoffmann, A. v. [ed.]: CAx Schriftenreihe – Band 1: Optik Simulation – Einführung in LucidShape & LucidDrive. Stuttgart: Steinbeis-Edition 2009
- [3] Illuminating Engineering Society, <http://www.ies.org> - 2016-03-01
- [4] Plataniotis, P., Venetsanopoulos, A. N.: Color Image Processing and Applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2000
- [5] Michenfelder S.: Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren., Karlsruher Institut für Technologie Karlsruhe Dissertation. 2014
- [6] Michenfelder S., Naumann, C.: Propix (Projektor-Pixellicht) – Aktueller Entwicklungsstand und praktische Erprobung mittels Probandenstudie. Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik 6 (2014) p. 233-245
- [7] Jürgens, C.: Der kontrastadaptive Scheinwerfer., Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover Dissertation. 2014
- [8] Menk, C., et al.: 3D-Stereo-Projektion von virtuellen Scheinwerferdaten auf reale Modelle. Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik 6 (2014) p. 135-146
- [9] Menk, C., Koch, R.: Truthful Color Reproduction in Spatial Augmented Reality Applications. Transactions on Visualization and Computer Graphics 19 (2013) 2 p. 236-248
- [10] Zhang, Z.: Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations. International Conference on Computer Vision 1 (1999) p. 666-673
- [11] Moreno, D., Taubin, G.: Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration. 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission 2 (2012) p. 464-471

OLED im Automobil – Wo geht die Reise hin?

Dr. Matthias Ogonda, Dr.-Ing. Wolfgang Pohlmann,
Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt

Abstract

Due to its unique features of a surface light emitter and completely new styling possibilities the OLED as future light source will revolutionize the look of automotive lighting solutions inside and outside the car. First vehicles using this innovative technology will appear on the streets this year. Their rear lamps with novel signatures made possible by OLED technology will create a huge demand for even fancier designs. Two-dimensional OLEDs on glass substrate can satisfy this demand only for a short time. So they will only cover the introduction phase of this technology. New OLED concepts with enhanced freedom of design are necessary to prevent this technology from being a flash in the pan. This contribution reports on the possibilities as well as the challenges of these concepts and gives an outlook on the future of automotive lighting technology.

1. Einleitung

Lichterzeugung in einer organischen Leuchtdiode (OLED = organic light-emitting device) beruht auf Elektrolumineszenz organischer Moleküle. 1987 gelang es Tang und Van Slyke erstmals, diesen Effekt in einer OLED auszunutzen, die bereits den prinzipiellen Aufbau heutiger Bottom-Emitter OLEDs besaß. Auf ein mit Indium-Zinn-Oxid (ITO) beschichtetes Glassubstrat wurden im Vakuum (ca. 10^{-5} mbar) 2 organischen Schichten aufgedampft, eine 75 nm dicke Diamin-Schicht als Loch-Transportschicht, gefolgt von einer 60 nm dicken Alq₃-Schicht als Elektronen-Transport- und Emitter-Schicht. Das ITO dient als transparente Anode. Der OLED-Schichtaufbau wurde durch eine ebenfalls aufgedampfte Mg:Ag-Kathode abgeschlossen [1]. Heute besitzen OLEDs deutlich mehr als nur 2 Organik-Schichten und mindestens eine Verkapselungsschicht, die sie gegen Einflüsse von außen schützen. Sie können Licht im gesamten sichtbaren Spektralbereich, sowie weißes Licht mit hohem Farbwiedergabewert erzeugen. Mit einer Effizienz von bis zu 90 lm/W und Lebensdauern von bis zu 40.000 Betriebsstunden bei Raumtemperatur [2] sind OLEDs längst bereit für den Einsatz in der Allgemeinbeleuchtung. Dem stehen allerdings die aktuell noch deutlich zu hohen Kosten im Wege. Die Branche sieht daher die Automobilindustrie als Markttreiber, der den Weg für den Einsatz der OLED in anderen Märkten bereiten soll [3].

Die Hauptvorteile der OLED gegenüber anderen Lichtquellen in Bezug auf Design und Gestaltung im und am Automobil ergeben sich durch ihren flächenförmigen Charakter:

- OLEDs emittieren diffuses, homogenes sowie blendfreies Licht und benötigen daher kein zusätzliches Optik-System (z.B. Reflektoren, Lichtleiter), um ein stilistisch ansprechendes Lichtbild zu erzeugen.
- OLEDs sind je nach Aufbau nur 0,1 - 1 mm dick und lassen sich daher nahezu beliebig in einem gegebenen Bauraum anordnen, ermöglichen dadurch die Umsetzung von Design-Ideen, die bisher mit anderen Leuchtmitteln nicht möglich waren.
- Die aktive Fläche einer OLED lässt sich in beliebig viele OLED-Segmente aufteilen, die sich unabhängig voneinander ansteuern lassen. Dies ermöglicht neuartige Signaturen und Animationen.

Erste Fahrzeuge, die OLEDs in ihren Rückleuchten nutzen, werden bereits 2016 auf der Straße erscheinen [4,5]. Weitere Projekte sind bereits angekündigt [6].

2. Limitierung der aktuellen OLED-Technologie und mögliche Lösungsansätze

Die ersten Automotive-OLEDs werden wie die erste OLED 1987 per Vakuumverdampfung auf Glas abgeschieden, verwenden ITO als Anode und eine Metallschicht als Kathode. Sie sind starr, nicht transparent und nutzen wie die OLEDs des 2012 von HELLA im Rahmen des So-Light Forschungsprojekts vorgestellten Heckleuchten-Demonstrators (siehe Bild 1 oben) die Segmentierung als zusätzliches stilistisches Mittel [7]. In Anbetracht der Tatsache, dass die neuen Designmöglichkeiten das Hauptargument für dieses Leuchtmittel ist wird schnell klar, dass sich die OLED gerade in diesem Punkt sehr schnell weiterentwickeln muss. Die nächsten Schritte in der Entwicklung der Automotive-OLED müssen also mit einer Erhöhung der Design-Freiheitsgrade verbunden sein. Wie in Abbildung 1 dargestellt könnte dies durch den Einsatz von

- OLEDs auf flexiblen Substratmaterialien,
- transparente OLEDs und/oder
- farbsteuerbare OLEDs

geschehen.

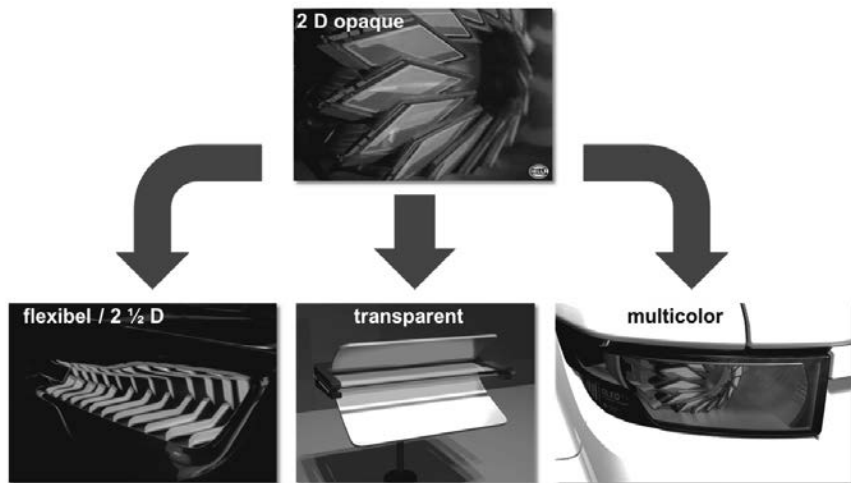


Bild 1: Mögliche Technologieschritte zur Erweiterung des Anwendungspotentials von OLEDs im Automobil.

3. Transparente OLEDs

Transparente OLEDs nutzen meist eine transparente Kathode, z.B. ein ultradünne Metallschicht. In Verbindung mit der bereits transparenten ITO-Anode auf der Substratseite ermöglicht dies

- eine Transparenz der OLED von bis zu 50%, dies ermöglicht es mehrere Lichtfunktionen in einem Bauraum hintereinander anzuordnen, z.B. ein LED-Bremslicht hinter einem OLED-Schlusslicht,
- Lichtemission in alle Richtung, eine Möglichkeit, dies stilistisch zu nutzen, zeigt der im Bild 1 unten abgebildete Leuchten-Demonstrator.

Herausforderungen stellt diese Technologie einerseits auf Seiten der OLED-Hersteller die im Vergleich zu nichttransparenten Bauteilen schlechtere Leuchtdichtenhomogenität aufgrund der schlechteren Leitfähigkeit der extrem dünnen Metallkathode. Abhilfe könnten hier in Zukunft neue Konzepte wie z.B. der Einsatz einer Graphen-Schicht als Elektrode schaffen [8]. Andererseits unterscheidet sich die Fixierung der OLED in der Leuchte von der einer nichttransparenten OLED, da die OLED-Rückseite einer transparenten OLED Lichtaustrittsfläche ist und somit nicht zur Fixierung verwendet werden kann. Eine robuste Methode ist hier der in Bild 1 unten dargestellte die OLED-Seiten einrahmende Halter.

4. Flexible OLEDs

Die Auswahl eines geeigneten flexiblen OLED-Substratmaterials wird durch die Anforderungen an OLED-Substrate im Allgemeinen bestimmt [9]:

- Transmission $>90\%$ im sichtbaren Spektralbereich,
- Sauerstofftransportrate $<10^{-4}$ cc-atm $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$
- Wasserdampftransportrate $<10^{-6}$ g $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$
- Rauigkeit $R_q < 2 \text{ nm}$, $R_{\text{max}} < 20 \text{ nm}$
- Defektdichte $< 1/\text{mm}^2$ (Defektgröße max. $0,5 \text{ }\mu\text{m}$)
- Thermische Ausdehnung $< 10 \text{ ppm/K}$

Starres Glas erfüllt diese Kriterien, begrenzt jedoch das OLED-Design auf zwei-dimensionale Formen. Als flexible Substratmaterialien stehen Dünnglas, Kunststofffolien und Metallfolien zur Verfügung. Insbesondere die letzten beiden benötigen zusätzliche Planarisierungs- und Barriere-Schichten, um die oben genannten Spezifikationen zu erfüllen.

Die Attraktivität flexibler OLEDs für den Einsatz im Automobil lässt sich mit der Möglichkeit begründen, durch die Integration 2 ½ -dimensionaler OLED-Module (flexible OLED auf einem gebogenen Halter) das stilistische Potential dieser Lichtquelle weiter auszuschöpfen. HELLA entwickelt daher seit einigen Jahren Technologien zur Integration flexibler OLEDs. Frühe Ergebnisse dieser Arbeit wurden bereits 2014 gemeinsam mit BMW und LG Chem in einem ersten Heckleuchten-Demonstrator vorgestellt. Substratmaterial der hier verwendeten OLEDs war Kunststoff. Die OLEDs erreichten einen minimalen Biegeradius von 10 mm [10]. Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt Roll To Device 2 (R2D2), Laufzeit von Oktober 2013 bis Dezember 2015 [11], erforschte HELLA gemeinsam mit den Projektpartnern AUDI und OSRAM die Integration flexibler OLEDs auf Metallsubstrat. Die größten Herausforderungen hierbei waren:

- eine robuste Halterung der OLED mittels gebogenen Halters, d.h. die Herstellung eines 2 ½ -dimensionalen OLED-Moduls und
- die elektrische Kontaktierung der OLED.

Das Ergebnis dieser Arbeiten verdeutlicht der von AUDI designte und von HELLA aufgebaute Heckleuchten-Demonstrator mit OSRAMs flexiblen OLEDs als Lichtquellen (Bild 2) [12].

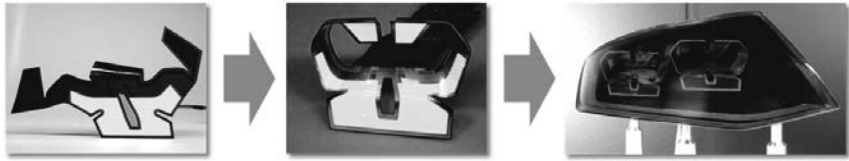


Bild 2: Von der flexiblen OLED über das 2 ½ -dimensionale OLED-Modul zur R2D2 OLED-Heckleuchte

5. Mehrfarbige OLEDs

Durch das Stapeln mehrerer monochromer OLEDs, die durch transparente Elektroden voneinander getrennt und unabhängig voneinander ansteuerbar sind, lässt sich die Farbe der OLED beliebig steuern (siehe Bild 3) [13]. Dies vergrößert das Anwendungspotential der OLED enorm. Zum Beispiel ermöglicht die Stapelung einer roten und gelben OLED als Leuchtmittel für eine Heckleuchte, zwei Lichtfunktionen (Schlusslicht und Fahrtrichtungsanzeiger) aus einer OLED zu generieren.

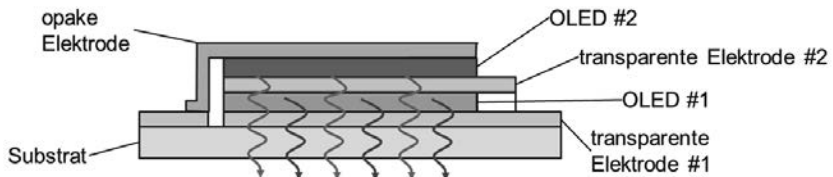


Bild 3: Funktionsprinzip einer farbsteuerebaren OLED.

6. Fazit

Der Einsatz der OLED im Automobil wird nicht auf nichttransparente, zwei-dimensionale OLEDs beschränkt bleiben. Erste Arbeiten an flexiblen, transparenten und mehrfarbigen OLEDs zeigen, dass sich das Designpotential dieser Lichtquelle für automobiler Beleuchtungsanwendungen noch deutlich erweitern lässt.

- [1] C.W. Tang, S.A. Van Slyke, Organic electroluminescent diodes, Appl. Phys. Lett. 51, 913 (1987).
- [2] <http://www.igoledlight.com>, aufgerufen am 09.03.2016
- [3] Kh. Ghaffarzadeh, N. Bardsley, OLED Lighting Opportunities 2015 - 2025: Forecasts, Technologies, Players, IDTechEx Report, September 2014.
- [4] Pressemitteilung BMW: Der neue BMW M4 GTS, 07.10.2015.
- [5] Autobild: So leuchtet der neue TT RS, <http://www.autobild.de/videos/video-audi-tt-rs-ces-2016--8512603.html>, 07.01.2016.
- [6] OLED-Info: Audi promises OLED lighting in the 2017 A8 Saloon flagship car, <http://www.oled-info.com/audi-promises-oled-lighting-2017-a8-saloon-flagship-car>, 26.05.2015
- [7] M. Dworzak, W. Pohlmann, "OLED im Automobil", Elektronik Praxis, 2014
- [8] <http://graphene-gladiator.eu/>, Web-Präsenz des durch die EU geförderten Gladiator-Projekts zur Erforschung von Graphen.
- [9] D.J. Gaspar, E. Polikarpov, OLED Fundamentals: materials, devices, and processing of organic light-emitting diodes, ISBN 978-1-4665-1518-5, CRC Press, 2015.
- [10] Pressemitteilung HELLA: HELLA bringt OLEDs in Form, 01.04.2015.
- [11] <http://www.photonikforschung.de/forschungsfelder/organische-elektronik/organische-elektronik-oled-und-opv/>.
- [12] M. Kleinkes, W. Pohlmann, OLED – Innovative Graphics and Future Possibilities, ISAL Proceedings, 2015.
- [13] P. Freitag, T.-H. Gil, J. Hesse, D. Schlebusch, „Bunte Lichtflächen - Realisierung farbsteuerbarer organischer Leuchtdioden“, Optik & Photonik 8 (2013), No. 3, pp. 26-29.

Segmentiertes Fernlicht der nächsten Generation

Die Wahrnehmung der adaptiven Lichtfunktionen

Dr. rer. nat. **Christina Bauer, Markus Kiesel, Armin Austerschulte**,
Automotive Lighting Reutlingen GmbH Reutlingen

Abstract

Headlamps equipped with segmented high beam systems are on the market now. These systems are meant to produce a glare free high beam by being switched on partially omitting the oncoming and preceding traffic. They are known to improve the sight of the driver significantly compared to a simple automated on/off high beam function. [1]

In the near future, high beams realized by segment arrays having multiple rows and columns will be available. This offers new flexibility for a more precise adaption of the high beam. To evaluate improvements in traffic safety and to assess the driver perception, a comparison of different high beam systems was done. Especially the avoidance of self-glare effects for the driver, for example due to traffic sign illumination, was analyzed.

1. Neueste Fernlichtverteilungen

Scheinwerfersysteme mit adaptiven Fernlichtverteilungen sind seit einigen Jahren am Markt verfügbar. [2, 3] Neuere Entwicklungen erzeugen so genanntes Matrix Fernlicht. Hier werden einzelne Segmente geschaltet. Es ermöglicht, dass die Fernlichtverteilungen automatisch an die jeweils kamerabasierte Analyse der Fahrsituation angepasst werden. [1] Je kleiner die Segmente solcher Systeme sind, desto besser kann die Lichtverteilung adaptiert werden. Eine neue Generation von Systemen hat 80-90 Segmente, die in drei Zeilen angeordnet sind und individuell angesteuert werden können (siehe Bild 1). [4]

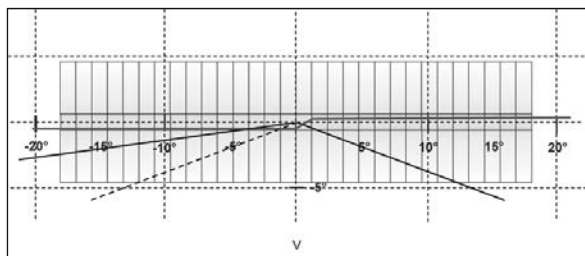


Bild 1: 90 Segment Lichtverteilung mit Ablend- und Fernlichtanteilen [4]

Ziel solcher Systeme ist es, das Fahren bei Nacht sicherer und komfortabler für den Fahrer zu gestalten. Umgesetzt wird ein solches System beispielsweise über eine Anzahl an LEDs, entsprechend der Segmentzahl, die hinter einer Primäroptik angeordnet werden. Der Abschluss der Primäroptik wird mittels einer Linse abgebildet. Die einzelnen Komponenten eines vergleichbaren Systems mit 24 Pixeln sind in Bild 2 dargestellt.

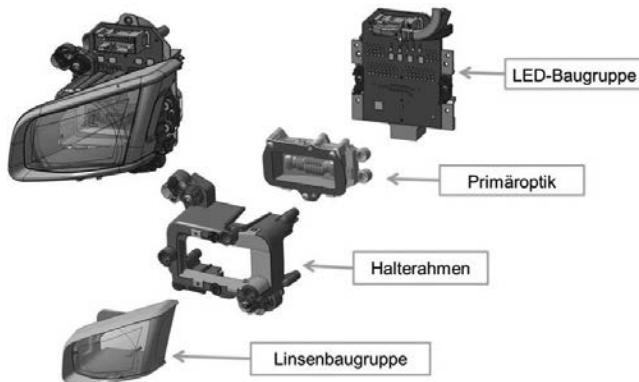


Bild 2: 24 Segment Fernlichtmatrixmodul.

Die Entwicklung der Matrix-Systeme geht hin zu einer feineren Segmentierung, die sich über klassische Abblend- und Fernlichtbereiche erstrecken. Situationen, die durch unzureichende Adaption der Lichtverteilung die Wahrnehmung des Fahrers beeinträchtigen können, sollten bei diesen voll automatisierten Systemen vermieden werden. Zwar kann der Fahrer stets selbst eingreifen, jedoch würde dieses vielleicht als Komfortbeeinträchtigung empfunden. Es sind von den Systemen nicht nur andere Verkehrsteilnehmer vor Blendung zu bewahren, sondern auch die Eigenblendung sollte vermieden werden. Ein bekanntes Beispiel ist die Blendung durch hohe Leuchtdichten, die durch Fernlichtanteile auf retroreflektierende Schilder hervorgerufen werden. Hier sind besondere Adaptionen der Lichtverteilung denkbar, so dass der Dynamikbereich des Auges nicht vollständig angereizt wird.

2. Adaption des Auges an die Leuchtdichte des Sichtfeldes

Das Auge ist sehr adaptionsfähig und kann sich über mehrere Größenordnungen an Leuchtdichten anpassen. Diese enorme Anpassung basiert auf mehreren unterschiedlichen physiologischen Effekten, welche verschiedene Anpassungsgeschwindigkeiten bei zunehmenden und abnehmenden Leuchtdichten zeigen. Generell, als Schutzfunktion, ist die Adaption an größere Leuchtdichten schneller. Aus der Literatur ist bekannt, dass schnelle Leuchtdichteerhö-

hungen ab einem Faktor 10-20 nicht mehr durch Iris-Anpassungen möglich sind. [5, 6] Wesentlich größere Adaptionen gehen stets mit einer veränderten Wahrnehmung und einer Umstellungen der chemischen Prozesse des Sehens einher. Für die Adaption an erhöhte Leuchtdichten ist dieser Prozess als zügig zu bewerten und erfolgt innerhalb von Bruchteilen einer bis weniger Sekunden. Die Adaption von hohen an geringe Leuchtdichten erfolgt allerdings wesentlich langsamer. [5, 6] Bei einer überhöhten Leuchtdichte, ist die Wahrnehmung nach deren Einwirkung somit beeinträchtigt. Hierdurch können sich Gefahren für das Fahren bei Nacht ableiten lassen, wenn nach einer Blendung die eigentlich notwendige Adaption langsam erfolgt. Die Umgebungswahrnehmung wäre somit für einen signifikanten Zeitraum herabgesetzt. Ziel sollte es also sein, extreme Leuchtdichteüberhöhungen zu vermeiden. Hierzu können neue Systeme einen Beitrag liefern, indem Sensoren die Leuchtdichte erfassen, und die Lichtverteilung entsprechend adaptieren.



Bild 3: Leuchtdichtedarstellung einer Abblend- und Fernlichtverteilung in Falschfarben.
Stark überhöhte Leuchtdichte im Bereich des Verkehrszeichens bei Fernlicht.

3. Dynamische Leuchtdichte: Wahrnehmung, Adaption, Regelung

Während der Fahrt bei Nacht sind in stetiger Folge Adaptionen der Augen des Fahrers an die Leuchtdichte der Umgebung notwendig. Speziell beim Umschalten von Abblend- auf Fernlicht können sich die Leuchtdichten im Bereich von Schildern um den Faktor 200 und mehr erhöhen. Diese Änderung der relativen Leuchtdichte wurde für Abblend- und Fernlichtverteilungen von drei unterschiedlichen Scheinwerfersystemen und für zwei unterschiedliche Verkehrszeichenpositionen relativ zur Fahrbahn berechnet. Die Ergebnisse für Leuchtdichteverteilungen der Fernlichtverteilungen auf einem Schild sind in Bild 4 dargestellt. Die relativen Leuchtdichten liegen um einen Faktor 200 bis 400 über den Leuchtdichten der jeweiligen Abblendlichtverteilungen.

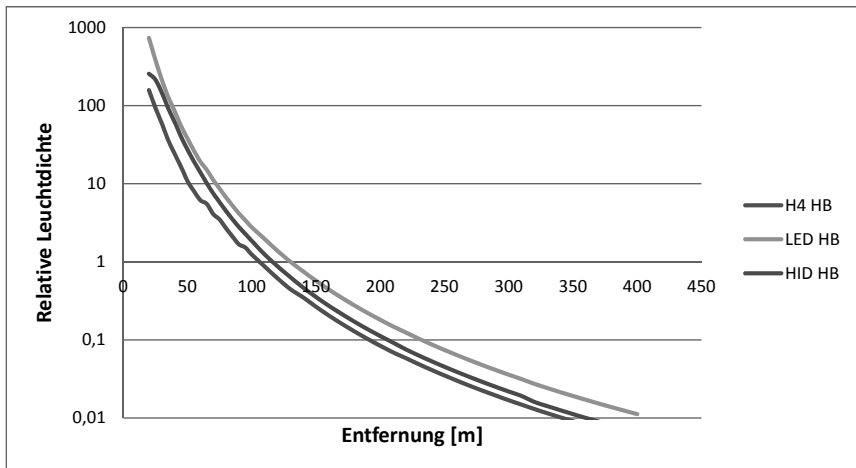


Bild 4: Relative Leuchtdichtedarstellung dreier Scheinwerfersysteme in Abhängigkeit vom Abstand zu einem Schild, welches einen Meter neben der Fahrbahn und in einer Höhe von 1,2 Metern angenommen wurde.

Untersuchungen haben gezeigt, dass schon einfache automatisierte Fernlichter erheblich öfter von Abblendlicht auf Fernlicht schalten als durchschnittliche Fahrer. Segmentierte Fernlichtverteilungen sind außerhalb geschlossener Ortschaften praktisch durchgehend aktiv. Sie beleuchten alle Bereiche, in denen keine anderen Verkehrsteilnehmer geblendet werden. Eine Konsequenz dieser Systeme ist es, dass auch retroreflektierende Verkehrszeichen ohne gesonderte Regelung stets mit Fernlicht beaufschlagt würden. In besonderen Fahrsituationen könnte dieses vom Fahrer als unangenehm empfunden werden. Durch Adaptionen der Fernlichtverteilung könnten solche Wahrnehmungen des Fahrers verringert werden. Ab wann eine solche Adaption notwendig ist, hängt stets von der Adaption der Augen ab und ist individuell verschieden.



Bild 5: Fahrsituation für Probanden bei Tage (zur besseren Darstellung) und während einer Versuchsfahrt bei Nacht.

Um eine Indikation zu erhalten, wurden Probanden gebeten, bei Nacht mit einem Versuchsfahrzeug eine festgelegte Strecke mit Fernlicht (nicht automatisiert) zu fahren. Auf dieser Strecke war ein retroreflektierendes Verkehrszeichen mit Richtungshinweisen (siehe Bild 5). Die Probanden wurden gebeten, das Fernlicht zu deaktivieren, sobald sie die Leuchtdichte auf dem Schild als unangenehm groß wahrnehmen. Dieses war in einer Entfernung von ca. 150 m der Fall. Das Versuchsfahrzeug war mit einem einfachen Scheinwerfersystem ausgerüstet. Die relative Leuchtdichte für die Fahrsituation in 150 m vor dem Schild wird mit 0,25 angenommen. Aus der Grafik in Bild 4 ergibt sich, wie ein Verlauf der relativen Leuchtdichte zu erwarten wäre, wenn weiter mit Fernlicht gefahren würde. Betrachtet man beispielhaft den Verlauf für die LED-Scheinwerfer, so findet man eine relative Leuchtdichte von 0,25 in einer Entfernung von ca. 190 m. Bis diese ihr Maximum in einem Abstand von 30 m erreicht hat, erhöht sich die rel. Leuchtdichte um mehr als das Tausendfache. Nachdem das Schild nicht mehr vom Hauptfernlichtkegel beleuchtet wird, fällt die Leuchtdichte sprunghaft wieder ab. Es kann somit angenommen werden, dass ohne Adaption der Lichtverteilung nach dem Passieren des Schildes eine Reduktion der Wahrnehmung des Fahrers zu erwarten ist.

4. Zusammenfassung

Eine automatische Adaption der Fernlichtverteilungen, auch an die durch retroreflektierte Lichtanteile, z. B. von Schildern, ist somit wünschenswert. Für die von uns untersuchte Konfiguration wäre ab ca. 150 m vor dem Schild die Beleuchtungsstärke zu reduzieren. Die maximale Leuchtdichte sollte auf einem gleichbleibenden Niveau gehalten werden. Der Fernlichtanteil in Richtung des Schildes müsste in den folgenden 120 m abgeregelt werden, so dass 30 m vor dem Schild nur der Abblendlichtanteil der Lichtverteilung für den Bereich des Schildes beiträgt. Dieses könnte mit lichttechnischen Systemen der neuesten Generationen

mit bis zu 80-90 Pixeln gut umgesetzt werden, da sie über eine bessere Auflösung aufgrund feinerer Segmentierung verfügen. [4] Die Reduktion im Bereich der Schilder würde durch die gute Auflösung neuer Systeme andere Bereiche kaum beeinträchtigen.

- [1] A. Austerschulte, B. Dreier, E.-O. Rosenhahn, ISAL 2013, Analysis of Safety Aspects for Segmented LED High Beam Functions.
- [2] B. Dreier, E.-O. Rosenhahn, ISAL 2009, Camera Controlled Adaptive Cut-off and Adaptive Partial High Beam Applications.
- [3] B. Dreier, E.-O. Rosenhahn, VDI 2010 Opt. Techn. i. d. Fahrzeugtechnik, Kamerage-steuerte adaptive Scheinwerfer-Lichtfunktionen: Adaptive Reichweite und Teilfernlicht als Beitrag zur Verkehrssicherheit.
- [4] A. Austerschulte, H. Vogt, ISAL 2015, Glare-free LED High Beam System – Segments – Pixel – High Resolution Matrix
- [5] F. Lang, P. Lang: Basiswissen Physiologie. Springer Verlag 2007.
- [6] J. Huppelsberg, K. Walter: Kurzlehrbuch Physiologie. Thieme Verlag 2013.

Reflektoren im Scheinwerfer: Simple Technik oder doch ein modernes Hightech-Produkt?

Reflectors in headlamps: A simple technology or a state-of-the-art high tech product?

Dr. Sebastian Schildmann,
Automotive Lighting Reutlingen GmbH, Reutlingen

Kurzfassung

Seit 2008 der erste Voll-LED-Scheinwerfer auf den Markt kam, hat die LED als Lichtquelle auch in Hauptfunktionen die Freiheit im Design und Styling und das damit verbundene herstellerspezifische Erscheinungsbild maßgeblich erhöht. Dabei werden sich in Zukunft bei Linsen- wie auch bei Reflektormodulen die Komplexität und Funktionalität der einzelnen Lichtfunktionen im Scheinwerfer weiter steigern. Im Folgenden werden aktuelle Anforderungen an Reflektoren im Hinblick auf kostengünstige, effiziente Umsetzungen verschiedenster Hauptlichtfunktionen beleuchtet; vom Abblendlicht bis hin zu Matrix-Systeme. Es wird gezeigt, dass die bekannten Parameter wie Brennweite und optische Effizienz nicht alleinig für die Performance von Abblendlichtern verantwortlich sind. Auch die Lichtquelle spielt eine entscheidende Rolle im System Reflektor und es wird experimentell gezeigt, dass der Gradient einer Abblendlicht-Hell-Dunkel-Grenze eines direktabbildenden Reflektorsystems im direkten Zusammenhang mit der Flankensteilheit der Leuchtdichte der LED-Lichtquelle steht. Mithilfe dieser Untersuchungen werden Anforderungen an die Lichtquelle formuliert hinsichtlich Kontrast, Flankensteilheit, Homogenität, Farbe sowie mechanischen Toleranzen. Für zukünftige High-end Systeme könnten Laser-Hybrid-Module oder aber Hoch-Leuchtdichte-LEDs Lösungen für die immer flacheren Stylings werden. Bei best-cost Reflektorsystemen kann ein standardisiertes LED-Module ein wichtiger Bestandteile im Gesamtkonzept des Reflektors werden. Zusammenfassend zeigt sich, dass ein Reflektorsystem in einem modernen Scheinwerfern ein komplexes Hightech-Produkt mit viel technischem Know-how darstellt.

Abstract

Since 2008 the first full LED headlamp appeared, the LED as light source for main functions has increased the freedom of design and styling creating more OEM specific headlamp appearance. For future headlamps with lens and reflector systems the complexity and functionality of single light functions will still increase. In this manuscript requirements for

efficient reflector systems are investigated in regard of cost-efficient realization of main light functions like low beam system or glare free high beam modules. For low beam systems it is shown, that a good light performance depends on more than the common known parameters like focal length or optical efficiency. Furthermore, the light source has a decisive part in the system "reflector". Experimental results show the direct connection of the cut-of-line gradient with the shape and gradient of the luminance of the LED light source. This results in a number of requirements for a LED light source including contrast, gradient, homogeneity, color effects and mechanical tolerances. In total, a reflector system in a state-of-the-art headlamp is a complex product.

1. Einleitung

Die LED als Lichtquelle hat in den letzten 10 Jahren Ihren Siegeszug in der Automobil-Beleuchtung ungehindert fortgesetzt. Die Freiheit im Design und Styling und das damit verbundene herstellerspezifische Erscheinungsbild des Autos hat nicht nur bei Signalfunktionen, wie Tagfahrlicht oder Blinkleuchte Einzug erhalten. Auch ist dies ein prägendes Element für Abblend- und Fernlichter geworden und das gesamte Scheinwerferstyling wird unter gestalterischen Gesichtspunkten ausgeführt. Der Trend zu adaptiven und damit auch komplexeren Lichtfunktionen wird sich im Scheinwerfer in Zukunft weiter fortsetzen. Neben den klassischen statischem Abblendlicht und Fernlicht haben in den letzten Jahren ebenfalls adaptive Abblendlicht-Funktionen, z. B. dynamisches Kurvenlicht oder Autobahnlicht, sowie das blendfreie Fernlicht als Neuerung die Autos des oberen Preissegmentes bereichert. Als zweiter Trend wird sichtbar, dass Voll-LED-Scheinwerfer ebenfalls für das untere, preiswertere Modellsegment entwickelt werden. Die Umstellung von Xenon-Scheinwerfern hin zu LED-Systemen ist so gut wie abgeschlossen. Als nächsten Schritt in den kommenden Jahren zeichnet sich die Anwendung eines LED-Reflektorsystem als Halogen-Ersatz ab: Neben der gezielten Marketing Platzierung eines Voll-LED-Scheinwerfers, kann durch die geringere Leistungsaufnahme (Abblendlicht: 68 W Halogen-Glühlampe vs. 20 W LED-Lichtquelle) CO₂ eingespart werden. Um diese Vorteile in dem anstehendem Hochvolumen Markt zu bedienen, ergibt sich die Notwendigkeit eines best-cost Systems sowohl für ein statisches Abblendlicht und Fernlicht als auch gegebenenfalls sogar für ein blendfreies Matrix-Fernlicht-System.

All diese unterschiedlichen Funktionalitäten lassen sich mit Reflektorsystemen realisieren. Dabei können die Erscheinungsformen stark voneinander abweichen, sodass Stylings mit flachen, runden, halogenähnlichen Erscheinungsbildern oder auch stark delokalisierten Lichtflächen die gewünschte Performance bieten.

Im Folgenden wird kurz auf den Aufbau eines Reflektorsystems eingegangen. Anschließend wird der Fokus auf die LED als Lichtquelle gelegt und die Eigenschaften und Anforderungen für zukünftige Einsätze in Reflektoren aufgezeigt.

2. Moderne Reflektorsysteme

Der Aufbau eines LED-Reflektorsystems kann man trotz der hohen Anzahl möglicher Erscheinungsformen auf eine einfache Grundeinheiten zurückführen: neben einem Reflektor sind mind. eine Lichtquelle und ein Entwärmungssystem nötig, sowie ein geeignetes mechanisches Konzept, um mit einer möglichst kleinen Toleranzkette Reflektor und Lichtquelle zu verbinden.

Darüber hinaus entscheiden Design, Bauraumvorgaben, gewünschte Performance und Funktionalität über das passende optische Konzept. Abblendlicht-Reflektoren verlangen z.B. durch eine klar definierte Hell-Dunkel-Grenze (HDG) höhere Anforderungen als reine Fernlicht-Reflektoren. Ebenso wird die Wahl der geeigneten Lichtquelle durch die gewünschte Lichtfunktionalität beeinflusst. So können 4-Chip LED-Arrays in Kombination mit einem 3-Chip LED-Array in einem Doppelkammer-Reflektorsystem wie im aktuellen VW Touran ein Abblendlicht bilden (siehe Bild 1), oder aber 10 einzeln schaltbare LED-Chips erzeugen ein 10-streifiges, blendfreies Fernlicht aus zwei Reflektoreinheiten wie im aktuellen Serienkonzept des Audi TT. Zusammenfassen kann man sagen, dass moderne Reflektoren ein komplexes System darstellen bei dem viele Faktoren zueinander auf die jeweiligen Zielanforderungen abgestimmt werden müssen.



Bild 1: Zwei modern LED-Reflektion-Module, die ein Abblendlicht bzw. Fernlicht erzeugen.

3. Grundlegende optische Konzepte

Bei vielen Reflektorsysteme ist das optische Konzept einfach erklärt: es handelt sich um einen direktabbildenden Reflektor, bei dem die Kante oder das Zentrum der LED abgebildet wird. Wie bei jedem Konzept, ist dabei jedoch entscheidend, welche Vorteile eine bestimmte Ausführung mit sich bringt. So hat [1] gezeigt, dass effiziente Systeme nicht gleichbedeutend

mit einer guten Verteilung des Lichtes auf der Straße sind. Dabei kann die Effizienz im Bereich von 58% für große Reflektorsysteme bis hin zu 22% bei flachen Reflektorausführungen liegen.

Wie in Bild 2 gezeigt, ist die größere Effizienz durch eine kleinere Brennweite des Reflektors mit mehr Licht im Vorfeld verbunden. Der größere Abbildungsmaßstab erzeugt größere Chipbilder, die zwar nominell zur hohen Effizienz des Systems beitragen, aber nicht zur Reichweite. Auch die Positioniergenauigkeit des leuchtenden Chips im Fertigungsprozess im Bereich von $\pm 50\mu\text{m}$ hat unterschiedliche Auswirkungen. Zum einen muss gewährleistet werden, dass durch das mechanische Konzept diese Präzision nicht wieder „vernichtet“ wird. Zum anderen hat je nach gewählter Brennweite eine verschobene Lichtquellenposition unterschiedliche starke Auswirkungen auf die Qualität der Lichtverteilung.

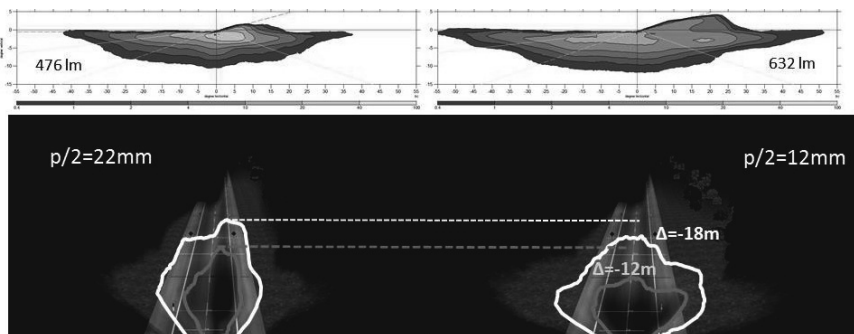


Bild 2: Vergleich der Reichweite auf der Straße zweier Reflektoren mit gleicher projizierter optischer Fläche (60 mm x 60 mm) aber unterschiedlicher Brennweite. Die höhere Reichweite korrespondiert zu dem System mit der größeren Brennweite und verhält sich reziprok zur Effizienz des Systems. Die rechts dargestellte Lichtverteilung erzeugt eine schlechtere Performance auf der Straße, obwohl durch das effizientere System mehr Lichtstrom vorhanden ist; Bild nach [1]

Dieses Beispiel zeigt die bekannte Tatsache, dass das Zusammenspiel zwischen Vergrößerungsmaßstab des Reflektors und Größe der Lichtquelle elementare Auswirkungen hat.

Bei aktuellen Matrix-Konzepten ist die Wahl der Lichtquelle direkt mit der Streifenbreite verknüpft, da dort Reflektoren mit großer Schnittweite genutzt werden. Das optische Konzept

sieht vor, dass benachbarte LED Chips ein gleiches, aber verschobenes Lichtbild ergeben, sodass mehrere Streifen aus einem Reflektor dargestellt werden können.

So werden bei vielen aktuellen Systemen neben 1mm² LEDs auch kleinere 0,5mm² LEDs eingesetzt, um im Zusammenspiel aus verfügbarem Bauraum, Segmentgröße, Lichtstromanforderungen Maxima von über 100 lx zu generieren. Die optische Qualität der Lichtverteilung hängt somit direkt von der Lichtquelle ab.

4. Anforderungen an die Lichtquelle

Der Lichtquelle kommt eine besondere Bedeutung zu. Bei direktabbildenden Systemen aber auch bei auf Reflektoren basierten Projektionsmodulen spiegeln die Eigenschaften der LED direkt die Qualität des Lichts auf der Straße wieder. Dabei gilt es mehrere Punkte zu beachten: zunächst werden optische, anschließend opto-elektrische und mechanische Eigenschaften näher beleuchtet, sowie Anforderungen an die Lichtquelle formuliert.

Lichtstrom:

Gemäß der ECE-Regelung gilt immer noch die gesetzliche Mindestgrenze von 1000 lm unter Typprüfbedingungen für eine LED-Lichtquelle des Abblendlichtes. In naher Zukunft kann diese Grenze mit 3mm² LED-Chips im Dauerbetrieb erreicht werden. Dies kann gerade für die oben angesprochenen best-cost Systeme als Halogenglühlampenersatz eine sinnvolle Lichtquelle darstellen. Für die Lichtquellen bleibt Lichtstrom pro Watt eine entscheidende Größe, da bei zukünftigen Systemen die Energiebilanz des gesamten Scheinwerfers bezüglich der CO₂-Emissionseinsparung an Bedeutung gewinnen wird.

Homogenität der Lichtquelle

Bei vielen Mehrchip-LEDs (LED-arrays), die heute in optischen Systemen eingesetzt werden, wird die Homogenität der leuchtenden Fläche durch Prüfungen bei den LED-Herstellern sichergestellt. Für zukünftige LED-Systeme gewinnt diese Prüfung an Bedeutung, da in aktuellen Konzepten die Lichtverteilungen durch immer weniger LED-Chips realisiert werden. Dies bedeutet, dass sich Schwankungen in der Homogenität zum einen stärker im Lichtstrom, zum anderen stärker in der Homogenität der Lichtverteilung auswirken, da über weniger LEDs gemittelt wird.

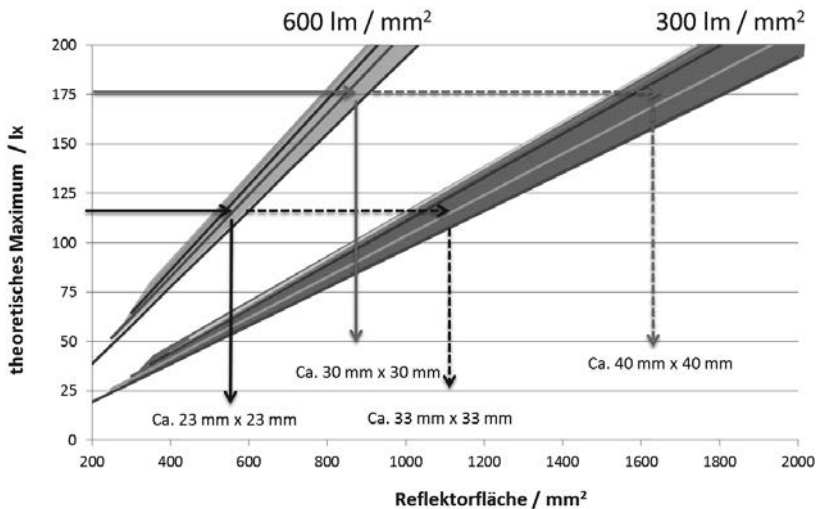


Bild 3: Dargestellt ist das theoretisch, erreichbare Maximum eines optisches Systems (Parabelreflektor mit Abdeckscheibe und Reflektionsverlusten) in Abhängigkeit der Reflektorfläche für zwei unterschiedliche Leuchtdichten (300lm / mm² bzw. 600lm / mm²). Die Streuung der beiden Geraden kommt aufgrund unterschiedlicher Aspektverhältnisse (Breite x Höhe) der Flächen zustande. Es zeigt sich, dass bei doppelter Leuchtdichte, die Hälfte der Reflektorfläche für das gleiche Maximum benötigt wird.

Leuchtdichte:

Die Leuchtdichte ist eine entscheidende optische Eigenschaft der LED Lichtquelle. Mit dem steigenden Lichtstrom ϕ_{LED} pro 1 mm² LED-Chipfläche steigt auch die Leuchtdichte der LED. Entscheidend für das Maximum E_{max} der Lichtverteilung ist zum einen die Leuchtdichte der Lichtquelle mit der Fläche A_{LED} , zum anderen die sichtbare Fläche des Reflektors $A_{Reflektor}$:

$$E_{max} \sim \frac{\phi_{LED}}{A_{LED}} \cdot A_{Reflektor}$$

Das theoretische Maximum einer Lichtverteilung (Parabelreflektor inkl. Abdeckscheibe und Reflektionsverlusten) kann mithilfe des Etendue-Ansatzes beschreiben werden, sodass sich die in Bild 3 dargestellten Abhängigkeiten des Maximums von der Reflektorfläche ergeben. Dabei zeigt sich, dass mit konventionellen LED-Lichtquellen mit ca. 300 lm / mm² mind. eine Fläche von über 1100 mm² benötigt wird, um ein Maximum von ca. 120 lx zu erreichen.

Rechnet man mit ca. 10% mehr Fläche, um die Lichtverteilung auslaufen zu lassen, ergeben sich theoretische Mindestmaße von ca. 35 mm x 35 mm für einen Fernlicht-Spot.

Auf der einen Seite kann mit einer sogenannten Hochstrom-LED (ca. 600 lm / mm²) diese Fläche auf die Hälfte reduziert werden (ca. 25 mm x 25 mm).

Auf der anderen Seite kann bei gleicher Fläche durch eine höhere Leuchtdichte der Lichtquelle ein höheres Maximum erzielt werden. Damit steigert man die Erkennung von Gegenständen in weiten Entfernungen [2,3], und man erhält direkt einen Sicherheitsgewinn. Daher kann eine unterschiedliche Kantenlänge von 1 mm im Vergleich zu 1,1 mm zweier LEDs mit jeweils vergleichbaren 300 lm Lichtstrom zu einem Unterschied im Bereich von ca. 20% im Maximum führen. Diese Überlegungen gelten nicht nur speziell für Reflektorsysteme sondern für Optiken allgemein, so dass bei LEDs nicht nur die Kenngröße *Lumen* sondern auch *Lumen pro Fläche* eine entscheidenden Rolle bei der Wahl der LED für das optische System spielt.

Charakteristik der LED Kante:

Hierbei gibt es zwei Aspekte zu beachten, die die Lichtverteilung beeinflussen: Zum einen der Gradient der Kante, zum anderen das Streulicht in der Nähe der Kante im Dunkelbereich der LED. Daher muss man bei der recht häufigen Sprechweise „Kontrast der LED“ aufpassen, wie dieser genau definiert ist.

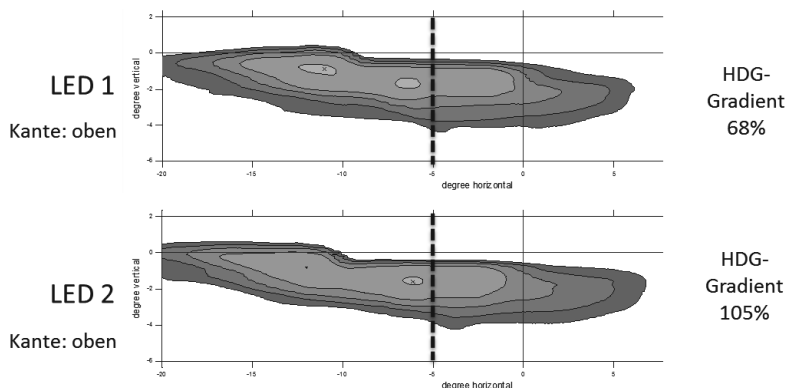


Bild 4: Beispielhafte Teil-Lichtverteilung eines Serienreflektors mit zwei LEDs, die sich in Ihrer Flankensteilheit unterscheiden, siehe Bild 5. Der HDG-Gradient wurde exemplarisch bei -5° H (schwarz gestrichelt Linie) bestimmt und unterscheidet sich um 30%.

Tabelle 1: Experimentelle Untersuchung der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) anhand einer Teil-Lichtverteilung eines Duroplast-Serienreflektors. LED 1 und 2 unterscheiden sich in ihrer Flankensteilheit, siehe Bild 5a). Der Kontrast, der größtenteils das Streulichniveau widerspiegelt, hat keinen Einfluss auf den HDG-Gradienten.

Kontrastlevel	Position der LED-Kante	gemessener HDG-Gradient [%]	
		LED 1	LED 2
1000	unten	80	100
200	links	68	114
100	oben	68	105
100	rechts	-	111

Die im Folgenden gezeigten experimentellen Untersuchungen an einem Duroplast-Serienreflektor zeigen diesen Sachverhalt näher. In dem Versuch wurden zwei verschiedene LEDs hinsichtlich ihrer Kontraste an allen vier Kanten charakterisiert, siehe Tabelle 1. Der Kontrast ist definiert als Verhältnis L_1/L_2 . Der arithmetische Mittelwert von Zone 1 definiert L_1 . Die rechteckigen Abmessungen von Zone 1 sind so gewählt, dass alle Leuchtdichtewerte, die mind. 10% oder mehr vom 98%tigen Perzentil der gemessenen Leuchtdichte betragen, enthalten sind. Die Grenze von Zone 2 beginnt in einem Abstand von 0,2mm parallel zu Zone 1 und ist in senkrechter Richtung um das 1,5fache symmetrisch vergrößert. Der arithmetische Mittelwert von den 1% der höchsten Leuchtdichtewerten in Zone 2 definiert L_2 . [4]

Die Messungen zeigen, dass sich ein Faktor 10 zwischen dem Kontrast der guten Kante „unten“ und den schlechteren anderen Kanten ergibt. Anschließend wurden alle vier Kanten in den Fokus des Reflektors verbaut und die jeweiligen Lichtverteilungen vermessen. Der Gradient der HDG ist für alle Lichtverteilungen bei -5° Horizontal ausgewertet worden, siehe Bild 4 für einen exemplarischen Vergleich der Lichtverteilungen von LED 1 und LED 2. Die Zusammenfassung der Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt und zeigen eindeutig, dass der so definierte Kontrast keinen Einfluss auf den Gradienten der HDG hat. Vielmehr wird deutlich, dass LED 1 insgesamt einen deutlich schlechteren HDG-Gradienten aufweist. Als entscheidende Eigenschaft der LED hat sich der Gradient der LED-Kante herausgestellt. Dargestellt ist diese Flankensteilheit der beiden LEDs in Bild 5a) durch den Schnitt eines Leuchtdichtebildes.

Definiert man die Flankensteilheit über den Abstand von $L_{10\%}$ zu $L_{70\%}$ der maximalen Leuchtdichte, sollte dieser für 1mm^2 LEDs unter $0,1\text{mm}$ liegen, um eine gute HDG zu erzeugen. Im gezeigten Experiment, unterscheidet sich der Gradient der HDG um bis zu 30%, wenn der Flankensteilheit, definiert über den Abstand von $L_{10\%}$ zu $L_{70\%}$, von $0,08\text{mm}$ auf $0,13\text{mm}$ ansteigt.

Gradient / Flankensteilheit

Für eine gute Reichweite auf der Straße muss das Maximum der Lichtverteilung nahe an der HDG liegen, somit kommt - auch um eine gute Einstellbarkeit im Produktionsprozess zu garantieren - dem Gradient der HDG eine bedeutende Funktion zu. Dieser hängt neben dem gesamten optischen System auch vom Gradient der Lichtquelle ab.

Der Gradient der LED kann jedoch nicht direkt auf den Gradienten der HDG übertragen werden. Die optische Übertragungsfunktion ist komplex und stark vom optischen System abhängig. Jedoch gilt: je steiler die Flanke an der LED-Kante, desto höher kann der Gradient der HDG sein.

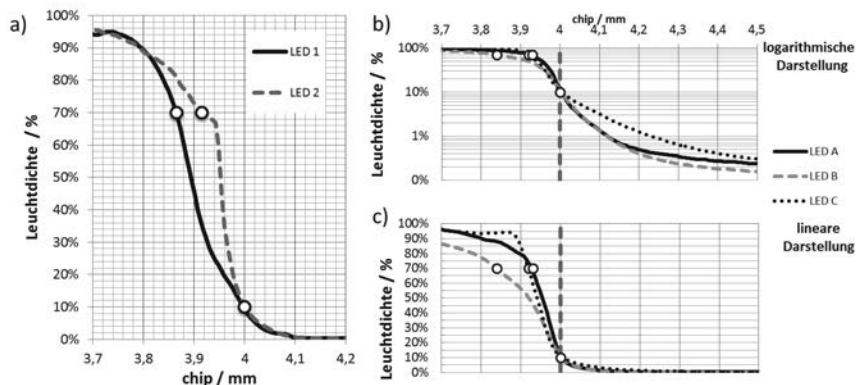


Bild 5: a) Schnitt durch Leuchtdichtebild von zwei verschiedenen LEDs zur HDG-Untersuchung (LED 1 und 2); normiert auf ihren Maximalwert L_{\max} . Die Flankensteilheit, definiert über den Abstand von $L_{10\%}$ zu $L_{70\%}$ der maximalen Leuchtdichte, sollte für 1mm^2 LED unter $0,1\text{mm}$ liegen, um eine gute HDG zu erzeugen. In Ausschnitt b) und c) erkennt man in einer linearen und logarithmischen Darstellung der LEDs A, B und C, dass eine gute Kantensteilheit ebenfalls mit einem geringen Streulichtanteil einhergehen muss; LED C hat eine zu hohe Intensität nahe der LED-Kante, und verursacht in der Applikation zu starke Blendwerte.

Streulicht

Licht, das außerhalb des abgebildeten LED-Chips liegt, führt zu zusätzlicher Blendung. Das gilt für Abblendlichter, aber auch bei Matrixsystemen. Dabei ist zu beachten, dass zur Beschreibung ein einfaches Kontrast-Verhältnis unter Umständen nicht ausreicht. Das für die zukünftige ECE-Regelung 128 für weiße LED-Lichtquellen für Frontscheinwerfer diskutierte Verhältnis von 200:1 [4] bzw. in [5] vorgeschlagene Verhältnis von 250:1 für einen ausreichend guten Kontrast, bedeutet, dass bei steigender Leuchtdichte der Lichtquelle (siehe Kap. 5), ebenfalls der absolute Beitrag aus dem Streulichtbereich der Lichtquelle steigt. Dies führt, gerade in Hinblick auf größer werdende Abbildungsmaßstäbe, zu einer Anhebung des Streulichts in den Dunkelbereichen.

Insbesondere bei Streifenfernlichtern, wo maximal 1 lx Streulicht im Schattenbereich nach den ECE-Richtlinien gesetzlich erlaubt ist, kann dies zu einer veränderten Bestromung und Schaltung der einzelnen Segmente führen. Dies könnte somit direkt zu einer eingeschränkten Nutzung des optischen Systems führen und Performanceeinbußen durch einen erhöhten Blend-Sicherheitsbereich bedeuten.

Farbe:

Bei der Farbe von weißen LED spielen verschiedene Aspekte eine Rolle. Zum einen wie sich die Farbe über den Abstrahlwinkel ändert. Um in der Applikation innerhalb des ECE-Weißfeldes zu bleiben, sind nach heutigem Stand der Technik üblicherweise maximale Änderungen zwischen 0° und 70° von $\Delta C_x < 0,03$ und $\Delta C_y < 0,04$ einzuhalten. Hier nicht unerwähnt bleiben soll, dass bei Reflektoren zusätzlich die Farbe über den Ort eine entscheidende Rolle spielen kann. Unterscheidet sich die Farbe der Kante von der Farbe der Mitte des Chips ergeben sich unter Umständen Farbsäume an den Rändern der Lichtverteilung. Dies gilt sowohl bei Einzel-LEDs als auch bei LED-arrays und kann gerade an einer Hell-Dunkel-Grenze zum Vorschein treten.

Für Anwendungen bei Signalfunktionen ist dieser Farbe über Ort-Effekt in entsprechenden Reflektorsystemen noch ausgeprägter.

Opto-elektrische Eigenschaften:

Diverse elektrische Eigenschaften beeinflussen das Gesamtsystem „Reflektor“. Der Vollständigkeit wird hier nur kurz ein wichtiger Zusammenhang aufgeführt: Der Lichtstrom der LED ist ein Zusammenspiel aus Leistungsaufnahme (also angelegter Strom sowie die Vorwärtsspannung) und Temperatur T (also Entwärmungssystem). Maßgeblich für die Entwärmung des LED-Chips ist der thermische Widerstand R_{th} des Bauteils in Kombination

mit dem Gesamtsystem aus Kühlkörper, Anbindung der LED an das Kühlsystem. Dies bedeutet entweder eine PCB bei gelöteten SMD Bauteilen oder aber bei plug-and-play Lösungen die Kontaktfläche zum Kühlkörper. Das Gesamtsystem muss so dimensioniert werden, dass bei gewissen Umgebungstemperaturen und Lastfällen im Scheinwerfer, der gewünschte Lichtstrom emittiert wird. Gerade für Ströme jenseits der $1,5\text{A/mm}^2$ muss das LED-Package ebenfalls geeignet sein durch einen guten R_{th} die entstehende Wärme gut abzuführen.

Mechanische Eigenschaften:

Die Anbindung der LED an das weitere mechanische System hat neben den thermischen Aspekten auch noch Auswirkungen auf die Genauigkeit der LED-Position. Je nach genutzter Bestückungstechnologie und mechanischem Konzept des Gesamtsystems wird in Zukunft eine Einstellungsmöglichkeiten an einzelnen Modulen ein wirtschaftlich nicht mehr zu rechtfertigendes Konzept darstellen. Somit sind geringere mechanische Toleranzen des leuchtenden LED-Chips innerhalb der LED-Lichtquelle ein zwingende Voraussetzungen für best-cost Systeme.

Geringe Toleranzen innerhalb des LED-Packages können daher zu einem wichtigen Parameter der Lichtquelle werden.

5. Potenzial und Risiken neuer Lichtquellen

Neue Lichtquellen wie ein LASER zeichnen sich durch eine hohe Leuchtdichte aus. Da der Lichtstrom bisher nicht an das Niveau von LEDs heranreicht, kann ein Hybrid-System die aktuellen Stylingüberlegungen von immer kleineren Lichtaustrittsflächen ermöglichen. Dabei könnte die Gefährdung durch blaues kohärentes Laserlicht jedoch einen nicht zu vernachlässigender Kostennachteil bedeuten.

Die Kosten stehen auch im Mittelpunkt, wenn über eine standardisierte Lichtquelle gesprochen wird. Hier könnten die geringeren Entwicklungskosten ein Schlüssel zum Halogenleuchtampen-Ersatz sein.

Jedoch sollte durch das festgelegte opto-mechanische Konzept mit einer standardisierten mechanischen Anbindung nicht die Freiheit im Styling unterbunden werden. Auch dürfen die hohen Anforderungen an die mechanischen Toleranzen des Systems nicht vernachlässigt oder aufgeweicht werden.

6. Fazit und Zusammenfassung

Zusammenfassend ergibt sich ein positives Bild für aktuelle und zukünftige Reflektorsysteme. Die Performance der Reflektorsysteme ist von einem ausbalancierten Verhältnis mehrere Faktoren abhängig wie z.B. Brennweite, optische Effizienz oder passender LED-Lichtquelle. Insgesamt steigen die Anforderungen an die Komponenten des Systems, wobei die LED-Lichtquelle das Gesamtsystem „Reflektor“ maßgeblich beeinflusst. Dabei können mit steigenden Leuchtdichten der Lichtquelle, die optischen Flächen bei bestimmten Lichtfunktionen verkleinert werden. Jedoch steigen im gleichen Maße die Anforderungen an die LED-Lichtquelle. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass die Flankensteilheit der Leuchtdichte direkt mit dem Gradienten der Hell-Dunkel-Grenze verknüpft ist. Auch spielen neben optischen Eigenschaften wie Homogenität der leuchtenden Fläche und Farbeffekte, mechanische Toleranzen der Bauteile eine immer größere Bedeutung.

Insgesamt steckt in LED-Reflektorsystemen noch viel Potenzial, hinsichtlich effizienter „high end Systeme“ aber auch CO₂ Ersparnis des Scheinwerfers, sollten Halogenglühlampen-Reflektoren durch best-cost LED Systeme abgelöst werden. Dieses lässt sich nur durch ein optimal abgestimmtes Gesamtsystem, das mit viel technischem Know-how verknüpft ist, realisieren, sodass klar wird, dass Reflektoren Hightech Produkte sind.

7. Literaturangaben

- [1] Scholl M., Free Fall of LED System Efficiency – Performance Evaluation of current LED, ISAL 2015 Proceedings, S. 739-747.
- [2] Rosenhahn, E.-O., Albrecht K. F., Laser based Headlamp Range Extender: Hype or useful Feature for the Driver ? Vision Proceedings 2014.
- [3] Albrecht K. F., Rosenhahn, E.-O., Laserperformance im Fernlicht - eine experimentelle Analyse von Reichweite und subjektiven Fahrerlebnis, VDI "Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik" 2016.
- [4] Die Kontrastdefinition lehnt sich an den noch unveröffentlichten Vorschlag der GTB LED taskforce für LED-Lichtquellen für Frontscheinwerfer in der ECE-Regelung 128 an.
- [5] Moisel J. Requirements for future high resolution ADB modules, ISAL 2015 Proceedings, S. 161-169.

Zweckmäßige Einstellgenauigkeit moderner LED-Scheinwerfer

Vergleich zwischen Mensch und Maschine

Appropriate Accuracy of LED- Headlight Adjustment Processes

Comparison between the human eye and machines

M. Sc. **Alexander Greil**, Dipl.-Ing. **Bernd Eichinger**,
B. Sc. **Wolfgang Kriener**,
ZKW Lichtsysteme GmbH, Wieselburg

Abstract

LED-technology delivers extensive possibilities in headlight development processes, which allow new functionalities like glare-free high-beam or various aspects in design. Responsible for that are reduced optical elements in combination with concentrated LED luminance, because a “scalable” light source is provided by using not just one source (e.g. halogen bulb) but multiple LED sources with a small package. These developments lead into high requirements in the positioning of the light source(s), the alignment of light modules to each other and the adjustment of headlight within the vehicle.

Automatic and manual cut-off line adjustment results are used to discuss the technical need for an improvement of accuracy. The base of this analysis is an empirical study. It contains the adjustment of different light distributions to highlight the performance of the human eye in dependence of different influences like the gradient of the cut-off line. The results mark the automatic adjustment system to be about 4 times more accurate than the human eye.

1. Einleitung

Komplexe Lichtsysteme mit immer kleiner werdenden Lichtsegmenten gewinnen zusehends an Bedeutung. Damit gehen steigende Anforderungen an entsprechende Prüfanlagen zur Absicherung der Qualität von Serienteilen einher. Ein wesentlicher Bestandteil solcher Systeme ist die Ausrichtung diverser Teiloptiken, einzelner Module zueinander und des gesamten Scheinwerfers. Ein Prozess der häufig zur Anwendung kommt, ist die Einstellung der HELL-DUNKEL-GRENZE (HDG). Dieser Vorgang hat maßgeblichen Anteil daran, dass Blendung

im Straßenverkehr vermieden wird. Um diesen Sicherheitsaspekt im Laufe eines Fahrzeuglebens aufrecht zu erhalten sind manuelle Neuausrichtungen des Lichtbildes unerlässlich. Im Anbetracht dessen untersucht diese Arbeit die Fähigkeiten des menschlichen Sehapparates bezüglich Knickpunktfindung und vergleicht diese mit einschlägigen Prüfsystemen. Um eine Aussage über die Leistungsfähigkeit des Auges zu gewinnen, wurde eine empirische Studie durchgeführt, welche die Wiederholgenauigkeit der manuellen Einstellung unter Variation des Härtegrades untersucht. Der Vergleich zwischen Mensch und Maschine soll zeigen, dass es nicht möglich ist eine maschinelle Knickpunkteinstellung mit manueller Justierung zu übertreffen.

2. Automatisierte Einstellsysteme

Messsysteme, die dazu befähigt sind gesetzliche Werte eines Scheinwerfers zu ermitteln, weisen Eigenschaften auf, die eine Beschränkung hinsichtlich der Verwendung in Produktionsumgebungen nach sich ziehen. Ein Beispiel ist die Kombination aus Photometerkopf und Goniometer, das Standardverfahren zur Durchführung gesetztesrelevanter Analysen. Die Einhaltung der Messentfernung, die zeitaufwendige Rasterabtastung der Lichtverteilung und die Anschaffungskosten tragen dazu bei, dass sich andere Messsysteme etabliert haben, die sich effektiv in Montageprozesse eingliedern lassen. Eigenschaften solcher Prüfanlagen sind eine kompakte Bauweise (resultiert aus der Verwendung einer Fresnellinse) und die taktzeit- bzw. kostenreduzierte Sensorauswahl. Die Methoden des Produktkontrollsystems weisen zwar bei absoluten Messungen reduzierte Genauigkeiten auf, erlauben jedoch in gewissem Maß eine geometrische Bewertung und die Ausrichtung des Lichtbildes.

Die Verfolgung der HDG während des Einstellvorganges und die Kontrolle der geometrischen Eigenschaften stellen also die größten Herausforderungen dar. Damit einhergehend sind Entwicklungen im Bereich der Bildverarbeitung, die hauptsächlich darauf abzielen hohe Genauigkeit (trotz fehlerbehafteter Abbildung (Fresnellinse) und suboptimaler Aufnahme (low-cost Sensorsystem)) bei kurzer Prüfzeit zu gewährleisten. Viele Algorithmen, die in diesem Bereich Anwendung finden nutzen einzelne oder mehrere linienförmige Bildausschnitte um geometrische Elemente in Lichtverteilungen aufzuspüren.

3. Manuelles Einstellsystem

Bei der manuellen Einstellung der HDG spielen die Empfindungen des menschlichen Sehapparates eine wichtige Rolle. Diesbezüglich ist es wichtig zu wissen, dass die Fähigkeiten des Auges hinsichtlich der Wahrnehmung von feinen Kontrastunterschieden beschränkt sind. Die Informationsaufnahme geschieht grundsätzlich über Rezeptoren (Stäbchen und

Zapfen) auf der Netzhaut. Im Dunkelbereich tragen rein Stäbchen zur Gewinnung von relativen Helligkeitsunterschieden bei. Zapfen hingegen liefern entsprechende Informationen, wenn tageslichtähnliche Lichtverhältnisse herrschen. Im Segment zwischen den beiden Grenzen kommt es zu einer Symbiose zwischen den Rezeptorarten [1]. Für die Durchführung der Probandenstudie ist es essentiell zu wissen, wie lang das Auge braucht um sich auf dunkle Lichtverhältnisse einzustellen. Eine subjektive Bewertung des Lichtbildes macht nur dann Sinn, wenn das Auge auf Nachtsicht ausgerichtet ist, weil auch Scheinwerfer in diesen Lichtverhältnissen arbeiten. Nach Arecchi et al. [2] benötigt das Auge rund 30 Minuten, um eine Dunkeladaption vorzunehmen.

4. Durchführung der empirischen Studie

Ziel der Studie ist es herauszufinden, wie genau der Mensch eine HDG einstellen kann. Die Komplexität der manuellen Ausrichtung wird deutlich, wenn der Umfang an Einflussfaktoren betrachtet wird:

- **Schärfe des Hell-Dunkel-Überganges (Härtegrad)**
- Intensität der Lichtquellen und Position des Lichtschwerpunktes
- Form der Lichtverteilung (Geometrie der Asymmetrie)
- Art der Lichtquelle und anderer lichttechnischer Komponenten
- Farbliche Einflüsse entlang der HDG
- Deformation des Überganges
- Adaptionfähigkeit des Auges
- Subjektive Wahrnehmungsunterschiede
- ...

Die Evaluierung der markierten Position bzw. die Analyse ihrer Auswirkung auf die HDG-Findung entspricht dem Hauptziel dieser Studie.

Die Lichtverteilung wird definiert und über die gesamte Versuchsreihe hinweg konstant gehalten. Da die Auswirkungen variierender Härtegrade auf die Einstellgenauigkeit festzustellen sind, werden 4 identische Lichtmodule mit unterschiedlichen Linsen ausgestattet. Zusätzlich erweitern 4 programmgenerierte Projektorlichtverteilungen das Härtegradspektrum der Probandenstudie, wobei die geometrischen Eigenschaften mit denen der Modulabbildung übereinstimmen. Eine Korrelation zwischen Projektor- und Moduleinstellungsergebnissen würde bedeuten, dass das Auge nicht zwischen den Projektionsarten unterscheidet. Beide Lichtquellen divergieren in ihrer Intensität. Eine Dimmung der Module verringert diesen Effekt, ohne jedoch einen vollständigen Abgleich zu erzielen. Die Intensitätsannäherung erfolgt

unter Berücksichtigung der gesetzlichen Untergrenzen für die Lichtstärke. Die folgende Tabelle zeigt die erzielten Gradientenwerte.

Tabelle 1: Härtegradverteilung der einzustellenden Modul- und Projektorlichtverteilungen

Module					
0,17	0,18	0,26	0,30		
		0,26	0,30	0,35	0,40
Projektor					

Das Laborequipment für die Versuchsreihen umfasst ein Goniometer mit Joystick und automatisch verstellbarem Goniometertisch sowie einen Photometerkopf zur Überwachung der Lichtintensitäten.

Die HDGs aller Lichtquellen werden mit dem Knowhow des Laborpersonals grob zueinander eingestellt, wenngleich eine absolute Ausrichtung nicht Ziel der Versuchsreihe ist. Wesentlicher Inhalt ist die Untersuchung der Wiederholgenauigkeit. Eine grobe Zueinander-Einstellung ist für die Betrachtung der temporalen Gegebenheiten unerlässlich. Aus diesem Grund liegt die Startposition jeder Benutzereinstellung bei H/V $-2^{\circ}/-2^{\circ}$. Essentiell für eine korrekte Darstellung der Lichtverteilungen ist die Kalibrierung der Referenzposition, deren Wechsel viel Zeit in Anspruch nimmt und so den Flaschenhals des organisatorischen Ablaufes ausmacht. Die Visualisierung in Bild 1 zeigt die Studiumgebung im Lichtlabor mit einem Probanden vor dem Goniometer und einer Projektionswand im Hintergrund.

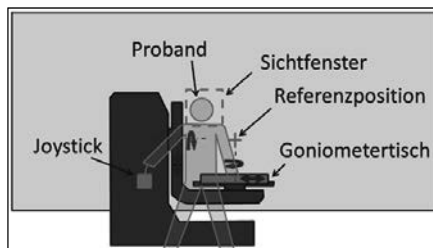


Bild 1: schematische Darstellung des Versuchsumfeldes

Der Ablauf selbst beinhaltet zuerst die Einstellung der 4 Lichtmodule bevor die Projektor-Lichtverteilungen auszurichten sind. Weil die Module jeweils sehr kurz eingeschalten sind, kommt es nicht zu Beeinflussungen aufgrund thermischer Belastungen. Der Wechsel der

Lichtverteilungen am Projektor ist mit geringem Zeitaufwand verbunden, da auch die Referenzposition nicht zu wechseln ist. Temperatureinflüsse sind demnach wiederum sehr gering. Zur Vorbereitung der Studienteilnehmer wird eine 30 minütige Adaption des Sehapparates, bestehend aus einer Ruhephase in der Dunkelkammer gefolgt von einem Verweilen im Labor zur Gewöhnung an die Goniometer-Handhabung durchgeführt. Insgesamt dient diese Eingewöhnungszeit dazu, die ausgewiesenen Adaptionskriterien zu erfüllen [2].

5. Ergebnisse der Probandenstudie

Die Auswertung der Einstellergebnisse nimmt zunächst auf die aufgenommenen Personeninformationen Bezug. Während die Verwendung einer Brille bzw. von Kontaktlinsen nachweislich keinen Einfluss nimmt, sind die Einstellversuche erfahrener Probanden geringerer Variation unterworfen. In Bild 2 wird die Gesamtabweichung (horizontal und vertikal) vom Mittelwert der Lichtverteilung über die normierte probandenspezifische Einstelldauer dargestellt. Es geht hervor, dass die relative Verfahrenszeit der 20 genauesten Einstellversuche personenübergreifend exakt mit der durchschnittlichen Einstelldauer übereinstimmt (schwarze vertikale Linie). Im Gegensatz dazu liegen die 20 ungenauesten Einstellversuchen über der durchschnittlichen Ausrichtungszeit (Faktor etwa 1,15 (graue vertikale Linie)).

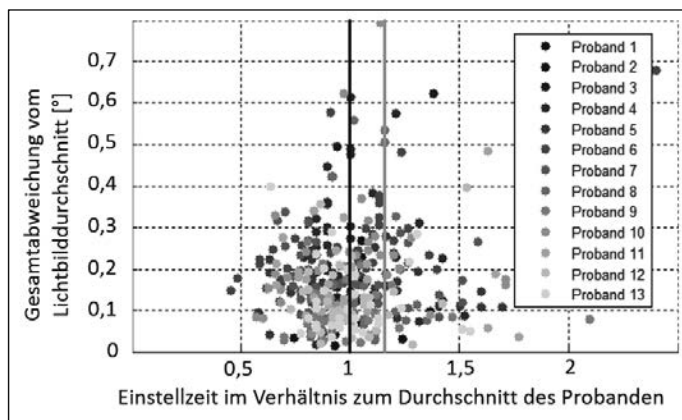


Bild 2: Einstellabweichung über die relative probandenspezifische Einstellzeit

Bild 3 lässt erkennen, dass die Streuung der Einstellversuche mit fallendem Härtegrad zunimmt. Die Diskrepanz ergibt sich aus der Differenz der 25 bzw. 75 % Quantilen aller lichtverteilungsbezogenen Konfigurationen. Die Zunahme bei einer Härtegradreduktion von 0,1

beträgt ca. $0,1^\circ$. Bei der Gegenüberstellung der Resultate ist zu sehen, dass die vertikale Streuung signifikant geringer ausfällt als die Horizontale. Dies ist vor allem dem Umstand geschuldet, dass die Geometrie der Lichtverteilungen in vertikaler Richtung stärker ausgeprägt ist. Der Unterschied zwischen Projektor- und Modullichtverteilungen geht ebenfalls sehr deutlich aus dem Diagramm hervor. Projektorlichtverteilungen sind einer höheren Streuung unterworfen, was hauptsächlich auf den Intensitätsunterschied (der Projektor erreicht ca. die Hälfte der Modulintensität) aber auch auf die Verschiedenartigkeit der lichttechnischen Komponenten zurückzuführen ist. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Projektoren bei der Überprüfung automatischer Einstellsysteme zur Simulation unterschiedlicher HDG-Geometrien nicht zulässig.

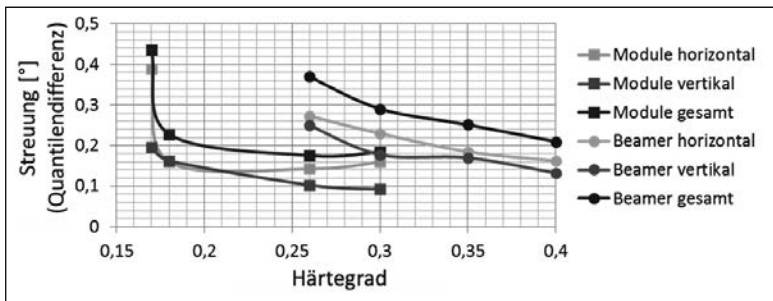


Bild 3: Streuung der Probandeneinstellerggebnisse bei entsprechendem Härtegrad

Ein nicht unwesentlicher Aspekt, der im Streuungsdiagramm zu erkennen ist, beinhaltet den starken Anstieg im unteren Bereich der Härtegradskala. Die zur Schärfereduktion verwendete Linse weist prägnante Mikrostrukturen auf, die zu einer Aufweichung der HDG führen.

6. Vergleich zwischen Mensch und Maschine

Eine weitere Auswertung (Bild 4) stellt die vertikalen Einstellerggebnisse der besten Probandenausrichtungen (linker Balken) mit der gleichen Anzahl (insgesamt 25) zufällig gewählter Programmresultate (rechter Balken) gegenüber. Bei dieser Messung wurde die seriennahe Modullichtverteilung mit einem Härtegrad von 0,3 herangezogen. Die MSA1-Abmaße (Toleranzgrenzen [3]) beider Datenquellen unterscheiden sich etwa um den Faktor 4. Die Parametrierung des Analysealgorithmus ist der Charakteristik des zu verarbeitenden Lichtbildes optimal angepasst. Auch die Informationsgewinnung des Prüfsystems erfolgt fernab der herkömmlichen Einsatzumgebung (Fertigungshalle) unter Laborbedingungen.

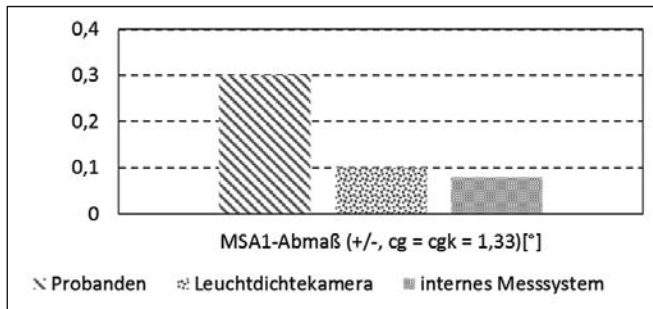


Bild 4: MSA1-Bewertung der vertikalen Probanden-, Prüfsystem- und Leuchtdichtekameraergebnisse

Wie im Diagramm zu sehen ist, erreicht das ZKW-interne Messsystem Genauigkeitswerte, die bei idealer Konfiguration und optimalen Prüfbedingungen, methodisch-vergleichbare Messungen mittels Leuchtdichtekamera übersteigen. In beiden Fällen tragen 20 Schnitte pro Messung zur Ermittlung der vertikalen HDG-Position bei, was einer gewissen Annäherung des Prüfprozesses entspricht.

7. Fazit

Aus den Ergebnissen ist abzuleiten, dass die Fähigkeit des menschlichen Sehapparates weit unter der Performance des aktuell verwendeten HDG-Findungssystems liegt. Die erzielten Genauigkeiten des maschinellen Einstellprozesses können von Personen nicht erreicht werden. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse von Leuchtdichtekamera und internem Messsystem offenbart die Vorteile, die durch den zielgerichteten Einsatz moderner Bildverarbeitung zu erreichen sind.

8. Literatur

- [1] G. Schröder, H. Treiber: *Technische Optik* 10. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag, 2007
- [2] A. V. Arecchi, T. Messadi, R. J. Koshel: *Field Guide to Illumination*. Washington Bel-
lingham: SPIE press, 2007
- [3] Verband der Automobilindustrie: *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Prüfprozesseignung 2*. Vollständig überarbeitete Auflage. Frankfurt: Henrich Druck und Medien GmbH, 2011

Ambiente Innenraumbeleuchtung und Aufmerksamkeitslenkung in Fahrzeugen

Maximilian Barthel, Sebastian Thomschke,
Dr. **Gunnar Koether**, Volkswagen AG, Wolfsburg;
Prof. Dr. **Cornelius Neumann**, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Lichttechnisches Institut (LTI), Karlsruhe

Kurzfassung

In zukünftigen Fahrzeugen kann die ambiente Innenraumbeleuchtung mit vollkommen neuen Funktionen belegt werden. Die vorliegende Studie befasst sich mit Konzepten zur weiteren Fahrerunterstützung. Mittels Lichtfunktionen soll die Aufmerksamkeit des Fahrers gewonnen und richtungsabhängig gelenkt werden.

In einer ersten Probandenstudie im Fahrsimulator wird eine 180° den Fahrer umgebene ambiente Innenraumbeleuchtung betrachtet. Dabei wird die Aufmerksamkeitsgewinnung mithilfe vier verschiedener Lichtmodalitäten untersucht und deren Wirkung in Abhängigkeit von verschiedenen Nebenaufgaben analysiert. Als Lichtmodalitäten werden Farbänderung, Helligkeitsänderung, Blinklicht und Lauflicht in der ambienten Innenraumbeleuchtung auf deren periphere Wahrnehmung während der Fahrt untersucht und mit allgemeinen Annahmen aus der Wahrnehmungspsychologie verglichen. Um möglichst viele und später realistische Nebenaufgaben betrachten zu können, werden drei verschiedene Beanspruchungen für den Fahrer gewählt. Diese unterteilen sich in eine visuelle, eine motorische und eine kognitive Aufgabe.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Lichtmodalität Helligkeitsänderung die schnellsten Reaktionszeiten hervorgebracht hat und die Lichtmodalität Lauflicht subjektiv am positivsten bewertet wurde.

Abstract

In future vehicles, totally new functions can be assigned to ambient interior lighting. The present study addresses concepts for additional driver assistants. Using light functions, driver's attention should be attracted and directed.

A first study with test persons in the driving simulator investigates an ambient interior lighting that surrounds the driver by 180°. The attention attraction is analysed by examining four light change modalities and their respective interaction with different secondary tasks. The four light change modalities are colour changes, brightness changes, flashing light and movement change of the ambient interior lighting. They are evaluated for their peripheral perception in the automotive context and are compared to general assumptions of perceptual psychology. In order to simulate realistic outside influences and distractions of the driver, three different secondary tasks have been selected. They comprehend a visual, a motoric and a cognitive task.

Two major results are that brightness change exhibits the shortest reaction time and movement change receives the most positive subjective ratings.

1 Einleitung und Hintergrund

Die LED-Technologie hat viele neue technische und Designmöglichkeiten in der automobilen Lichttechnik hervorgebracht. Mit der Zeit haben diese Veränderungen auch Einzug in den Fahrzeuginnenraum gehalten. Ambiente Beleuchtung auf Basis von LED wird mehr und mehr zum Standard.

Heutzutage dient die Innenraumbeleuchtung der Orientierung im Fahrzeug. [1, 2] Eine weitere Funktion dieser Beleuchtung ist es, das Design des Fahrzeuginnenraumes aufzuwerten und zu individualisieren. Aufgrund der verwendeten Leuchtdichten ist eine dauerhafte Sichtbarkeit dieser Beleuchtung allerdings auf die Nachtfahrt beschränkt. Diese Arbeit ist Teil einer Untersuchung, um über die bestehende Nutzung hinaus weitere Funktionen der ambienten Innenraumbeleuchtung zu generieren und zu untersuchen.

Die Anzahl der Fahrerassistenzsysteme steigt und sie werden in Zukunft immer mehr Verbreitung in allen Fahrzeugklassen finden. Sie dienen der Entlastung des Fahrers und der Verkehrssicherheit. [3] Die Systeme werden immer leistungsfähiger. Ist eine Unterstützung sowohl in Längs- als auch in Querführung gegeben und der Fahrer muss nicht überwachen, spricht man von einer hochautomatischen Fahrt. Die hochautomatische Fahrt ordnet sich

zwischen der teilautomatischen und der vollautomatischen Fahrt ein und ist die erste Automationsstufe, in der der Fahrer keine Überwachungsaufgabe mehr übernehmen muss, siehe Bild 1.

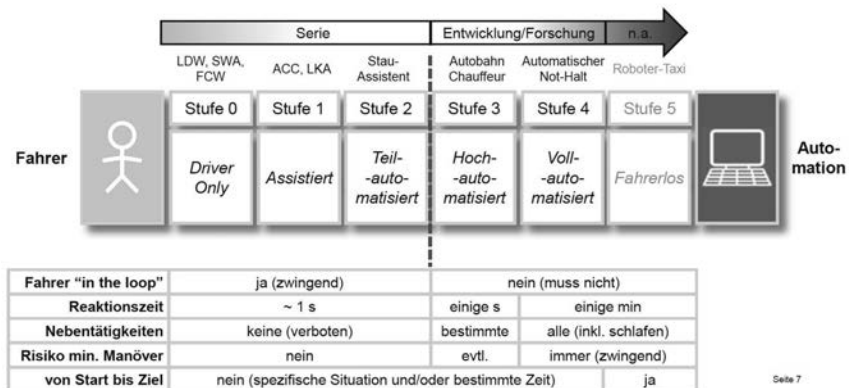


Bild 1: Definition der Stufen zum automatisierten Fahren (VDA Arbeitskreis Automatisiertes Fahren [23])

In dieser Stufe sind bestimmte Nebentätigkeiten, beispielsweise erweiterte Funktionen im Fahrzeuginfotainment während der Fahrt zulässig. Der Fahrer hat laut Begriffsdefinition der Bundesanstalt für Straßenwesen eine ausreichende Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe nach einer automatischen Fahrt. [4]

Dieser Übergang vom automatischen in den manuellen Fahrmodus kann durch eine Änderung der Innenraumbelichtung unterstützt werden. Weitere Anwendungsfälle sind beispielsweise das Erklären von bevorstehenden oder durchgeführten Fahrmanövern während der automatischen Fahrt oder die Anzeige von Warnungen in manuell gefahrenen Situationen. Durch eine Lichtänderung in der ambienten Innenraumbelichtung soll in diesen Fällen die Aufmerksamkeit des Fahrers von seiner Nebenaufgabe gelöst und gezielt gelenkt werden.

Diese Studie dient zur Untersuchung der Wirkung verschiedener Lichtmodalitäten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Nebenaufgaben und soll somit die Grundlage für die Entwick-

lung einer neuen ambienten Lichtfunktion im Fahrzeuginnenraum bilden. Hierbei erfolgt die Wahrnehmung einer Lichtänderung typischerweise nicht nur im fovealen sondern verstärkt auch im peripheren Bereich des Blickfeldes, wodurch das periphere Sehen eine grundlegende Fragestellung einnimmt. So ist zu überprüfen, ob die Grundlagen aus der Wahrnehmungspsychologie auch im automobilen Innenraum und unter Verwendung der ambienten Innenraumbeleuchtung Anwendung finden können. Es wird angenommen, dass eine Bewegungsänderung in der Peripherie am besten und eine Farbänderung in der Peripherie am schlechtesten wahrgenommen wird. [5 bis 8] Diese Annahmen werden durch eine Probandenstudie im Folgenden untersucht.

2 Aktueller Testaufbau

Die ersten grundlegenden Untersuchungen werden in einem statischen Fahrsimulator durchgeführt, so können erste Erkenntnisse unter reproduzierbaren Bedingungen gewonnen werden. Die Fahrbahnansicht wird auf Leinwand dargestellt, dabei wird auf die Vermeidung von Störlichtquellen geachtet, die Projektion auf der Leinwand stellt eine Umgebungsbeleuchtungssituation ähnlich einer Nachtfahrt her. Die Sitzkiste ist so aufgebaut, dass sie einen vorderen Fahrzeuginnenraum nachstellt und über alle Eigenschaften verfügt, um sie an einem Fahrsimulator betreiben zu können. Der Innenraum ist bewusst reduziert, um die Anzahl der Störfaktoren (Displays, Schaltersuchbeleuchtung) in den ersten Untersuchungen so niedrig wie möglich zu halten und den Fokus auf das ambiente Beleuchtungssystem zu konzentrieren. Der Aufbau der Sitzkiste im Fahrsimulator ist in Bild 2 dargestellt.



Bild 2: Aufbau der Sitzkiste mit LED Leisten und Tablet für visuelle Nebenaufgabe

Der Aufbau wird durch eine ambiante Innenraumbelichtung ergänzt, welche mit einzeln digital ansteuerbaren LED-Streifen umgesetzt wird. Die LED-Streifen besitzen pro Meter 144 einzeln ansteuerbare RGB LED-Chips. Die Streifen sind in ein passendes U-Profil mit Abdeckscheibe geklebt und verkabelt. Der Aufbau der ambienten Innenraumbelichtung orientiert sich an den Lichtauslassflächen und den Leuchtdichten der auf dem Markt verfügbaren Fahrzeuge. Die Streufläche wird mithilfe von mattschwarzer Folie abgeklebt, sodass nur noch eine seriennahe linienförmige Öffnung des Lichtes von 1mm bleibt.

Durch die eingeschränkte Ansteuerung der LEDs ist die Einstellung der Farben auf die gleiche Leuchtdichte nur mit einer allgemeinen Anhebung des Leuchtdichteniveaus möglich. Um diese Anhebung wieder auszugleichen, wird mit vier Lagen an E-Colour #209: .3 Neutral Density Folie der Firma Rosco gearbeitet. Eine Lage hat dabei laut Datenblatt eine Transmission von 48%. [9]

Nach dem Einbau der Folien werden die Einstellungen und Messungen der Leuchtdichte vorgenommen. Dabei wird darauf geachtet, dass alle Farben die gleiche Leuchtdichte besitzen. Das so erzeugte Lichtbild wird als homogen wahrgenommen. Die Leuchtdichte wird mithilfe einer Leuchtdichtekamera überprüft.

3 Fahrsimulatorstudie

Die Probandenstudie dient der Beantwortung folgender Fragestellungen:

- Kann eine dynamische ambiente Innenraumbeleuchtung eine Aufmerksamkeitsgewinnung hervorrufen?
- Welche Lichtmodalität erweckt die meiste Aufmerksamkeit?
- Wie beeinflussen verschiedene Nebenaufgaben die Aufmerksamkeitsgewinnung?

Die folgenden drei Abschnitte beschreiben die verwendeten Lichtmodalitäten und Nebenaufgaben sowie den Studienablauf näher.

3.1 Lichtmodalitäten

Es werden vier verschiedene Lichtmodalitäten untersucht. Diese besitzen alle die gleiche räumliche Ausdehnung von ca. 10cm auf der LED-Leiste und werden dem Probanden randomisiert an verschiedenen Orten gezeigt. Hierbei wird auf die Randomisierung mithilfe des ausbalancierten lateinischen Quadrats zurückgegriffen. [10] Als Modalitäten werden eine dauerhafte Farbänderung, eine dauerhafte Helligkeitsänderung, ein sich dreimal wiederholendes Lauflicht in gleicher Farbe und ein sich dreimal wiederholendes Blinklicht in gleicher Farbe gezeigt. Als Grundfarben werden zu gleichen Teilen Rot und Blau verwendet. Von der Farbe Rot wird auf die Farbe Gelb und von der Farbe Blau auf die Farbe Grün gewechselt. Die Entscheidung der Farbenwahl ist aufgrund der bekannten Sehschwächen Rot-Grün und Blau-Gelb getroffen worden. [11] Ein weiterer bekannter Punkt ist die ungleichmäßige Verteilung der Rezeptoren im Auge und speziell der drei Zapfentypen: L^1 , M^2 und S^3 . [12]

Bei der dauerhaften Helligkeitsänderung, der zweiten Modalität, bleibt die Farbe konstant und der zu ändernde Bereich nimmt circa die sechsfach wahrgenommene Helligkeit an. Dieser Wert wurde mithilfe von Vorversuchen, unter den Gesichtspunkten der Wahrnehmbarkeit und Vermeidung von Blendung, ermittelt. Dabei wird hier von der Grundhelligkeit, im Mittel

¹ L-Zapfen: long wavelength receptor = Rotrezeptor für den roten Anteil des sichtbaren Farbspektrums

² M-Zapfen: medium wavelength receptor = Grünrezeptor für den grünen Anteil des sichtbaren Farbspektrums

³ S-Zapfen: short wavelength receptor = Blaurezeptor für den blauen Anteil des sichtbaren Farbspektrums

auf ca. 5cm gemessenen $1,7\text{cd/m}^2$ - $1,8\text{cd/m}^2$, auf im Mittel des hellen Bereiches von $11,2\text{cd/m}^2$ ohne Überblendungseffekt gewechselt.

Als dritte Modalität wird eine Bewegung getestet. Dabei handelt es sich um ein Lauflicht in gleicher Farbe und einem helleren Bereich, der die gleiche Helligkeit wie bei der dauerhaften Helligkeitsänderung annimmt. Der hellere Bereich des Lauflichtes wird durch fünf nebeneinanderliegende LEDs (ca. 3,5cm) dargestellt. Das Lauflicht wird in einer Frequenz von 1Hz wiederholt und wird mit dieser Wiederholfrequenz an die Norm für Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsysteme und zur Darstellung für Aufmerksamkeitsgewinnung angelehnt. [13] Die vierte Änderungsmodalität ist ein sich dreifach wiederholendes Blinklicht mit dem gleichen Ausgangspunkt der Grundhelligkeit und einem harten Wechsel auf die im vorigen Abschnitt beschriebene helle Einstellung. Die Blinkabfolge wird mit einer Einschalt- und Ausschaltdauer von jeweils 1000ms dargestellt.

3.2 Nebenaufgaben

Eine der drei Forschungsfragen befasst sich mit dem Einfluss der Nebenaufgaben auf die Aufmerksamkeitsgewinnung, also dem Zusammenhang zwischen Lichtmodalität und Nebenaufgabe. Untersuchungspunkt sind hier die verschiedenen Belastungen für den Fahrer, in Form von drei unterschiedlichen Nebenaufgaben. Dabei wird einmal die visuelle, einmal die motorische und einmal die kognitive Ressource belastet. Die visuelle Nebenaufgabe ist an die Aufgabe Surrogate Reference Task (SuRT) angelehnt, siehe dazu Bild 3. [14] In der Darstellung werden 30 Distraktoren in Form von kleinen weißen Kreisen und einem Zielreiz in Form eines größeren und dickeren Kreises vor schwarzem Hintergrund gezeigt. Die Position des Zielreizes wird nicht motorisch über ein Tastenfeld, sondern mündlich vom Probanden angesagt. Das Bild aktualisiert sich dabei alle vier Sekunden selbstständig.

Als motorische Nebenaufgabe ist ein Kinderspiel mit Holzklötzen ausgewählt worden. Die Probanden haben die Aufgabe Holzsteine mit verschiedenen Formen in einem schwarzen blickdichten Strumpf zu erfühlen und diese in die jeweils passende Öffnung eines großen Holzwürfels zu stecken, siehe Bild 3. Durch den fehlenden visuellen Anteil hat der Bearbeitungszeitraum die maximal fünf Minuten Dauer eines Versuchsabschnittes immer überschritten.



Bild 3: Motorische Nebenaufgabe im schwarzen blickdichten Strumpf und visuelle Nebenaufgabe SuRT auf einem Microsoft Tablet Surface Pro 2

Für eine kognitive Belastung müssen die Probanden eine Kopfrechenaufgabe lösen und das Ergebnis mündlich ansagen. Die Probanden sollen kontinuierlich die folgenden Rechenaufgaben berechnen: 800 minus 7, 900 minus 6, 950 minus 8 und 840 minus 7. Die Versuchsteilnehmer werden in der Instruktion darauf hingewiesen, dass es für den Versuch wichtig ist, die Aufgaben möglichst gewissenhaft zu lösen. In der eigentlichen Versuchsdurchführung wird kein Maß für die Nebenaufgaben aufgenommen, wichtig sind nur die kontinuierlichen Belastungen während der Lichtmodalitäten.

Zusammenfassend sind in Bild 4 die Kombinationsmöglichkeiten der verschiedenen Lichtmodalitäten und Nebenaufgaben dargestellt.

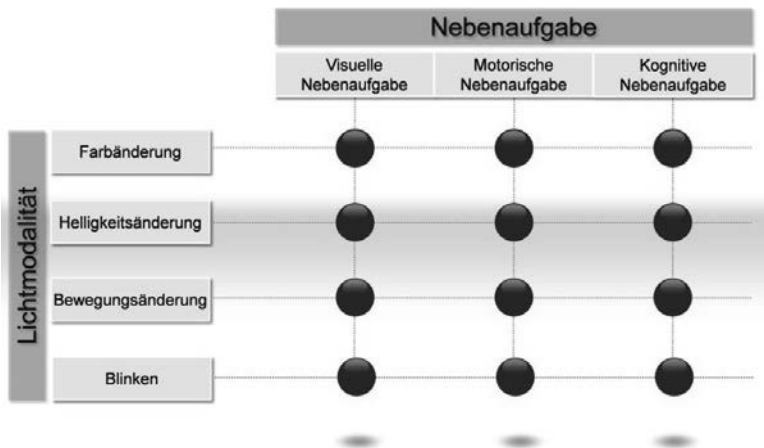


Bild 4: Kombinationen der vier Lichtmodalitäten und drei Nebenaufgaben

3.3 Studienablauf

Die Probanden starten mit einem Fragebogen zu demografischen Daten, werden im Anschluss mindestens 10min. dunkeladaptiert und zu den Nebenaufgaben instruiert. Im weiteren Ablauf werden 12 Kombinationsmöglichkeiten von Lichtmodalitäten und Nebenaufgabe vom Probanden im Fahrsimulator gefahren und auf Fragebögen bewertet.

In der Versuchsdurchführung werden objektive und subjektive Daten aufgezeichnet. Objektiv gemessen werden Reaktionszeiten, umgesetzt wird dies mit einer Zeitmessung vom Anfang der Lichtmodalitäten bis zur Reaktion des Probanden, welche durch einen Pedaldruck abgefragt wird. Subjektiv werden nach jeder Lichtmodalität vier Aussagen mit einer 15-stufigen Skala nach Heller bewertet, basierend auf der Likert-Skala von „lehne stark ab“ bis „stimme stark zu“. [15] Die zu bewertenden Aussagen sind: „Ich habe die Lichtänderung gut wahrgenommen.“, „Die Lichtänderung eignet sich dafür, meine Aufmerksamkeit zu gewinnen.“, „Die Lichtänderung stört mich.“, „Die Lichtänderung ist angenehm.“

Im Anschluss werden die wahrgenommenen Lichtmodalitäten, deren Akzeptanz und die Anstrengungen der Nebenaufgaben mithilfe eines weiteren Fragebogens bewertet. Zu allen vier

Lichtmodalitäten wird je ein semantisches Differential ausgefüllt, die Wortpaare wurden zum Teil aus der Literatur übernommen und eigene hinzugefügt, siehe Bild 8. [16 bis 19]

Aus dem in zwei Altersklassen geteilten Probandenkollektiv ergaben sich in der Durchführung 38 Datensätze. Die Altersgrenze wird bei 45 Jahren angesetzt, ab diesem Alter sind erste altersabhängige Seheinschränkungen möglich. [15 bis 17] Ergänzend wird auf eine Gleichverteilung von Frauen und Männern geachtet und versucht auf Brillenträger in der Durchführung zu verzichten. Mit diesen Einschränkungen wird versucht die Einflussfaktoren so gering wie möglich zu halten.

Erwartet wird eine Übereinstimmung der Ergebnisse mit den theoretischen Grundlagen der Wahrnehmungspsychologie. Es wird erwartet, dass eine Bewegungsänderung in der Peripherie am besten und eine Farbänderung in der Peripherie am schlechtesten wahrgenommen wird.

4 Ergebnisse

4.1 Deskriptive Daten

Für einen ersten Überblick werden Boxplots der Reaktionszeiten für die zwölf verschiedenen Kombinationen aus Lichtmodalitäten und Nebenaufgabe erstellt, um die Verteilung der gemessenen Daten darzustellen und Extremwerte⁴ zu eliminieren, siehe Bild 5.

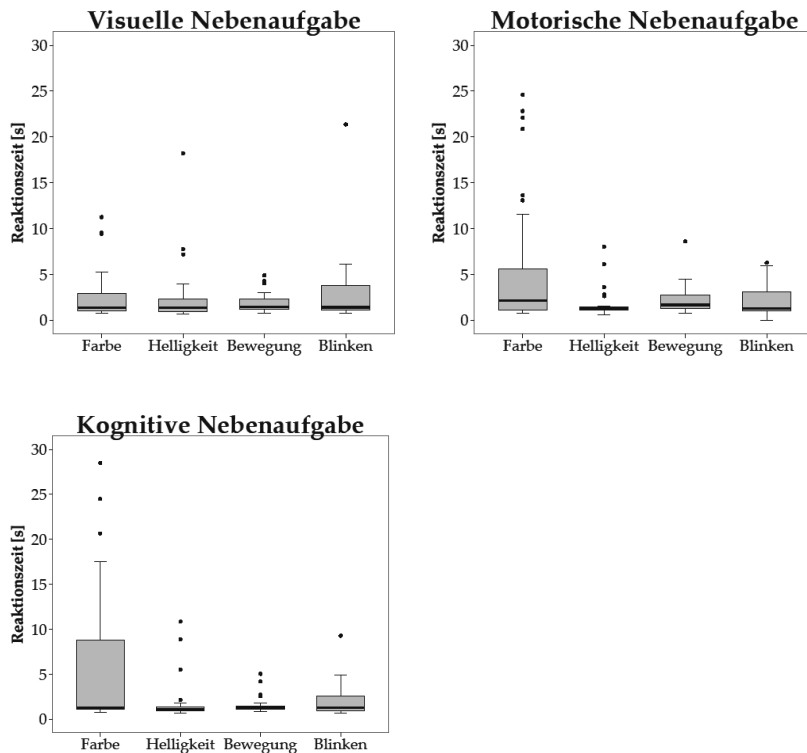


Bild 5: Zwölf Boxplots zur Übersicht der Reaktionszeiten, Grobgliederung nach den Nebenaufgaben und Feingliederung nach der Lichtmodalität

⁴ Extremwerte sind Werte > 3 IQR (interquartil range) außerhalb des oberen / unteren Quartils.

Die Mittelwerte der Reaktionszeiten variieren von $M = 1.18$ Sekunden ($SD = 0.34$) für die *Kombination aus kognitiver Aufgabe und Helligkeitsänderung* und $M = 5.98$ Sekunden ($SD = 8.09$) für die *Kombination aus kognitiver Aufgabe und Farbänderung*. Nicht wahrgenommene Lichtmodalitäten treten in der Analyse als fehlende Werte auf und sind am häufigsten bei der *Kombination aus visueller Aufgabe und Lauflicht* (18 fehlende Werte / $N = 38$) sowie den *Kombinationen aus visueller Aufgabe und Farbänderung* und *kognitiver Aufgabe und Lauflicht* (je 15 fehlende Werte / $N = 38$) zu beobachten. Über alle Kombinationsmöglichkeiten gemittelt werden die Lichtmodalitäten zu rund 70% von den Probanden wahrgenommen. Die unterschiedliche Verteilung der Reaktionszeiten der Farbänderung in den Boxplots lässt sich über die allgemein schlechte Wahrnehmung der Farbänderung im peripheren Bereich herleiten. Die Reaktionszeiten während der visuellen Nebenaufgabe sind etwa gleich der übrigen Lichtmodalitäten, da die Farbänderung hier entweder schnell gesehen wurde oder aber gar nicht. Bei der motorischen und kognitiven Nebenaufgabe konnten die Probanden den Fixationspunkt ihres Blickes ständig ändern und haben so die dauerhafte Farbänderung oft erst nach längerer Zeit bemerkt. Die Werte der Farbänderung werden in der Varianzanalyse später ausgeschlossen, siehe dazu Kapitel 4.2.

4.2 Mehrfaktorielle Varianzanalyse

Jeder Proband führt alle drei Nebenaufgaben aus und bekommt dabei alle vier Lichtmodalitäten präsentiert. Zunächst werden mehrfaktorielle Varianzanalysen für die vier Lichtmodalitäten durchgeführt, weiter unten folgt die Analyse der Nebenaufgaben. Die Reaktionszeiten, vom Anfang der Lichtmodalitäten bis zum Pedaldruck, unter den verschiedenen Bedingungen stellen die abhängige Variable dar. Der erste Testschritt zeigt einen signifikanten Unterschied der Reaktionszeiten je nach Lichtmodalität $F(1.28, 30.65) = 6.68, p = .010^*$. Die Post-Hoc Tests (paarweise Mittelwertvergleiche) ergeben einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Lichtmodalitäten Farbänderung und Helligkeitsänderung ($p = .018$), wobei die Helligkeitsänderung zu signifikant schnelleren Reaktionszeiten führt als die Farbänderung. Dieses Testergebnis bestätigt die Annahmen aus der Allgemeinen Wahrnehmungspsychologie, dass die Helligkeitsrezeptoren in der Peripherie des Auges weiter verbreitet sind als die Farbrezeptoren. Im ersten Testschritt ergibt sich außerdem eine signifikante Interaktion zwischen Lichtmodalität und Grundfarbe $F(1.28, 30.65) = 6.33, p = .012$. Durch die in Bild 6 dargestellte grafische Aufbereitung der Reaktionszeiten nach Grundfarbe der ambienten Innenraumbeleuchtung wird deutlich, dass die Grundfarbe gerade bei der Farbänderung einen großen Einfluss auf die Reaktionszeiten hat. Zur weiteren Überprüfung des Interaktionseffektes zwischen Grundfarbe und Lichtmodalität wird testweise die gleiche Vari-

anzanalyse mit nur drei Lichtmodalitäten (Helligkeitsänderung, Lauflicht und Blinklicht) als within-Variable berechnet. Das Ergebnis zeigt, dass der Effekt nun nicht mehr signifikant ist, also nur auf den Werten unter der Bedingung Farbänderung beruht $F(1.63, 70.07) = 1.53, p = .224$. Der Effekt der großen Streuung der Reaktionszeiten zwischen den beiden getesteten Farbänderungen entsteht durch die in Kapitel 3.1 beschriebene ungleichmäßige Verteilung der Farbrezeptoren im Auge. Folglich werden verschiedene Farbänderungen, unterschiedlich gut wahrgenommen und eignen sich schlecht für die Aufmerksamkeitsgewinnung in der Peripherie, siehe Bild 6.

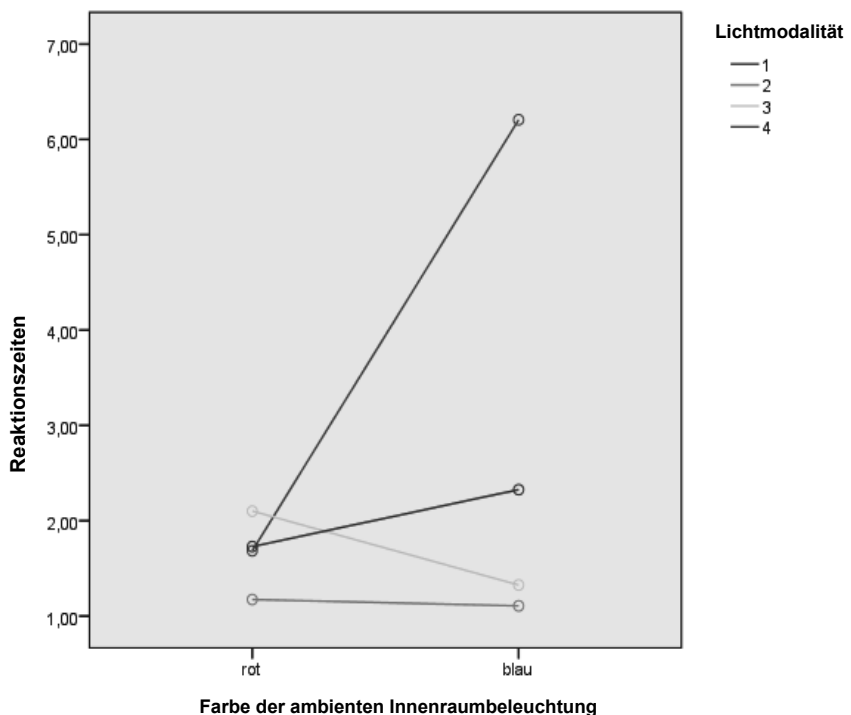


Bild 6: Darstellung des Interaktionseffektes zwischen Grundfarbe und Lichtmodalität (1=Farbänderung, 2=Helligkeitsänderung, 3=Lauflicht, 4=Blinklicht)

Des Weiteren wird der Einfluss des Alters und des Geschlechts untersucht. Um den Faktor Alter zu erkunden, werden die Probanden in zwei Altersklassen eingeteilt. 16 der Probanden sind unter 45 Jahre alt und zehn Probanden über 45 Jahre. Es zeigt sich kein signifikanter Interaktionseffekt beider Altersgruppen mit der Lichtmodalität $F(1.30, 31.21) = 3.18, p = 0.075$. Weiterhin sind 13 der Probanden männlich und 13 Probanden weiblich. Es kann auch hier kein signifikanter Einfluss des Geschlechtes auf die Reaktionszeiten, gemittelt über die Nebenaufgaben, ausgemacht werden $F(1.27, 30.51) = 2.24, p = .14$.

Um auch die Reaktionszeiten unter den verschiedenen Nebenaufgaben zu betrachten, werden die Daten über die Lichtmodalität hinweg gemittelt. Die mehrfaktorielle Varianzanalyse wird nun mit dem Faktor Nebenaufgabe berechnet, bestehend aus drei Stufen: visueller, motorischer und kognitiver Nebenaufgabe. Der Faktor Grundfarbe der ambienten Innenraumbelichtung wird wieder mit in die Analyse aufgenommen. Es zeigt sich aber weder ein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Nebenaufgaben $F(2, 108) = .33, p = .723$ auf die Reaktionszeit, noch eine signifikante Interaktion mit der Grundfarbe der ambienten Innenraumbelichtung $F(2, 108) = .68, p = .51$. Der Faktor Alter beeinflusst ebenfalls nicht die Reaktionszeiten der verschiedenen Nebenaufgaben $F(2, 108) = .21, p = .810$. Das Geschlecht hat keine signifikante Auswirkung auf die Reaktionszeiten der Nebenaufgaben $F(2, 108) = 2.04, p = .134$. Die Art der Nebenaufgabe hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmung der unterschiedlichen Lichtmodalitäten. Für weitere Untersuchungen kann mit einer kombinierten Nebenaufgabe gearbeitet werden.

4.3 Analyse subjektiver Daten

In der Studie werden zu den vorangegangenen analysierten Reaktionszeiten ebenso subjektive Daten aufgenommen. Den Probanden wird nach jeder wahrgenommenen Kombination aus Lichtmodalität und Nebenaufgabe ein Kurzfragebogen ausgehändigt, in dem vier Aussagen (siehe Bild 7 und Kapitel 3.3) auf einer 15-stufigen Skala von „lehne stark ab“ bis „stimme stark zu“, zu bewerten sind. Bild 7 gibt einen Überblick über die Mittelwerte der Zwischenbefragung, wobei die Werte unabhängig von der Nebenaufgabe betrachtet werden, da sonst für die statistische Auswertung zu wenig gültige Werte verfügbar sind. Die Grafik verdeutlicht, dass es keine statistisch signifikanten Unterschiede in der subjektiven Bewertung der einzelnen Lichtmodalitäten gibt.

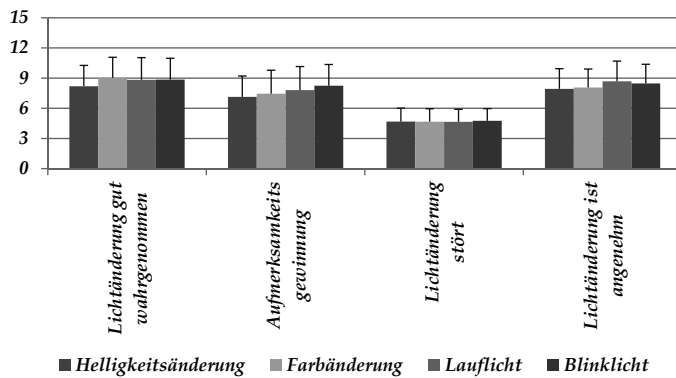


Bild 7: Mittelwerte der subjektiven Zwischenbefragung in Form von Balkengraphen. 0 stellt eine starke Ablehnung und 15 stellt eine starke Zustimmung dar. Die Werte sind gemittelt über alle Lichtmodalitäten.

Ein weiterer Fragebogen wird als Nachbefragung von allen Probanden ausgefüllt. Es stellt sich heraus, dass die Probanden ihre Aufmerksamkeit stark auf die Nebenaufgaben gerichtet haben ($M=11,68$). Sie empfinden die höchste Anstrengung bei der Kopfrechenaufgabe ($M=11,50$), eine mittlere Zufriedenheit mit Ihren Leistungen in den Aufgaben ($M=7,76$) und sie nehmen das Fahrgeschehen am wenigsten bei der visuellen Aufgabe wahr ($M=3,26$; $M(\text{kognitive Aufgabe})=6,26$ und $M(\text{motorische Aufgabe})=6,95$). Der Komfort aller Lichtmodalitäten wird mit mittel bis komfortabel bewertet ($M=9,34$). 14 von 38 Probanden schätzen die Farbänderung und 11 von 38 Probanden das Lauflicht als die Lichtmodalität ein, welche am schnellsten Ihre Aufmerksamkeit erregt. Weiterhin ist bei dieser Antwort eine Abhängigkeit zu der voreingestellten Grundfarbe zu sehen, so haben 11 von 19 Probanden das Lauflicht bei Grundfarbe Blau und 13 von 19 Probanden die Farbänderung bei Grundfarbe Rot angekreuzt. Wie vorangegangen dargestellt, zeigt sich diese Abhängigkeit ebenso bei den Reaktionszeiten der Farbänderung, hier ist Rot signifikant schneller als die Grundfarbe Blau.

Das dritte subjektive Maß wird mithilfe eines semantischen Differentials aufgenommen, welches in Bild 8 dargestellt ist.

Semantisches Differential

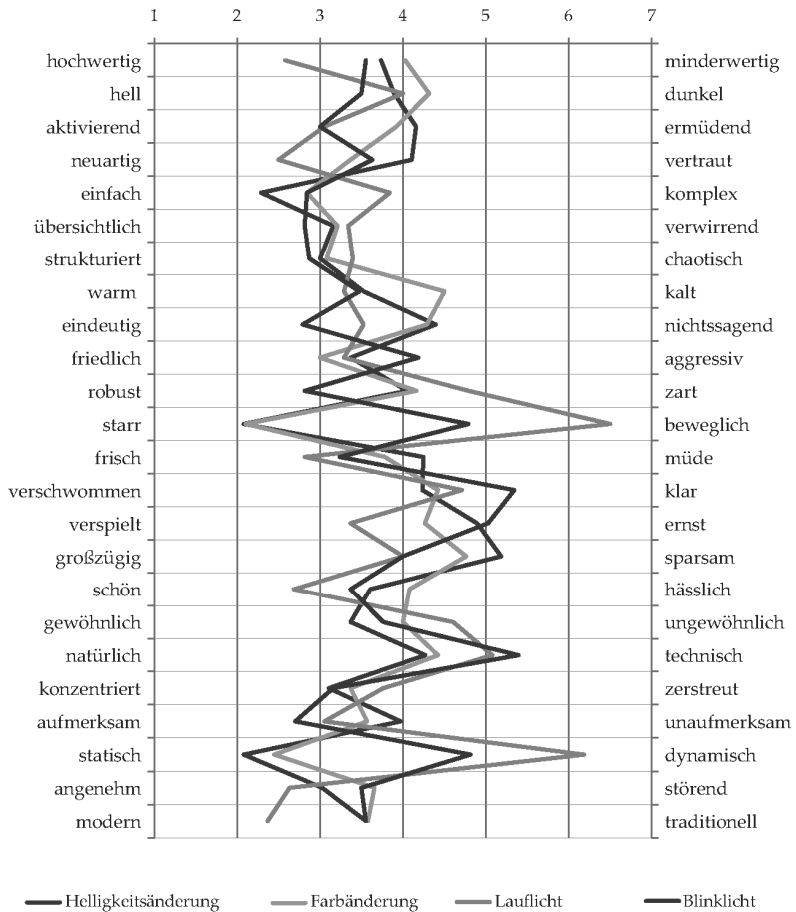


Bild 8: Ergebnisse der subjektiven Bewertung in Form eines semantischen Differentials. Die Liniengraphen stellen die Mittelwerte der subjektiven Bewertungen der vier im Versuch gezeigten Lichtmodalitäten dar.

Das Lauflicht wird in dieser Bewertung mit den meisten positiven Wörtern bewertet. Es ist signifikant schöner, angenehmer, moderner, neuartiger, hochwertiger, dynamischer, frischer als die anderen Lichtmodalitäten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der ersten Untersuchung sollen drei Fragen beantwortet werden: *Kann eine dynamische ambiente Innenraumbeleuchtung eine Aufmerksamkeitsgewinnung hervorrufen? Welche mögliche dynamische Steuerung der Lichtmodalität erweckt die meiste Aufmerksamkeit? Wie beeinflussen verschiedene Nebenaufgaben die Aufmerksamkeitsgewinnung?* In der Durchführung zeigt sich, dass eine grundsätzliche Aufmerksamkeitsgewinnung durch eine dynamische Lichtmodalität in der ambienten Innenraumbeleuchtung möglich ist. Es wird gezeigt, dass die Helligkeitsänderung zu signifikant schnelleren Reaktionszeiten führt als die Farbänderung. Die Reaktionszeiten bei Farbänderung weisen eine große Abhängigkeit von der Grundfarbe auf. Bei Helligkeitsänderung hat die Grundfarbe jedoch keinen Einfluss, ebenso nicht bei Blink- und Lauflicht. Im Versuch werden nacheinander drei Nebenaufgaben ausgeführt (visuell, motorisch und kognitiv), wobei die Art der Aufgabe keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Reaktionszeiten hat. Zudem werden die Reaktionszeiten der präsentierten Lichtmodalitäten nicht von Geschlecht oder Alter der Probanden beeinflusst. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Lichtmodalitäten der vorliegenden Studie von den Probanden übersehen werden, noch zu hoch.

Die Zwischenbefragung zur subjektiven Bewertung der Lichtmodalitäten zeigt keine signifikanten Unterschiede aus Sicht der Probanden. Die Nachbefragung zeigt, dass die Probanden die höchste Anstrengung bei der kognitiven Nebenaufgabe verspüren, eine mittlere Zufriedenheit mit der eigenen Leistung in den Nebenaufgaben empfinden und ihre Aufmerksamkeit immer stark auf die Nebenaufgaben richten. Der Komfort der Lichtmodalitäten wird von mittel bis komfortabel bewertet. Aus den Daten der subjektiven Wahrnehmung geht hervor, dass die Probanden der Meinung sind, dass die meiste Aufmerksamkeit durch Lauflicht und Farbänderung erzeugt wird. Gleichzeitig wird auch hier die hohe Abhängigkeit von der Grundfarbe (rot und blau) festgestellt. Dies bestätigt die Schlussfolgerung, dass die gewählte Farbe sowohl subjektiv als auch objektiv einen Einfluss hat. Aus diesem Grund wird in den folgenden Untersuchungen eine Mischfarbe verwendet, um die genannten Abhängigkeiten zu vermeiden. Im letzten Teil der subjektiven Bewertung wurde von den Probanden ein Blatt mit Antwortpaaren ausgefüllt. Hierbei hat vor allem das Lauflicht positiv abgeschnitten.

Für das Ziel der Entwicklung und Evaluation einer Lichtfunktion in der ambienten Innenraumbeleuchtung werden in der nächsten Untersuchung der optimale Schwellenwert für die Leuchtdichte und die optimale Ausdehnung der Lichtmodalitäten ermittelt. Mit den Ergebnissen werden Konzepte für eine konkrete Kundenfunktion aufgestellt und das Verständnis dieser Lichtfunktion in einer Probandenstudie untersucht.

6 Literatur

- [1] GRIMM, Martin: *Anforderungen an eine ambiente Innenraumbeleuchtung von Kraftfahrzeugen*. München : Utz, Wiss, 2003
- [2] CABERLETTI, Luca ; PROF. CHRISTOPH SCHIERZ: Assessment Method for Vehicle Interior Lighting: subjective Responses and objctive Measures. In: Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Lichttechnik und Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LiTG) Bezirksgruppe Thüringen-Nordhessen (Hrsg.): *Lux junior 2009 : 9. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs*. 25. bis 27. September 2009. 25. bis 27. September 2009, 2009
- [3] WINNER, Hermann ; HAKULI, Stephan ; WOLF, Gabriele: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme : Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 2., korrigierte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012 (SpringerLink : Bücher)
- [4] GASSER, T. M. ; ARZT, C. ; AYOUBI, M. ; BARTELS, A. ; BÜRKLE, L. ; EIER, J. ; FLEMISCH, F.: *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung : Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Bergisch Gladbach, 2012
- [5] KARNATH, Hans-Otto ; THIER, Peter: *Kognitive Neurowissenschaften*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2012 (SpringerLink : Bücher)
- [6] LACHENMAYR, B.: *Gesichtsfeld und Verkehr. Wie funktioniert das periphere Sehen?* In: *Der Ophthalmologe : Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft* 103 (2006), Nr. 5, S. 373–381
- [7] FAHLE, Manfred ; WEHRHAHN, Christian: *Motion perception in the peripheral visual field*. In: *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* 229 (1991), Nr. 5, S. 430–436

- [8] UTESCH, Fabian: *Unschärfe Warnungen im Kraftfahrzeug : Eignet sich eine LED-Leiste als Anzeige für Fahrerassistenzsysteme?* Braunschweig, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Fakultät für Lebenswissenschaften. Dissertation. 2014-04-28. URL http://rzbl04.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00035918/Diss_Utesch_Fabian.pdf;jsessionid=7A3627304B7CEf79FCC3FE406BB1B7AB – Überprüfungsdatum 2015-05-29
- [9] GALL, Dietrich: *Grundlagen der Lichttechnik : Kompendium*. 2. Aufl. München, Bad Kissingen, Berlin, Düsseldorf, Heidelberg : Pflaum, 2007 (Licht und Beleuchtung)
- [10] BORTZ, Jürgen ; SCHUSTER, Christof: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 7., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Berlin : Springer, 2010 (Springer-Lehrbuch)
- [11] GREHN, Franz: *Augenheilkunde : Mit ... 20 Tabellen*. 31., überarb. Aufl. Heidelberg : Springer, 2012 (Springer-Lehrbuch)
- [12] FAIRCHILD, Mark D.: *Color appearance models*. 2nd ed. Chichester, West Sussex, England, Hoboken, NJ : J. Wiley, 2005 (Wiley-IS & T series in imaging science and technology)
- [13] DIN EN ISO 15008. 06.2011. *Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen – Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug*
- [14] ISO/TS 14198:2012(E). 2012. *Road vehicles — Ergonomic aspects of transport information and control systems — Calibration tasks for methods which assess driver demand due to the use of in-vehicle systems*
- [15] HELLER, Otto: *Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU)*. In: *Psychologische Beiträge : Vierteljahresschrift für alle Gebiete der Psychologie* 1985, Nr. 27, S. 478–493
- [16] BORTZ, Jürgen ; DÖRING, Nicola: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler : Mit ... 87 Tabellen*. 4., überarb. Aufl., Nachdr. Heidelberg : Springer, 2009 (Springer-Lehrbuch : Bachelor, Master)
- [17] SCHÄFER, B.: *Semantische Differentialtechnik*. In: FEGER, Hubert; GRAUMANN, Carl Friedrich (Hrsg.): *Enzyklopädie der Psychologie : Datenerhebung*. Göttingen [u.a.] : Hogrefe, Verl. für Psychologie, 1983 (2)

- [18] OSGOOD, Charles Egerton ; SUCI, George J. ; TANNENBAUM, Percy H.: *The measurement of meaning*. Urbana : University of Illinois Press, 1957
- [19] GORNIK, Malgorzata: *Unterschiede im ästhetischen Urteil über gläserne Dachkonstruktionen*. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften, fachrichtung Psychologie. Diplomarbeit. 2009-04-28. URL http://www.architekturpsychologie-dresden.de/ddarbeiten/da_gornik.pdf
- [20] LÜDER, Anna ; BÖCKELMANN, Irina: *Visuelle Leistungen unter dem Aspekt Alter*. In: *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie* 61 (2011), Nr. 10, S. 328–336
- [21] SCHLAG, Bernhard ; PETERMANN, Ina ; WELLER, gert ; SCHULZE, Christoph: *Mehr Licht - mehr Sicht - mehr Sicherheit? : Zur Wirkung verbesserter Licht- und Sichtbedingungen auf das Fahrverhalten*. 1. Aufl. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009 (VS research : Verkehrspsychologie)
- [22] BIERMANN, H. & WEISSMANTEL, H.: *Seniorengerechtes Konstruieren SENSI : Das Design seniorengerechter Geräte*. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 1995 (Fortschritt-Berichte / VDI Konstruktionstechnik, Maschinenelemente Nr. 247)
- [23] EBNER, Hans-Thomas; VERBAND DER DEUTSCHEN AUTOMOBILINDUSTRIE (VDA) Arbeitskreis Automatisiertes Fahren (2014), *Stufen des Automatisierten Fahrens*, S.7. In: DVR-Kolloquium Automatisiertes Fahren, Bonn, 11.12.2013

Potenzial innovativer Heckleuchten zur Unfallvermeidung

Potential of innovative tail lamps to prevent accidents

M.Sc. **Isis Mennig**, M.Sc. **Stefan Rosenhammer**, AUDI AG, Ingolstadt;
Prof. Dr. **Josef F. Krems**, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz

Kurzfassung

Laser- und OLED-Technologien bieten neue Möglichkeiten bei der Entwicklung innovativer Heckleuchten. Eine erfolgreiche Markteinführung von Produktinnovationen ist jedoch nur möglich, wenn dabei den spezifischen Anforderungen des Nutzers entsprochen wird. Heckleuchten gewährleisten die Sichtbarkeit eines Fahrzeugs für andere Verkehrsteilnehmer und ermöglichen die Kommunikation zwischen zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen. Bestimmte Verkehrssituationen, Witterungs- und Umgebungsbedingungen können jedoch eine adäquate Signalerkennung erschweren, was zu Auffahrunfällen führen kann. Adaptive Lichtfunktionen, wie sie derzeit bereits in Scheinwerfern eingesetzt werden, können die Verkehrssicherheit erhöhen. Entsprechend intelligente Funktionen wurden jedoch in Heckleuchten bisher noch nicht ausreichend integriert. Um objektive Sicherheitsanforderungen an zukünftige Heckleuchten zu ermitteln, wurden Auffahrunfälle untersucht. Hierzu wurde eine Literaturrecherche und eine Analyse der GIDAS-Datenbank durchgeführt. Darauf aufbauend soll eine Experimentalreihe der Untersuchung der Wirkung innovativer Heckleuchten auf die Wahrnehmung und Aufmerksamkeit von Autofahrern dienen. Die Anforderungsanalysen werden präsentiert und das Potenzial von Heckleuchten zur Vermeidung von Auffahrunfällen diskutiert.

Abstract

Laser and OLED technologies yield new possibilities of developing innovative tail lamps. Yet, the successful rollout of product innovations requires an understanding of the users' demands. Tail lamps provide visibility and enable communication between vehicles. However, certain traffic situations, weather and environmental conditions can impede signal detection and thus lead to rear end collisions. Adaptive light functions, as they are already used in headlights nowadays, can raise traffic safety. Equivalent, intelligent functions have not been sufficiently integrated into tail lamps so far. To determine objective safety requirements of future rear lights, rear end collisions were examined. Therefore, a literature

review and an analysis of the GIDAS database were conducted. On this basis, a series of experiments was carried out in order to investigate the impact of innovative tail lamps on drivers' perception and attention. In this paper, we present the requirement analysis and discuss the potential of tail lamps to decrease rear end collisions.

1. Motivation

Die Entwicklung innovativer Scheinwerfer und Heckleuchten wird durch neue Lichttechnologien ermöglicht. So entstehen beispielsweise mit einer OLED-Lichtquelle völlig neue Raum- und Gestaltungsdimensionen. Gleichzeitig geben auch die Nutzer neue Wege vor. Die Wünsche des Kunden beziehen sich dabei unter anderem auf den Preis, das Design, die Sicherheit und den Komfort. Bei der Entwicklung neuer Produkte in der Automobilindustrie müssen außerdem die gesetzlichen Bestimmungen und Regelungen berücksichtigt werden. Nur durch eine umfassende Anforderungsanalyse sämtlicher Nutzerbedürfnisse lassen sich alle notwendigen Aspekte bei der Entwicklung technischer Produkte einbeziehen. Auch wenn sich das Design und die Lichttechnologien in Heckleuchten fortlaufend verändern, so sind die Funktionen einer Heckleuchte seit vielen Jahren auf einem ähnlichen Stand. In Scheinwerfern hingegen werden in den letzten Jahren vermehrt adaptive Lichtfunktionen eingesetzt, um die Sicht für den Fahrer zu verbessern. Es stellt sich die Frage, ob intelligente Funktionen auch in Heckleuchten einen Sicherheits- oder Komfortgewinn für den Kunden bringen können. Dazu muss die Rolle von Heckleuchten im Straßenverkehr analysiert werden. Eine Möglichkeit dazu bietet die Unfallanalyse. Da Heckleuchten als Kommunikationsmittel zwischen zwei hintereinander fahrenden Fahrzeugen dienen, bietet vor allem die Untersuchung von Auffahrunfällen großes Potenzial zur Ermittlung von Nutzeranforderungen an eine rückwärtige Signalgebung.

2. Analyse von Auffahrunfällen

Eine Untersuchung zur Entstehung von Auffahrunfällen mittels Unfalldatenbank und Literaturrecherche [1] zeigt, dass die Hauptunfallursachen unangepasste Geschwindigkeit, zu geringer Abstand und mangelnde Aufmerksamkeit des Hinterherfahrenden sind. Als potenzielle Risiko- und Schutzfaktoren kommen die Sichtbarkeit des Unfallbeteiligten, das Verkehrsaufkommen sowie psychologische und physiologische Faktoren in Frage. Die Ergebnisse der Analyse geben keine Hinweise auf Sichtbehinderungen oder mangelnde Erkennbarkeit der Heckleuchte als relevante Unfallursachen [1]. Ein erhöhtes Verkehrsaufkommen kann das Unfallrisiko beeinflussen, indem das Einhalten von Sicherheitsabständen erschwert wird und sich die Chance erhöht, dass sich zwei Fahrzeuge

in einer Konfliktsituation begegnen. Zusätzlich erfordern viele Verkehrsteilnehmer eine erhöhte Aufmerksamkeit vom Fahrer. Die meisten Auffahrunfälle finden innerorts, tagsüber und an Werktagen statt, was mit einer hohen Verkehrsdichte und dadurch mit einer hohen kognitiven Belastung und einem erhöhten Stressniveau einhergehen kann [1]. In einer Analyse schwerer Verkehrsunfälle zeigte sich, dass Personen mit einem emotional belastenden Lebensereignis in der Vergangenheit ein erhöhtes Unfallrisiko aufwiesen [2]. Auch beruflicher und verkehrsbezogener Stress kann sich negativ auf das Fahrverhalten auswirken, was sich beispielsweise in einer erhöhten Geschwindigkeit zeigt [3]. Es findet sich je nach Altersklasse und Geschlecht ein unterschiedliches Unfallrisiko, was unter anderem durch die Fahrerfahrung moderiert zu sein scheint [1]. Auch die Autoren Baldock, Long, Linday und Mc Lean (2005), Staubach (2010) und Bartl und Hager (2006) beschreiben mangelnde Fahrpraxis und geringe Vertrautheit mit der Fahrsituation als Risikofaktoren für Verkehrsunfälle [4, 5, 6]. Bei der Betrachtung der physiologischen Faktoren wurden die Vorerkrankungen der Unfallverursacher berücksichtigt. Hierbei zeigte sich neben Augenleiden, ein hoher Anteil von Erkrankungen, die mit einer mangelnden Konzentrationsfähigkeit einhergehen können [1, 7]. Mehr als die Hälfte der Unfälle mit einer Geschwindigkeitsübertretung hätte durch eine rechtzeitige Reaktion verhindert werden können [1].

Es stellt sich die Frage, welche Rolle Heckleuchten bei der Verursachung und Vermeidung von Auffahrunfällen spielen können. Mithilfe des Schlusslichts wird die Erkennbarkeit eines vorausfahrenden Fahrzeugs erhöht. Heckleuchten haben damit indirekt Einfluss auf die Geschwindigkeits- und Abstandsschätzung [8, 9, 10]. Diese Schätzergebnisse könnten mittels adaptiver Funktionen verbessert werden, indem sich die rückwärtige Signalgebung an die gefahrene Geschwindigkeit und den Abstand anpasst. Außerdem übt die Heckleuchte eine kommunikative Funktion im Straßenverkehr aus. Mittels Blink- und Bremslicht können Signale an den Hinterherfahrenden übertragen werden. Neue Lichttechnologien bieten die Möglichkeit, den Informationsgehalt zu erhöhen. So ergibt sich die Idee, mittels dynamischer Lichtfunktionen im Heck gezielt die Aufmerksamkeit anderer Verkehrsteilnehmer zu beeinflussen.

Um Anforderungen an neue Funktionen in der Heckleuchte stellen zu können, soll das Potenzial zur Verbesserung der Aufmerksamkeitsverteilung durch dynamische Lichtfunktionen in einer Reihe von Experimenten untersucht werden.

3. Experimentelle Untersuchungen

Der Untersuchungsort ist das Audi Lichtassistenzzentrum. Der befahrbare Lichtkanal ist 120 m lang, mattschwarz lackiert und mit einem straßenähnlichen Bodenbelag ausgestattet [11]. Die Untersuchung der teildynamischen Deaktivierung des Bremslichts wurde mit einer Prototypen-Heckleuchte durchgeführt. In weiteren Experimenten zur Aufmerksamkeitssteuerung werden die dynamischen Heckleuchten durch zwei grobpixelige Displays dargestellt. Diese Displays bestehen aus jeweils 65 einzeln ansteuerbaren, homogen leuchtenden OLED-Segmenten, welche in x-, y- und z-Richtung translatorisch und um die jeweiligen Achsen rotatorisch beweglich sind (siehe Abbildung 1).

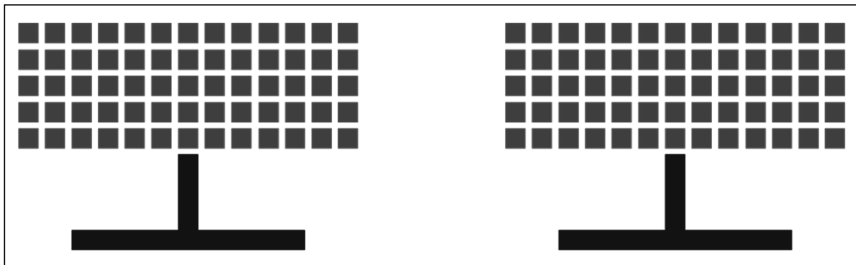


Bild 1: OLED-Display

Teildynamische Deaktivierung des Bremslichts

Animierbare OLED-Segmente können potenziell die visuelle Salienz von Signalen erhöhen. Da bewegte Stimuli sogenannte Pop-Out-Effekte auf einer präattentiven Ebene fördern und somit die menschliche Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit verbessern können (vgl. Merkmalsintegrationstheorie [12]), sollten Animation zu einer kürzeren visuellen Suche führen. Die vorliegende Studie untersuchte daher, ob die Integration einer 200 ms andauernden Animation von OLED-Segmenten während der Deaktivierung eines LED-Bremslichts im Vergleich zum statischen, parallelen Deaktivieren aller Segmente die Wahrnehmbarkeit von Bremssignalen verändert.

Diese Forschungsfrage wurde anhand eines 2 (Deaktivierungsart: teildynamisch; statisch) \times 2 (Blickwinkel: fokal; peripher) within-subjects-Designs überprüft. Die statische Deaktivierung wurde über gleichzeitige Deaktivierung aller vier Segmente des OLED-Bremslichts operationalisiert. Die teildynamische Deaktivierung beschreibt das serielle Abblenden der einzelnen Segmente von außen nach innen innerhalb von 200 ms mit einer linearen Dimmrates. Das LED-Bremslicht wurde in beiden Bedingungen statisch abgeschaltet. Bei fokalem Blickwinkel wurde der Proband instruiert, das Bremslicht der Heckleuchte zu

fokussieren. Unter peripherem Blickwinkel sollte die Versuchsperson Verkehrsmeldungen lesen und auf die Heckleuchte in der Peripherie reagieren. Die Heckleuchte wurde in einer Höhe von 0.95 m und einem Abstand von 2.50 m zum Fahrzeug positioniert. Die Teilnehmer saßen während der Erhebung auf dem Fahrersitz und wurden instruiert, die Heckleuchte zu fokussieren und so schnell wie möglich auf das Ausgehen des Bremslichts per Tastendruck zu reagieren. Nach dem Ausgehen des Bremslichts hatten die Probanden 5 s Zeit um zu reagieren. Erfolgte in diesem Intervall keine Reaktion, wurde der Durchgang als Verpasser gezählt. Die Dauer der aktiven Bremsleuchte variierte dabei zwischen 5 s und 25 s und wurde randomisiert dargeboten. Ebenso wurde die Reihenfolge der teildynamischen und der statischen Deaktivierungsart randomisiert. Insgesamt wurden somit die Reaktionszeiten von 10 Durchgängen (jeweils 5 teildynamisch und 5 statisch) aufgezeichnet. Als Variation der unabhängigen Variable Blickwinkel wurde ein Tabletcomputer im Winkel von 45° im Fahrzeuginnenraum justiert, über welches die Teilnehmer Verkehrsmeldungen über ein Teleprompter-Programm laut vorlesen und aus der Peripherie auf das Ausgehen des Bremslichts per Tastendruck reagieren sollten. Der Versuchsleiter kontrollierte dabei das korrekte Ablesen um eine fortwährende visuelle Fokussierung des Tabletcomputers sicherzustellen. Diese Operationalisierung gewährleistete eine dauerhaft gleichbleibende Kopf- und Sitzposition, ohne zusätzliche auditiven oder motorischen Anforderungen. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist Abbildung 2 zu entnehmen.

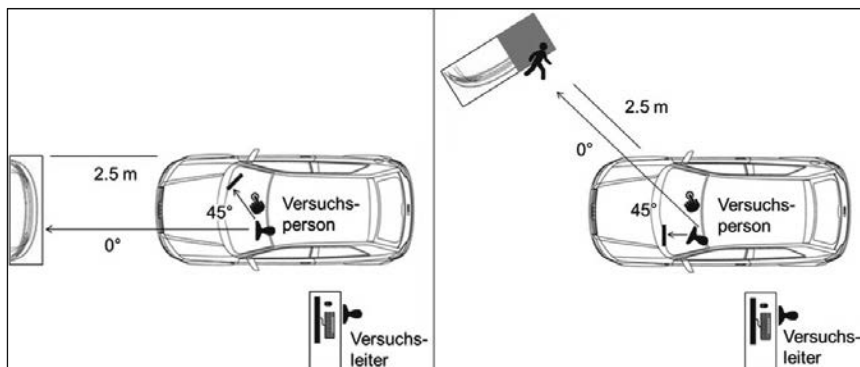


Bild 2: Schematischer Versuchsaufbau aus Studie 1 (links) und 2 (rechts).

In Studie 1 betrachteten Probanden eine 2.50 m entfernte Heckleuchte entweder fokal (0°) oder aus der Peripherie (45° während des Lesens von Verkehrsmeldungen aus dem Tabletcomputer) und reagierten dabei per Tastendruck auf das Ausgehen des Bremslichts.

In Studie 2 betrachteten Probanden eine 2.50 m entfernte, halbseitig durch einen Dummy verdeckte Heckleuchte entweder fokal (0°) oder aus der Peripherie (45°) während des Lesens von Verkehrsmeldungen aus dem Tabletcomputer) und reagierten dabei per Tastendruck auf das Ausgehen des Bremslichts.

Am Versuch nahmen 32 Mitarbeiter der AUDI AG teil. Darunter befanden sich 7 weibliche Probandinnen (21.88 %). Das Alter reichte von 20 bis 52 Jahre ($M = 30.34$, $SD = 9.05$). Insgesamt gaben 13 Teilnehmer eine korrigierte Sehschwäche an (40.63 %).

In einem der über alle Versuchspersonen hinweg 640 Durchgänge wurde das Signal innerhalb von 5 s nicht erkannt (0.16 %). Dieser Verpasser ereignete sich in der Bedingung mit statischer Deaktivierung unter peripherer Betrachtung der Leuchte und ging mit dem Maximalwert dieser Studie von 2.8 s in die Analyse der Reaktionszeiten ein. Über alle Durchgänge, in denen die Heckleuchte fokal betrachtet wurde, zeigte sich zunächst deskriptiv eine mittlere Reaktionszeit von 455.56 ms ($SD = 76.28$). Unter peripherem Blickwinkel verlängerte sich diese mittlere Reaktionszeit um 78.01 ms auf 533.57 ms ($SD = 93.38$). Die mittlere Reaktionszeit betrug bei statischem Deaktivieren des Bremslichts über alle Durchgänge 490.47 ms ($SD = 92.24$) und bei teildynamischem Deaktivieren 498.66 ms ($SD = 77.44$). Die mittleren Reaktionszeiten und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit der Deaktivierungsart und des Blickwinkels lassen sich Abbildung 3 entnehmen.

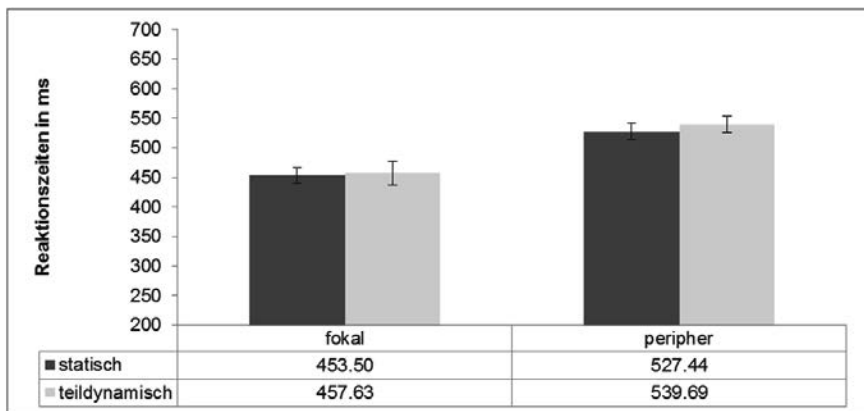


Bild 3: Mittlere Reaktionszeiten in ms und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von Deaktivierungsart (statisch; teildynamisch) und Blickwinkel (fokal; peripher) in Studie 1.

Die Analyse der Mittelwertsunterschiede wurde mithilfe einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt. Dabei gingen die unabhängigen Variablen Deaktivierungsart (statisch; teildynamisch) und Blickwinkel (fokal; peripher) als zweigestufte Faktoren und die gemessenen Reaktionszeiten als abhängige Variable in die Analyse ein. Die jeweils 5 Mehrfachmessungen pro Proband und Bedingung wurden zu einem Wert gemittelt, welcher für die weiteren Analysen verwendet wurde. Die Ergebnisse lieferten einen signifikanten Haupteffekt für die Variable Blickwinkel ($F(1, 31) = 60.23$, $p < .001$), wonach unter fokalem Blickwinkel schneller auf das Ausgehen des Bremslichts reagiert wurde als unter peripherem Blickwinkel. Für die Variable Deaktivierungsart ergab sich kein signifikanter Haupteffekt ($F(1, 31) = 0.43$, $p = .52$) zwischen statischer und teildynamischer Deaktivierung. Ebenso ergab sich keine signifikante Interaktion beider Variablen ($F(1, 31) = 0.19$, $p = .67$). Um diese Befunde auf weitere Positionen der Heckleuchte erweitern zu können, wurde ein zweiter Aufbau umgesetzt, der eine Abbiegesituation mit teilweise verdeckter Heckleuchte durch einen Fußgänger nachstellen sollte (siehe Studie 2 in Abbildung 2). Dabei wurde die Heckleuchte rechtsseitig in einem Winkel von ca. 45° zum Fahrersitz positioniert und die rechte Hälfte der Heckleuchte durch einen Dummy komplett verdeckt. In der fokalen Bedingung wendeten sich die Teilnehmer im Fahrersitz der Heckleuchte zu, um diese zentral fokussieren zu können. Die Realisierung des peripheren Blickwinkels erfolgte über Ablesen von Verkehrsmeldungen aus einem Tabletcomputer, der zentral auf der Höhe des Kombiinstrumentes positioniert wurde. Es ergaben sich über alle Probanden hinweg insgesamt 7 Verpasser in 640 Durchgängen (1.09 %). Alle Verpasser ereigneten sich in der peripheren Bedingung, 4 davon während der teildynamischen Deaktivierung und 3 unter statischer Deaktivierung. Deskriptiv zeigt sich zunächst über alle Durchgänge, in denen die Heckleuchte fokal betrachtet wurde, eine mittlere Reaktionszeit von 472.31 ms ($SD = 83.32$). Unter peripherem Blickwinkel lag diese bei 639.38 ms ($SD = 200.75$). Über alle Durchgänge, in denen das Bremslicht statisch deaktiviert wurde, lag die mittlere Reaktionszeit bei 558.22 ms ($SD = 150.50$). Wurde das Bremslicht teildynamisch deaktiviert, lag diese bei 553.47 ms ($SD = 133.56$). Abbildung 4 zeigt die mittleren Reaktionszeiten und Standardfehler des Mittelwerts als Funktion der unabhängigen Variablen Deaktivierungsart und Blickwinkel.

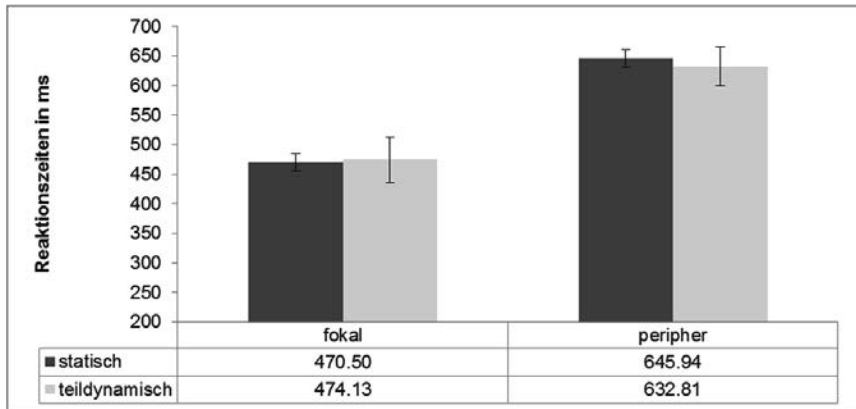


Bild 4: Mittlere Reaktionszeiten in ms und Standardfehler des Mittelwerts in Abhängigkeit von Deaktivierungsart (statisch; teildynamisch) und Blickwinkel (fokal; peripher) in Studie 2.

Die analog zu Studie 1 berechnete zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung lieferte einen signifikanten Haupteffekt für die Variable Blickwinkel ($F(1, 31) = 52.67$, $p < .001$). Demnach wurde unter fokalem Blickwinkel schneller auf das Ausgehen des Bremslichts reagiert als unter peripherem Blickwinkel. Für die Variable Deaktivierungsart ergab sich kein signifikanter Haupteffekt ($F(1, 31) = 0.04$, $p = .85$) zwischen statischer und teildynamischer Deaktivierung. Ebenso ergab sich keine signifikante Interaktion beider Variablen ($F(1, 31) = 0.14$, $p = .71$).

Die vorliegende Studie untersuchte in zwei Experimenten, inwieweit die teildynamische Deaktivierung des Bremslichts die Wahrnehmung in Abhängigkeit des Blickwinkels und der Position der Heckleuchte verändert. Die Ergebnisse lieferten keinen signifikanten Haupteffekt der unabhängigen Variable Deaktivierungsart, wonach über die getesteten Blickwinkel und Heckleuchtenpositionen hinweg keine signifikant veränderten Reaktionszeiten auf das Signalende des Bremslichts durch unterschiedliche Deaktivierungsarten festzustellen waren. Darüber hinaus zeigten sich keine signifikanten Interaktionen zwischen der Deaktivierungsart und dem Blickwinkel. Zusammengefasst sprechen diese Befunde dafür, dass die 200 ms andauernde, teildynamische Deaktivierung des Bremslichts zu keiner veränderten Wahrnehmbarkeit im Vergleich zur statischen Deaktivierung seitens des Nutzers führt. Dies zeigte sich unabhängig von der Heckleuchtenposition und vom Blickwinkel des Betrachters. Die Deaktivierung des LED-Schlusslichts konnte, unabhängig von einer zusätzlichen teildynamischen Deaktivierung der OLED-Schlusslichtsegmente, so schnell wahrgenommen

werden, dass Reaktionszeiten von ca. 470 - 650 ms erreicht werden konnten. Durch die hohe Lichtstärke des Bremslichts und die geringe Distanz im Versuchsaufbau zwischen der Prototypen-Heckleuchte und der Versuchsperson scheint die aktuelle Bremslichtfunktion ausreichende Salienz aufzuweisen, um eine unmittelbare Reaktion auszulösen. Die folgende Untersuchung beschäftigt sich daher gezielt mit einer möglichen Umsetzung dynamischer Funktionen in einem weniger salienten Schlusslicht unter Berücksichtigung zusätzlicher Umgebungsfaktoren.

Dynamisches Schlusslicht zur Aufmerksamkeitssteuerung

Die Unfallanalyse [1] zeigt, dass ein Großteil der Auffahrunfälle durch eine falsche Aufmerksamkeitsverteilung im Straßenverkehr verursacht werden. Für den Verkehrsraum wird daher der Slogan „Fahr konzentriert, bleib am Leben!“ [6, S. 40] gefordert und somit eine Verkehrsraumgestaltung, welche die Aufmerksamkeit erhöht. Dazu gäbe es zahlreiche Möglichkeiten, wie die Umwandlung von Kreuzungen in Kreisverkehre, die Abschaffung von Fahrstreifenmarkierungen oder Einführung optischer Anhaltspunkte [6]. Der Fahrer wird im Straßenverkehr mit einer Flut an Reizen konfrontiert, die durch das Verarbeitungssystem sowie mittels Handlungszielen selektiert werden [13]. Durch Unaufmerksamkeit des Fahrers kann es zu Fehlern bei der Auswahl der angemessenen Informationen kommen [14]. Vor allem innerorts im dichten Stadtverkehr ist die Komplexität der Situationen deutlich erhöht. Die menschliche Wahrnehmung lässt sich hinsichtlich dem fokalen und peripheren Sehen unterscheiden. Zur visuellen Suche, der Objekterkennung und für Aufgaben, die eine hohe visuelle Sehschärfe benötigen, ist das fokale visuelle System zuständig [15]. Mithilfe des peripheren visuellen Systems gelingt die räumliche Orientierung und die Haltungs- und Bewegungskontrolle [15]. Gefahren werden hauptsächlich fokal und weniger schnell peripher wahrgenommen [15]. Es stellt sich die Frage, wie auf kritische Situationen hingewiesen werden kann, die nicht im gegenwärtigen Fokus des Fahrers liegen. Die Salienz eines Reizes fördert die Aufmerksamkeitszuwendung [16]. So lenkt der Reiz mit dem größten Merkmalskontrast die selektive Aufmerksamkeit automatisch auf sich [13]. Dabei ist das menschliche Auge besonders sensibel für Helligkeitsveränderungen im peripheren Bereich [17]. Dynamische Lichtfunktionen, wie beispielsweise das Blinken, sind auch außerhalb des zentralen Blickfelds besonders gut geeignet, um die Aufmerksamkeit auf sich zu lenken [14, 17, 18].

Um den Blick des Fahrers auf ein vorausfahrendes Fahrzeug lenken zu können, soll mit weiteren Studien untersucht werden, ob sich mit dynamischen Funktionen im Schlusslicht gezielt die Aufmerksamkeit steuern lässt. Als unabhängige Variablen sollen folgende

Attribute der Schlusslichtfunktion variiert werden: Art der Dynamik (z.B. Dimmen, Blinken, Wischen), Geschwindigkeit der Animation, Größe und Helligkeit der leuchtenden Fläche. Zusätzlich sollen die Umgebungsmerkmale Helligkeit, Entfernung und Blickwinkel variiert werden. Als abhängige Variable wird die Reaktionszeit erfasst.

4. Potenzial von Heckleuchten zur Vermeidung von Auffahrunfällen

Heckleuchten dienen der kontinuierlichen Kommunikation mit dem rückwärtigen Verkehr. Brems- und Blinklicht übermitteln dabei wichtige Signale an den Hinterherfahrenden und das Schlusslicht erhöht die generelle Sichtbarkeit eines Fahrzeugs. Eine Unfallanalyse ergab, dass Auffahrunfälle vor allem durch eine unangepasste Geschwindigkeit, einen zu geringen Abstand und mangelnde Aufmerksamkeit verursacht werden [1]. Durch intelligente Technologien ergibt sich die Möglichkeit, neue Funktionen in Heckleuchten zu integrieren. So könnte mittels Laser-Technologien eine Abstandsmarkierung in Form einer roten Linie auf die Straße projiziert werden. Mit organischen LEDs lassen sich klar definierte, homogen leuchtende Segmente einzeln ansteuern und variabel auf verschiedene Helligkeitsniveaus dimmen. Es ergibt sich dadurch das Potenzial durch neue Schlusslichtfunktionen die Aufmerksamkeit eines Hinterherfahrenden gezielt zu erregen sowie die Geschwindigkeits- und Entfernungsschätzung zu verbessern. Die Forschung zeigt, dass eine potenzielle Gefahr durch eine Fokussierung schneller wahrgenommen werden kann [15]. Um eine Aufmerksamkeitslenkung in der Peripherie einzuleiten, eignen sich vor allem saliente Signale, wie beispielsweise durch eine blinkende Lichtquelle [14, 17, 18]. Mit einer Reihe von wahrnehmungspsychologischen Experimenten wird untersucht, inwiefern sich mittels dynamischer Funktionen die Aufmerksamkeit gezielt steuern lässt. Mit Hilfe einer umfassenden Analyse der Nutzeranforderungen wird die Heckleuchte nicht das sprichwörtliche Schlusslicht in der Lichtentwicklung bilden.

5. Literatur

- [1] Mennig, I.: Analyse von Auffahrunfällen im Hinblick auf Anforderungen an innovative Heckleuchten. Automotive meets Electronics. Dortmund März 2016
- [2] Lagarde, E., Chastang, J.-F., Gueguen, A., Coeuret-Pellicer, M., Chiron, M., u. Lafont, S. : Emotional Stress and Traffic Accidents: The Impact of Separation and Divorce. *Epidemiology* 15(6) (2004) S. 762-766
- [3] Rowden, P., Matthews, G., Watson, B., u. Biggs, H.: The relative impact of work-related stress, life stress and driving environment stress on driving outcomes. *Accident Analysis and Prevention* 43 (2011) S. 1332-1340
- [4] Baldock, M. R. J., Long, A. D., Lindsay, V. L., u. McLean, A. J.: Rear end crashes. Crash Report University of Adelaide, Australia 2005
- [5] Staubach, M.: Identifikation menschlicher Einflüsse auf Verkehrsunfälle als Grundlage zur Beurteilung von Fahrerassistenzsystem-Potentialen., Technische Universität Dresden Diss. 2010
- [6] Bartl, G., u. Hager, B.: Unfallursachenanalyse bei PKW-Lenkern. Forschungsbericht Institut Gute Fahrt u. Bundesanstalt für Verkehr. Wien, Österreich, 2006
- [7] Göhringer, T.: Neuropsychologische Leistungsprofile bei Patienten mit Diabetes mellitus in Abhängigkeit von ihrer Stoffwechseleinstellung., Ludwig-Maximilians-Universität München Diss. 2005
- [8] Buchner, A., Brand, M., Bell, R., u. Weise, J.: Car Backlight Position and Fog Density Bias Observer-Car Distance Estimates and Time-to-Collision Judgments. *Human Factors* 48(2) (2006) S. 300-317
- [9] Cavallo, V., Colomb, M., u. Doré, J.: Distance perception of vehicle rear lights in fog. *Human Factors* 43(3) (2001) S. 442-451
- [10] Hagendorf, H., Krummenacher, J., Müller, H.-J., u. Schubert, T.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2011
- [11] Audi Media Center: Audi macht die Nacht zum Tag: neues Lichtassistenzzentrum, unter: <https://www.audi-mediacenter.com/de/pressemitteilungen/audi-macht-die-nacht-zum-tag-neues-lichtassistenzzentrum-396> (abgerufen am: 31.01.2016)
- [12] Treisman, A. u. Gelade, G.: A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology* 12 (1980) S. 97-136
- [13] Schade, S.: Endogene Aufmerksamkeitssteuerung und Attentional Capture in der visuellen Suche., Technische Universität Berlin Diss. 2014

- [14] Trick, L. M., Enns, J. T., Mills, J., u. Vavrik, J.: Paying attention behind the wheel: a framework for studying the role of attention in driving. *Theoretical Issues in Ergonomic Science* 5(5) 2004 S. 385-434
- [15] Horrey, W. J., Wickens, C. D., u. Consalus, K. P.: Modeling drivers' visual attention allocation while interacting with in-vehicle technologies. *Journal of Experimental Psychology* 12(12) 2006 S.67-78
- [16] Wickens, C. D., Helleberg, J., Goh, J., Xu, X., u. Horrey, W. J.: Pilot task management: testing an attentional expected value model of visual scanning. Technical Report NASA Ames Research Center. Moffett Field, CA, USA 2001
- [17] Gail, J., Lorig, M., Gelau, C., Heuzeroth, D., u. Sievert, W.: Optimization of rear signal pattern for reduction of rear-end accidents during emergency braking maneuvers. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach* 2001
- [18] Blom, B., Niederée, U., Hecker, P., u. Vollrath, M.: Aufmerksamkeitssteuerung – Ein Ansatz zur Pilotenunterstützung in der Rollführung. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Stuttgart* September 2013

Einsatz von volumenstreuenden Kunststoffen in Frontscheinwerfern

Volume scattering materials in headlamps

Dipl.-Phys. **Michael Richter**, Automotive Lighting, Reutlingen

Kurzfassung

Optische Konzepte mit volumenstreuenden Kunststoffen finden üblicherweise wegen ihrer geringen Effizienz in Frontscheinwerfern keine Verwendung. Aktuelle Designtrends zufolge könnte sich dies jedoch ändern, da sich homogen ausgeleuchtete Flächen mit Streuung sehr gut verwirklichen lassen.

Um volumenstreuende Materialien einzusetzen, ist es hilfreich Voraussagen mit Hilfe von Simulationen treffen zu können. Deswegen wird im Folgenden nach einer kurzen Einführung kurz auf die theoretischen Hintergründe der Volumenstreuung eingegangen. In Kapitel 3 werden dann Messungen und Simulationen verglichen und erläutert, bevor in Kapitel 4 Vor- und Nachteile von Konzepten mit Volumenstreuung gegenüber herkömmlichen Systemen beschrieben werden. Zuletzt werden zusätzliche mögliche Anwendungsgebiete vorgeschlagen und ein Fazit gezogen.

Abstract

Low efficiency systems like volume scattering materials are not yet common in headlamps. Recent trends suggest a change since the possibilities for realizing homogeneous designs with scattering are very convincing.

To work with such materials requires the ability to predict out coming results by simulation software. Therefore, after a quick introduction, chapter 2 explains the basics in scattering theory. Chapter 3 compares simulations with measurements before chapter 4 outlines differences to more ordinary systems. The last part concludes the work and shows some other possible applications.

1 Einleitung

Beleuchtete Designelemente im Scheinwerfer erfreuen sich seit dem vermehrten Einsatz von LEDs großer Beliebtheit. Die vergleichsweise hohen gesetzlichen Anforderungen an die Lichtwerte bei Tagfahrlicht und Blinklicht limitieren jedoch die verfügbaren optischen Konzepte und lassen Systeme mit niedriger Effizienz im Frontscheinwerfer nur selten zu. Durch hel-

lere LEDs aber auch durch höhere Aufwendungen, um differenzierte Designs zu realisieren, ergeben sich neue Möglichkeiten. Ein besonders homogenes Erscheinungsbild einer leuchtenden Fläche kann durch den Einsatz volumenstreuender Kunststoffe erzielt werden.

Volumenstreuung bezeichnet Streuung, welche nicht an den Oberflächen eines Materials stattfindet sondern zwischen Ein- und Austrittsfläche des Lichtstrahls. Der Punkt, an dem der Strahl das Medium verlässt, kann somit völlig unabhängig vom Eintrittspunkt sein. Ebenso verhält es sich mit Ein- und Austrittswinkel. Klassische Volumenstreuer sind transluzente (=halbtransparente) Medien wie z.B. Milch, Haut oder Marmor. Auch in transparentem Material findet Volumenstreuung statt, da sich stets Fehler in der Materialstruktur finden, an denen Licht gestreut wird. In dieser Untersuchung soll mit dem Begriff "volumenstreuender Kunststoff" ein Material beschrieben werden, in welches im Herstellungsprozess gezielt Streupartikel eingebracht wurden. Je nach Beschaffenheit dieser Partikel erscheint der Kunststoff transparent oder milchig weiß.

2 Theoretische Grundlagen

Es folgt nun eine vereinfachte Beschreibung des Streuprozesses von Licht in Materie. Oberflächeneffekte wie Brechung, Reflexion, Transmission oder Streuung werden nicht betrachtet. Zusätzlich wird angenommen, dass das der Untersuchung zu Grunde liegende Material homogen ist, d.h. dass sich dessen Eigenschaften nicht innerhalb des Mediums ändern. Die folgende Beschreibung bezieht sich also auf einen Lichtstrahl der den Übergang ins Medium bereits hinter sich hat.

Grundsätzlich wird ein Lichtstrahl, bei Durchquerung eines Materials der Dicke d nach dem Lambert-Beer Gesetz (1) abgeschwächt.

$$I(d) = I_0 e^{-d \cdot \sigma_e} \quad (1)$$

Wobei σ_e , der Schwächungskoeffizient, sich als Summe von Absorptionskoeffizient σ_a und Streukoeffizient σ_s darstellen lässt [1]. Es gilt:

$$\sigma_e = \sigma_a + \sigma_s$$

Die mittlere freie Weglänge l_f d.h. der Weg, der von einem Lichtstrahl zwischen zwei Interaktionen (Streuung oder Absorption) im Mittel zurückgelegt wird, ist der Kehrwert des Schwächungskoeffizienten:

$$l_f = \frac{1}{\sigma_e}$$

Trifft der Lichtstrahl auf ein Streuzentrum, hat er nach der Wechselwirkung mit diesem in der Regel eine andere Richtung. Die Winkelverteilung der gestreuten Strahlen wird durch eine

sogenannte Phasenfunktion beschrieben [2]. Diese ist wesentlicher Bestandteil des eingesetzten Streumodells.

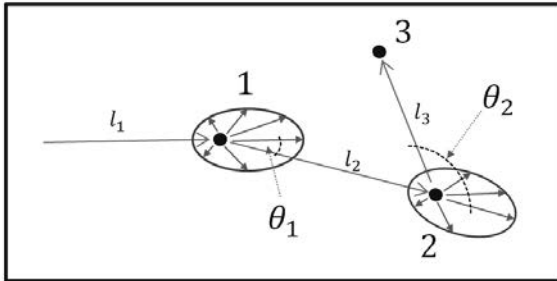


Bild 1: Schematische Darstellung eines beispielhaften Lichtstrahls im volumenstreuenden Medium: Nachdem der Lichtstrahl die Länge l_1 zurückgelegt hat, trifft er auf ein Streuzentrum (1). Die verschiedenen langen Pfeile, begrenzt durch die Ellipse, welche durch die Phasenfunktion beschrieben wird, veranschaulichen die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Streuwinkels θ . Nach dem ersten Streueignis, bei dem der Strahl um den Winkel θ_1 von seiner Ausbreitungsrichtung abgelenkt wird, legt der Strahl die Länge l_2 zurück bevor es zu einem weiteren Streueignis kommt (2). Hier ist $\theta_2 > 90^\circ$, der Strahl wird somit zurückgestreut. In Ereignis 3 wird der Strahl schließlich absorbiert nachdem er zuvor die Länge l_3 zurückgelegt hat. Der Mittelwert aller l_i entspricht der mittleren freien Weglänge l_f .

Um die Streucharakteristik zu beschreiben, gibt es mehrere Ansätze. Ist die Ausdehnung des Körpers, an dem gestreut wird, klein im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts, wird zur Beschreibung der Wechselwirkung in der Regel Rayleigh-Streuung verwendet. Dieses Modell leitet sich von der Streuung an kleinen kugelförmigen Objekten ab [3]. Sind die Streuobjekte etwa in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichts, bietet sich das Lorentz-Mie Streuomodell an, welches sich aus den Maxwellgleichungen herleiten lässt [4].

Zusätzlich zu diesen Modellen mit physikalischem Hintergrund gibt es empirisch gefundene Phasenfunktionen, die bei der Beschreibung von Volumenstreuung vielfach [5] Anwendung finden, die Henyey-Greenstein- (2) [6-7] und die Gegenbauer- Phasenfunktion [8] (3).

$$p_{HG}(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos(\theta))^{3/2}} \quad (2) \quad p_{GB}(\theta) = \frac{\alpha g}{\pi W_0 [(1+g)^{2\alpha} - (1-g)^{2\alpha}](1+g^2-2g\cos(\theta))^{(1+\alpha)}} \quad (3)$$

Beide Winkelverteilungen sind symmetrisch zur Ausbreitungsachse und sind daher nur von einem Winkel θ abhängig. Zudem haben beide den Anisotropiefaktor g $[-1 \leq g \leq 1]$ als

zentralen Parameter, dessen Vorzeichen angibt, ob die Winkelverteilung eher in Ausbreitungsrichtung (positiv) oder entgegen dieser (negativ) orientiert ist. Die Gegenbauer Phasenfunktion hat einen weiteren Parameter α [$-0,5 \leq \alpha \leq 2$] und stimmt für $\alpha = 0,5$ mit der Henyey-Greenstein Phasenfunktion überein. W_0 , der Streualbedo, ist eine Konstante. Diese Untersuchung beschränkt sich auf die mit (2) und (3) beschriebenen Phasenfunktionen.

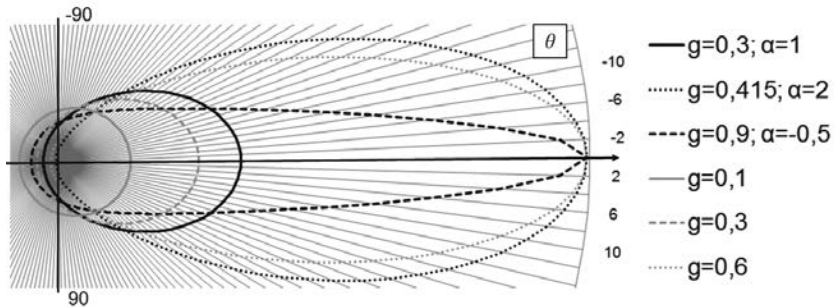


Bild 2: Gegenbauer- (GB - schwarz) und Henyey-Greenstein-Phasenfunktionen (HG -grau) für verschiedene Parameter g und α in Abhängigkeit vom Winkel θ in Grad. Hier ist nur Vorwärtsstreuung (positives g) dargestellt. Die Parameter der gepunkteten und gestrichelten GB-Funktionen sind so gewählt, dass bei maximalem und minimalem α die Vorwärtsstreuung (0°) mit der HG-Funktion für $g=0,6$ übereinstimmt. Zwischen diesen beiden Kurven wird somit aufgezeigt, welcher Anpassungsspielraum durch den zusätzlichen Parameter α gewonnen wird.

Ist im Medium die Absorption gegenüber der Streuung dominant, und kommt es somit nur vereinzelt zu Streueignissen, so spricht man von Einzelstreuung, und das Problem kann mit Formel (1) und einer Phasenfunktion analytisch gelöst werden. Sobald es jedoch viele Streueignisse gibt, kann beispielsweise die Intensität des beobachteten Lichtstrahls durch aus anderen Richtungen eingestreute Anteile lokal größer werden, und das Lambert-Beer-Gesetz (1) ist nicht mehr allgemein gültig. Das System wird dann über die sog. Strahlungstransportgleichung (engl. „radiative transfer equation“) beschrieben, die in der Regel nicht mehr analytisch lösbar ist [1]. Es bedarf zur Lösung Näherungen bzw. Vereinfachungen [9-10], oder man geht das Problem numerisch/stochastisch an.

Um die Streuprozesse nun simulativ zu beschreiben, werden zunächst die materialabhängigen Parameter σ_e bzw. l_f über Messungen und Gleichung (1) bestimmt. Über Simulationen mit vielen Streueignissen werden passende Parameter g und α für Formel (2) und (3) gesucht.

3 Abgleich von Simulationen mit Messungen

Um die Vorhersagekraft der verschiedenen Streumodelle zu prüfen, wurden verschiedene Messungen mit der Leuchtdichtekamera und dem Goniometer durchgeführt. In diesem Teil sollen einige dieser Messungen mit ihrem nachsimulierten Pendant vorgestellt werden.

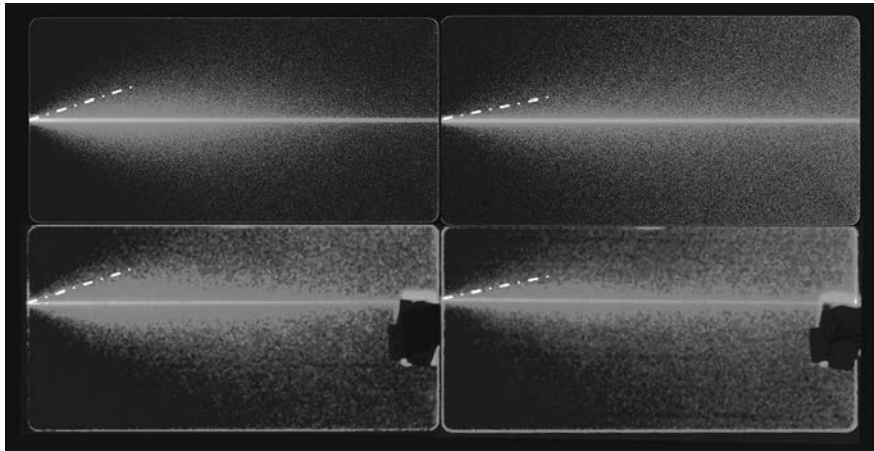


Bild 3: Laser in verschieden stark volumenstreuende Platten eingekoppelt. Simulation: oben; Leuchtdichteaufnahme (Messung): unten. Die eingezeichnete Linie dient zur Veranschaulichung und hat jeweils bei Messung und Simulation den gleichen Winkel zum Laserstrahl. Für beide Simulationen wurde die Henyey-Greenstein Phasenfunktion mit einem Anisotropiefaktor $g=0,6$ verwendet.

Bei der in Bild 3 dargestellten Messung wurde ein Diodenlaser seitlich in eine 4mm starke volumenstreuende Platte mit 200mm Länge eingekoppelt. Der sich öffnende Streukegel ist gut dafür geeignet das Ausmaß der Vorwärtsstreuung, repräsentiert durch den Anisotropiefaktor g , abzuschätzen. Die beste Übereinstimmung mit dem Streumodell basierend auf HG wurde für $g=0,6$ erzielt.

In Bild 4 ist die Lichtverteilung eines volumenstreuenden Stabes dargestellt. LED, Anfang und Ende des Stabes wurden abgedeckt, um direkt ausgekoppeltes und somit nicht gestreutes Licht zu vermeiden. Hier zeigt sich, dass der zusätzliche Parameter der GB-Phasenfunktion nützlich ist, da mit derselben Vorwärtsstreuung die Wahrscheinlichkeit für seitliche Winkel nach oben oder unten angepasst werden kann. Die Simulationen links und rechts in 4 entsprechen den gepunkteten Funktionen in Bild 2.

Für die Parameter $g=0,415$ und $\alpha=2$ wurden mit der GB-Phasenfunktion sowohl für die Lichtverteilung, als auch für den Lichtstrom gute Ergebnisse erzielt.

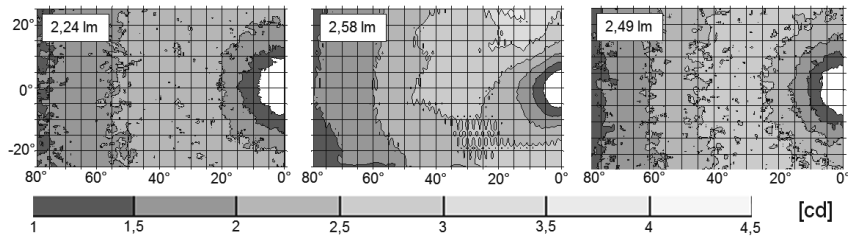


Bild 4: Abstrahlcharakteristik eines volumenstreuenden Stabs ($^\circ$ vertikal über $^\circ$ horizontal). In der Mitte die Messung, links eine Simulation mit Henyey-Greenstein ($g=0,6$), rechts mit Gegenbauer ($g=0,415$; $\alpha=2$). Jeweils links oben ist der integrierte Lichtstrom über das dargestellte Messfeld zu finden. Dass die Messung nicht rotationssymmetrisch ist, liegt an einer Werkzeugtrennung des Stabes, welche zusätzlich Licht auskoppelte.

4 Vergleichsuntersuchungen mit eingesetzten Systemen

Um sinnvolle Einsatzmöglichkeiten auszuloten, soll in diesem Teil der Einsatz von Volumenstreuern mit zwei bereits vielfach bewährten Konzepten verglichen werden. In beiden Fällen wurde ein transparenter Volumenstreuer (Plexiglas LD) zum Vergleich herangezogen.

Vergleich mit Lichtleiter

Da ein volumenstreuendes Material bereits aufgrund seiner Eigenschaften Licht auskoppelt, können weitere Maßnahmen zur Auskopplung reduziert werden oder sogar ganz ausbleiben. Gerade an Stellen, bei denen diese z.B. durch das Herstellungsverfahren nur eingeschränkt eingebracht werden können, kann das große Vorteile bringen.

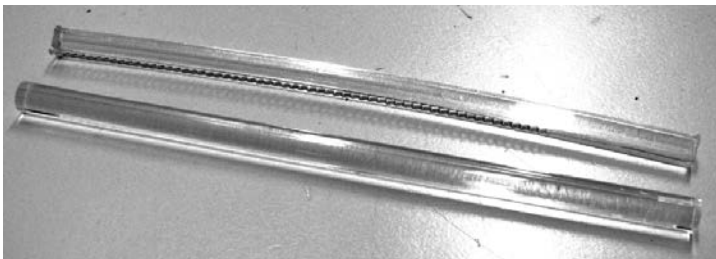


Bild 5: Lichtleiter mit Prismen als Auskopplungsoptik (oben) im Vergleich mit Stab aus transparentem volumenstreuendem Kunststoff ohne Optiken (unten).

Bei der diesem Teil zugrunde liegenden Untersuchung wurde ein Lichtleiter mit eingebrachten Optiken (7 mm Durchmesser) mit einem transparenten volumenstreuenden Stab gleichen Durchmessers verglichen (siehe Bild 5).

Beide wurden nacheinander in der gleichen Halterung gemessen, um die Rahmenbedingung (einschließlich des Lichtstroms der LED) möglichst vergleichbar zu halten.

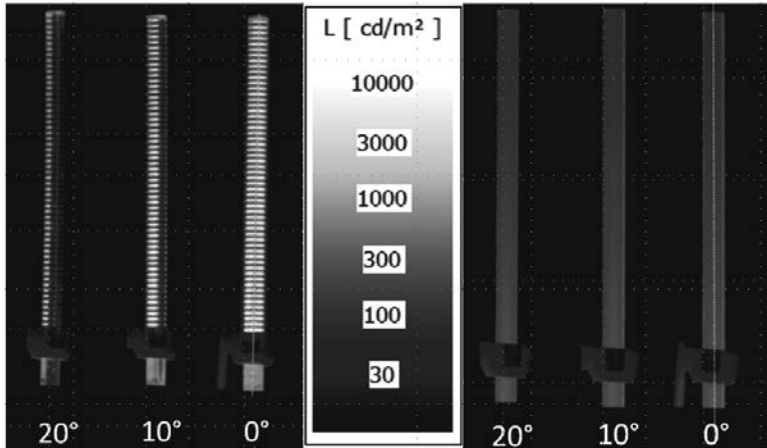


Bild 6: Leuchtdichtemessung von einem Lichtleiter mit Prismen (links) im Vergleich zu einem volumenstreuenden Stab (rechts). Die LED wird von unten eingekoppelt, die Drehachse ist entlang der Ausbreitungsrichtung.

Die Vergleichsuntersuchung der beiden Systeme ist in den folgenden Punkten zusammengefasst:

- **Effizienz:** Mit der gleichen LED ist die mittlere Leuchtdichte des Lichtleiters in Auskoppelungsrichtung (0° in Bild 6) etwa zehn Mal so hoch wie im Volumenstreuer. Vergleicht man den integrierten Lichtstrom von LED zum Messfeld für beide Systeme ergibt sich ungefähr das gleiche Verhältnis.
- **Helligkeitsverlauf:** Beide Konzepte weisen in diesem Vergleich eine gute Homogenität über die Länge auf. Durch eingebrachte Optiken lässt sich die Auskopplung beim Lichtleiter jedoch besser kontrollieren.
- **Homogenität bei Drehung:** Durch die kontrollierte Auskopplung des Lichtes büßt der Lichtleiter bei Drehung sehr schnell an Helligkeit ein und weist ein unregelmäßiges Erscheinungsbild auf, während der Volumenstreuer aus allen Richtungen gleich erscheint.

Es lässt sich feststellen, dass sich ein Stab aus volumenstreuendem Material gut als Lichtleiter einsetzen lässt. Die isotrope Lichtabstrahlung, die ein homogenes Erscheinungsbild möglich macht, wird aber mit einer sehr geringen Effizienz erkauft. Ein Mittelweg ist denkbar, indem man in ein volumenstreuendes Material zusätzlich Optiken einbringt.

Einsatz als Flächenemitter

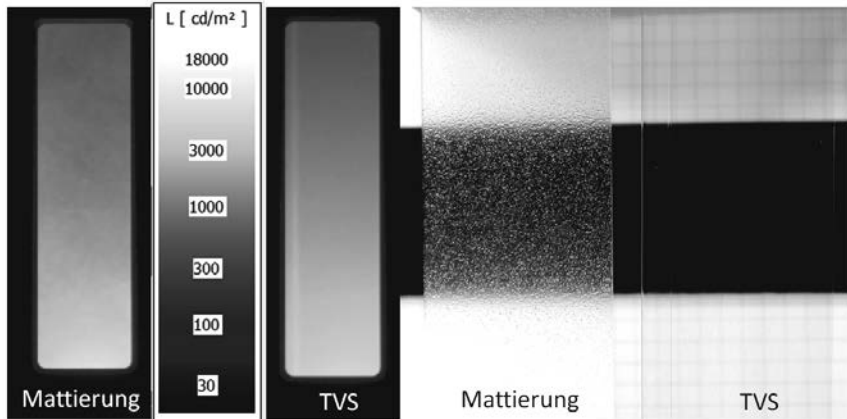


Bild 7: Vergleich zweier Kunststoffplatten jeweils links mattiert und rechts transparent volumenstreuend (TVS). Linker Teil: Leuchtdichteaufnahme (Licht wird von unten eingekoppelt); Rechter Teil: Foto im unbeleuchteten Zustand. Die beiden Platten sind im beleuchteten Zustand kaum zu unterscheiden. Betrachtet man jedoch den unbeleuchteten Fall, wird der in der Einleitung dieses Teils beschriebene Effekt deutlich: bei der mattierten Platte sind die Strukturen auch unbeleuchtet sichtbar, bei der transparent volumenstreuenden nicht.

Gleichmäßig ausgeleuchtete Flächen sind ein beliebtes Designelement in Scheinwerfern. Damit sich das gewünschte Erscheinungsbild ergibt, benötigt eine solche Fläche möglichst viele Elemente, die das Licht unter einem Winkel von 90° auskoppeln.

Dies kann z.B. durch optische Mikrostrukturen („Light curtain“) oder eine Mattierung der Oberfläche realisiert werden. Die beiden eben genannten Methoden haben allerdings zur Folge, dass auch im unbeleuchteten Zustand zwangsläufig Strukturen sichtbar sind. Ist dies nicht erwünscht, bietet sich ein transparenter volumenstreuender Kunststoff (TVS) an.

Um diese Einsatzmöglichkeiten zu untersuchen, wird im Folgenden ein Vergleich von zwei Kunststoffplatten (160x40x2mm) präsentiert. Eine dieser Platten besteht aus transparentem volumenstreuendem Kunststoff, die andere ist ebenfalls aus transparentem Kunststoff, jedoch auf einer Seite mit einer Mattierung versehen, welche als Auskoppeloptik fungiert. Die Stärke der Mattierung wurde so gewählt, dass die Menge des ausgekoppelten Lichtes bei beiden Systemen ungefähr gleich ist.

5 Weitere Einsatzmöglichkeiten

Um ein homogenes Erscheinungsbild zu erzielen, ist es von Vorteil, wenn die Lichtstrahlen in möglichst vielen Richtungen die leuchtende Oberfläche verlassen. Streuprozesse sind ein sehr gutes Mittel um diese Durchmischung zu erzielen. Dabei kann es vorkommen, dass das Ausmaß der Streuung, die durch die Ein- und Austrittsfläche möglich ist, nicht ausreicht. Für solche Fälle bieten sich volumenstreuende Kunststoffe an.

Es bleibt anzumerken, dass die Konzentration der streuenden Elemente im Kunststoff auf die jeweilige Anwendung - zumindest grob - angepasst sein muss. Zu viele streuende Elemente bedeuten einen auffallenden Leuchtdichteverlauf, zu wenige ein ineffizientes System. Dies ist gegenüber anderen Konzepten, bei denen die Optik ins Spritzgusswerkzeug eingebracht wird, ein Nachteil. Leider ist der Einsatz von volumenstreuenden Kunststoffen in Scheinwerfern weltweit nicht ohne weiteres möglich. Eingesetzte Materialien auf dem nordamerikanischen Markt müssen auf der sog. AMECA-Liste stehen [11]. Hier wird sichergestellt, dass sich Kunststoffe nicht durch Witterung trüben. Dies hat jedoch die Konsequenz, dass bereits durch den Herstellungsprozess trübe Materialien, wie z.B. die meisten volumenstreuenden Kunststoffe, von Beginn an von einer Verwendung ausgeschlossen sind.

Nichtdoweniger haben volumenstreuende Kunststoffe im Hinblick auf Designrends wie milchige Dickwandoptiken und matt erscheinende Flächen ein wachsendes Potential. Konkrete Einsatzmöglichkeiten für volumenstreuende Kunststoffe im Frontscheinwerfer sind z.B. das Positionslicht oder das Seitenmarkierungslicht. Denkbar ist jedoch auch eine Akzentbeleuchtung oder ein „ambient light“, bei denen es keine oder nur geringe gesetzlich vorgeschriebene Mindesthelligkeiten gibt. Auch um die Mindestwerte für die Sichtbarkeit von Signalfunktionen zu erfüllen, sind Lösungen aus volumenstreuendem Kunststoff eine gute Möglichkeit Design mit technischem Nutzen zu verbinden.

Lösungen mit konventionellen Optiken, in die Streupartikel zur gezielten Durchmischung des Lichts eingebracht werden, sind ebenfalls denkbar. Nicht zuletzt könnte auch beim Prototypenbau volumenstreuendes Material eingesetzt werden, falls leuchtende Elemente erwünscht sind, die (noch) keine gesetzlichen Werte erfüllen müssen.

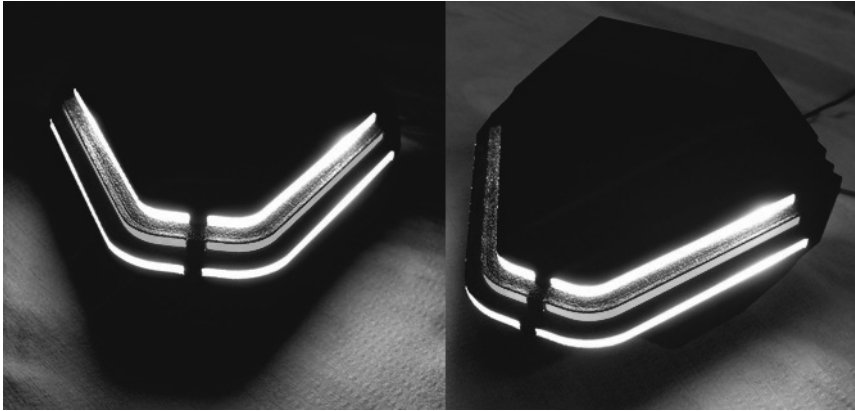


Bild 8: Anwendungsbeispiel einer Akzentbeleuchtung realisiert mit volumenstreuenden Platten.

6 Zusammenfassung

In dieser Untersuchung wurden einige Einsatzmöglichkeiten für volumenstreuende Kunststoffe aufgezeigt im Frontscheinwerfer. Auch wenn die Systeme zu ineffizient sind um ohne weiteres ein Blinklicht oder ein Tagfahrlicht zu realisieren, bieten sich viele denkbare Anwendungen. Um Erscheinungsbild und Lichtwerte bereits während der Entwicklung beurteilen zu können wurde außerdem das Thema Simulation behandelt. Dazu wurden die theoretischen Hintergründe von Volumenstreuung skizziert und es wurde gezeigt, dass sich mit Simulationssoftware gute Vorhersagen treffen lassen.

- [1] Wojciech, J.: Efficient Monte Carlo methods for light transport in scattering media, University of California, Diss. 2011
- [2] Kazimi, T.: Vielfachstreuungsmethoden zur photorealistischen Visualisierung von Schneeflächen, TU Dresden, Diplomarb. 2011
- [3] Stöcker, H.: Taschenbuch der Physik. Frankfurt a.M. Wissenschaftlicher Verlag Harri 2007
- [4] Lipson S.G., Lipson H., Tanhhauser, D.S.: Optical physics. New York Press Syndicate of the University of Cambridge 1995
- [5] Narasimhan, S.G., et al.: Acquiring scattering properties of participation media by dilution, ACM Transactions on Graphics (TOG) 25 (2006) 3 S. 1003-1012
- [6] Henyey, L.G. & Greenstein, J.L.: Diffuse Radiation in the Galaxy, Astrophysics Journal 93 (1941) S. 70-83
- [7] Harrington, J.P.: The Henyey-Greenstein phase function, Internet, https://www.astro.umd.edu/~jph/HG_note.pdf, abgerufen am 22.02.2016.
- [8] Lindbergh, T et. al.: Spectral determination of a two-parametric phase function for poly-dispersive scattering liquids. Optics express, 17(3) (2009) S. 1610-1621.
- [9] Jensen, H.W., et al.: A practical model for subsurface light transport, Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (2001) S. 511-518
- [10] d'Eon, E., & Irving, G.: A quantized-diffusion model for rendering translucent materials, ACM Transactions on Graphics (TOG) 30 (2011) 4 S. 56
- [11] AMECA: Lists of Acceptable Plastics, Internet, <http://www.ameca.org/list-of-acceptable-plastics/>, aufgerufen am 26.02.2016.

VISION ONE – Innovation, Präzision, Faszination

Einheitliches Signallichtkonzept für mehr Komfort und Sicherheit

VISION ONE – Innovation, Precision, Fascination

Uniform signal light concept for more comfort and safety

Dipl.-Ing. **Martin Mügge**, Dipl.-Designer (FH) **Carsten Hohmann**,
HELLA KGaA Hueck & Co., Lippstadt

Kurzfassung

Die gesetzlichen Vorgaben für Signalfunktionen am Kraftfahrzeug und zum Anbau der lichttechnischen Komponenten sorgen für ein einheitliches Signalbild im Straßenverkehr, für ein allgemeines Verständnis und ein schnelles, sicheres Erkennen der Lichtsignale. Dem Einfluss der Designer und der stetig wachsenden technologischen Möglichkeiten ist es zu verdanken, dass trotzdem nicht alle Scheinwerfer und Signalleuchten gleich aussehen. Dabei stehen die Generierung eines marken- oder modelltypischen Erscheinungsbildes und der Einsatz neuer Technologien im Vordergrund. Licht auf die Straße zu bringen oder als Signalfunktion im Verkehrsraum sichtbar zu machen reicht alleine nicht mehr aus, vielmehr suchen Designer nach zusätzlichen Möglichkeiten der Individualisierung und der markentypischen Gestaltung. Dies können optimierte oder gänzlich neue Signalfunktionen oder auch zusätzliche Lichtapplikationen sein, die zur Komfortsteigerung, zur Erhöhung der Sicherheit oder zur Individualisierung genutzt werden.

HELLA hat mit dem neuen Innovationsfahrzeug VISION ONE ein Konzept realisiert, welches derartige Ansätze in beeindruckender Weise am gesamten Fahrzeug darstellt. Design und Technik verbinden sich hierbei zu einem ganzheitlichen Fahrzeugbeleuchtungskonzept.

Eine Coming-/Leaving-Home-Funktion mit farbiger Akzentuierung in Cyan sorgt für eine prägnante Inszenierung beim Öffnen und Schließen des Fahrzeugs. Neben der sich bereits im Markt befindlichen Scheinwerferintegration wurden beim Innovationsfahrzeug auch die Heckleuchten, sowie weitere Exterieurleuchten mit einbezogen. Im VISION ONE ist die Coming-/Leaving-Home-Funktion mittels extrem schmalen EdgeLight-Lichtleitern umgesetzt und in den Heckleuchten mit Fahrtrichtungsanzeiger/Rückfahrlicht, bzw. in den Scheinwerfern mit Fahrtrichtungsanzeiger/Positions-Tagfahrlicht kombiniert. Die Mehrfachfunktionen weisen im Innovationsfahrzeug ein sehr homogenes Erscheinungsbild auf, das durch die

Verwendung von speziell geformten EdgeLight-Lichtleiter und Materialkombinationen erreicht wird. Dabei setzen verschiedene Animationen diese Lichtfunktionen noch zusätzlich in Szene.

Die Heckleuchten beinhalten außerdem eine neuartige, das Rückfahrlicht unterstützende adaptive Fahrbahnausleuchtung, für ein besseres Erkennen von Personen und Hindernissen in Fahrzeughöhe und somit einer Steigerung von Komfort und Sicherheit.

Ein neues Optikkonzept wurde auch für das Schlusslicht eingesetzt. Hier wird ein, in der Außenlichtscheibe integrierter, transluzenter Optikstreifen von einer Laser-Projektionseinheit beleuchtet. So kann die bauartbedingte Signaturunterbrechung zwischen den Leuchteilen auf ein Minimum reduziert werden, weil die Optikstreifen bis zum Rand der Lichtscheiben geführt sind.

Das Schluss-Bremslicht wurde mit einer hochpräzisen, dunkel anmutenden Mikrolochblende verdeckt und auch beim Rückstrahler wurden neue Wege beschritten. Die passive Lichtfunktion der Heckleuchten nutzt erstmals folienbasierte holografische Optiken.

Neben Scheinwerfern und Heckleuchten beinhaltet das Beleuchtungskonzept zudem neuartige im Seitenschweller integrierte Einstiegsleuchten mit Multilinsenarrays und zusätzliche Signalfunktionen im Kühlergrill. Zweifarbige seitliche Fahrtrichtungsanzeiger in den Außenspiegeln und ebenfalls zweifarbige Kennzeichenleuchten zeigen das Potential dieser Leuchten für Coming-/Leaving-Home-Inszenierungen.

Das innovative, einheitliche Lichtkonzept des VISION ONE führt in seiner Gesamtheit zu neuen Ansätzen der Individualisierung und einer Steigerung von Komfort und Sicherheit.

Abstract

The statutory requirements for signal functions on vehicles and the mounting of the lighting technology components ensure uniform signaling for all traffic, general understanding and fast, reliable recognition of light signals. The fact that not all headlamps and signal lights look the same despite these regulations is down to the influence of the vehicle designers, who follow their brand's typical look for vehicles and, in particular, headlamps and rear combination lamps. Simply shining light on the road or having a signal function that is visible to other traffic is no longer enough – instead, designers are always on the lookout for other ways of customizing and marking out their brand. Ideally, these will take the form of lighting technology features that can also impress potential customers in the sales room or from the pages of the vehicle brochure. They may include optimized or new signal functions or additional applications for colored lights that increase convenience, boost safety and give the vehicle a personal touch.

For a new innovation vehicle, HELLA has developed a concept that will wow onlookers with such features throughout the vehicle. Here, design and technology combine to create a harmonized vehicle lighting concept.

A coming-/leaving-home-function with colored lighting offers the driver a stylish welcome and farewell. The integration of this function into the headlamps is nothing new, but its inclusion in the rear combination lamps and several more of the vehicle's light functions and components is a true innovation. In the VISION ONE the coming-/leaving-home-function is performed by extremely slim light guides combined with a direction indicator/backup light in the rear lamps and direction indicator/daytime running light in the headlamps. A specially designed light guide and a combination of different materials ensures that the multitude of functions present a highly homogeneous appearance. Animations give the function an impressive backdrop.

In addition to this, the rear combination lamp contains adaptive lighting for road illumination around the vehicle rear end, which is activated together with the backup light. This optimizes safety by making it easier to spot people or obstacles close to the vehicle.

A new optical concept realizes the tail function. A translucent light guide rip molded onto the outer lens is lit homogeneously by a decoupled laser light projection unit. So the visible split of the tail light signature between the both parts of the rear lamp is reduced to a minimum distance, because the light guide ribs are designed up to the boundaries of the lenses.

A large, homogeneously lit tail-stop light with a high-quality decorative dark screen at the light output area is another highlight of the rear combination lamp and the passive lighting function of the reflex reflector has also been re-invented with a new, holographic element based on foil technology of volume holograms.

Beside the headlamps and rear lamps the uniform signal light concept of the vehicle shows further lighting functions around the car, new two-stage entry lamps with special multi-lens-array-technology built into the doorsteps and additional lighting in the radiator grille. The side direction indicators in the outer mirrors and the license plate lamps in two-color-mode demonstrate additional innovative lighting functions for the coming-/leaving-home-scenario.

This innovative uniform signal light concept of the VISION ONE demonstrates new ideas and leads to new terms of customization, individualization and increased comfort and safety.

1. Motivation

Lichtsysteme an Fahrzeugen unterliegen seit der Einführung von optikfreien Abdeckscheiben und der LED als kleine, individuell positionierbare Lichtquelle einem stetig wachsenden Designeinfluss. Das Design der Lichtsysteme ist mittlerweile ein fester Bestandteil der Fahr-

zeuggestaltung, können doch Scheinwerfer und Heckleuchten das Erscheinungsbild des Fahrzeugs unterstützen und z.B. durch den Einsatz von Lichtsignaturen das Corporate Design prägen. In den letzten Jahren wurden vermehrt Innovationen in der Fahrzeugbeleuchtung als zentrales Element für Marketingaktivitäten und in der Werbung genutzt. Dieser Trend, so die Einschätzung von HELLA, wird sich auch bei zukünftigen Fahrzeuggenerationen noch verstärken, weil mit neuen Technologien, Materialien und Fertigungsverfahren zusätzliche Treiber aufkommen werden.

Der Trend motivierte HELLA, nach dem LIGHTRON Concept (2012),



Bild 1: HELLA Innovationsfahrzeug LIGHTRON, 2012

ein neues Innovationsfahrzeug mit technologisch und gestalterisch anspruchsvollen Lichtsystemen auszustatten und dabei ein ganzheitliches Lichtkonzept für die Außenbeleuchtung des Fahrzeugs zu verfolgen. Das Innovationsfahrzeug VISION ONE gibt einen Ausblick auf neue Technologien, erweiterte Funktionen und Lichtinszenierungen die später auch ihren Weg in die Serienproduktion finden können und werden.

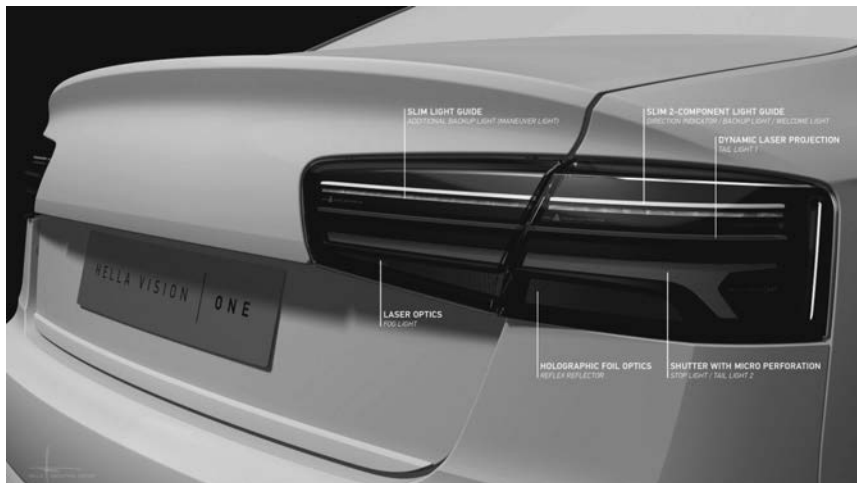


Bild 2: HELLA Innovationsfahrzeug VISION ONE, Ansicht Heckleuchte

2. Design und Technologie

Das ganzheitliche Beleuchtungskonzept basiert auf einem Design, welches für die markanten Signalfunktionen geradlinige, präzise, extrem schmale Lichtaustritte und diffus-homogen leuchtende Signaturen vorsieht. Für den Fahrtrichtungsanzeiger und das Positions-/Tagfahrlicht im Scheinwerfer, sowie für den Fahrtrichtungsanzeiger und das Rückfahrlicht und Laser-Schlusslicht der Heckleuchte war das Ziel die Dicke der EdgeLight-Lichtleiter auf 3 Millimeter zu reduzieren.

EdgeLight-Lichtleiter sind für diese Funktionen, auch als Kombination von Fahrtrichtungsanzeiger mit Positions-/Tagfahrlicht bereits im Markt, allerdings in bisherigen Systemen mit zwei- bis dreifacher Wandstärke ausgeführt. Um den gestalterischen Vorgaben gerecht zu werden und alle Funktionen trotz begrenztem Bauraum umsetzen zu können, wurde auch für dieses Beleuchtungskonzept auf eine Kombination von mehreren Funktionen mit einem gemeinsamen Lichtaustritt zurückgegriffen, allerdings mit dem erweiterten Anspruch auch eine farbige Coming-/Leaving-Home-Funktion zu integrieren. Der EdgeLight-Lichtleiter des Scheinwerfers wird von weißen, gelben und Cyan-LED gespeist und kombiniert so Positions-/Tagfahrlicht, Fahrtrichtungsanzeiger, sowie die Coming-Leaving-Home-Funktion.



Bild 3: Coming-/Leaving-Home-Funktion der Fahrzeugfront

Das EdgeLight zieht sich als unterbrochenes Element durch den kompletten Scheinwerfer. Der außenseitige, kleinere Teilbereich ermöglicht zugleich einen Betrieb als Seitenmarkierungslicht.

In den Heckleuchten werden ebenfalls weiße, gelbe und Cyan-LED eingesetzt. Hier wurden das Rückfahrlicht, der Fahrtrichtungsanzeiger und die Coming-/Leaving-Home-Funktion kombiniert.



Bild 4: Coming-/Leaving-Home-Funktion des Fahrzeughecks

Die Herausforderung besteht bei diesem Konzept in der Lichteinkopplung von 3 unterschiedlich farbigen LED in einen sehr schmalen Lichtleiter und der Zielsetzung einer möglichst homogenen Ausleuchtung für alle Funktionen. Im Scheinwerfer wurden dazu zusätzliche Primäroptiken zur Fokussierung des LED-Lichts in den Lichtleiter vorgesehen, um den hohen Lichtstärkeanforderungen von Tagfahrlicht und Fahrtrichtungsanzeiger gerecht werden zu können, während in den Heckleuchten die Dreier-LED-Gruppen direkt in den Lichtleiter ein-koppeln. Die sehr homogene Ausleuchtung wird durch eine spezielle Ausführung der Lichtlei-ter als 2K-Bauteil unterstützt. Dabei ist die Lichtaustrittsfläche des transparenten Lichtleiters mit einer diffusen Schicht aus einem volumenstreuenden Material überspritzt. Dadurch be-kommt die Lichtaustrittsfläche Tiefe und ist, insbesondere bei der Betrachtung von oben, als dreidimensionales Volumen und nicht mehr als Fläche zu erkennen.

Das auf präzisen schmalen Linien basierende Beleuchtungskonzept wurde konsequent für das gesamte Fahrzeug umgesetzt. Beginnend als Lichtstreifen im Kühlergrill zieht sich die präzise Lichtsignatur durch den Scheinwerfer und wird im Seitenspiegel fortgesetzt und am Fahrzeugheck durch die Heckleuchte wieder aufgenommen.

Bei der Coming-/Leaving-Home-Funktion wird zusätzlich eine präzise Linie parallel zum Fahrzeug auf die Fahrbahn projiziert, ergänzt durch den Namensschriftzug des Fahrzeugs.

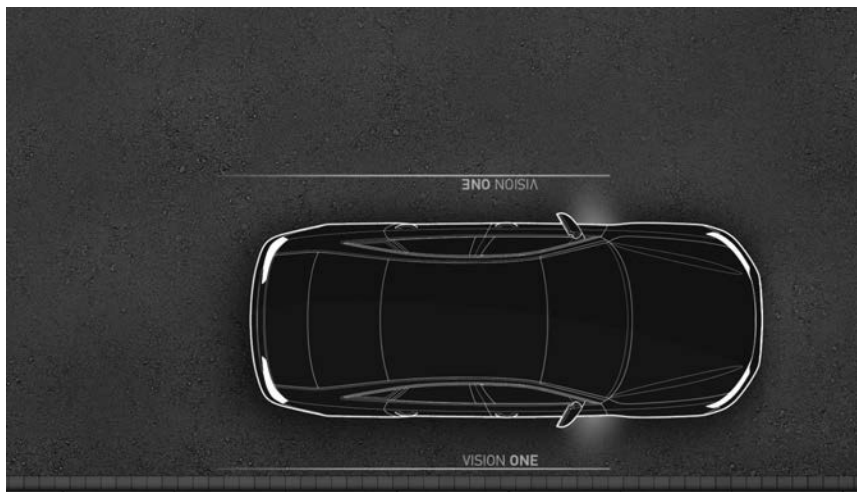


Bild 5: Lichtprojektion auf Fahrbahn für Coming-/Leaving-Home-Funktion

Das Schluss-/Bremslicht wurde mit einem konventionellen Optiksystem, einem indirekten Reflektor und einer Zusatzlichtscheibe ausgeführt, bietet jedoch durch den Einsatz von Hochleistungs-LED genug Potenzial für eine dunkle Anmutung im unbeleuchteten Zustand. Der von oben beleuchtete Reflektor ist als ungestufte Freiformfläche mit Kissenoptiken auf Prismenstufen ausgeführt worden. Diese Reflektorgestaltung, die geringe Streuung der Kissenoptiken und die Erodierstruktur auf der Zusatzlichtscheibe ermöglicht eine homogene Ausleuchtung der gesamten Funktionsfläche, auch unter seitlichen Betrachtungswinkel.

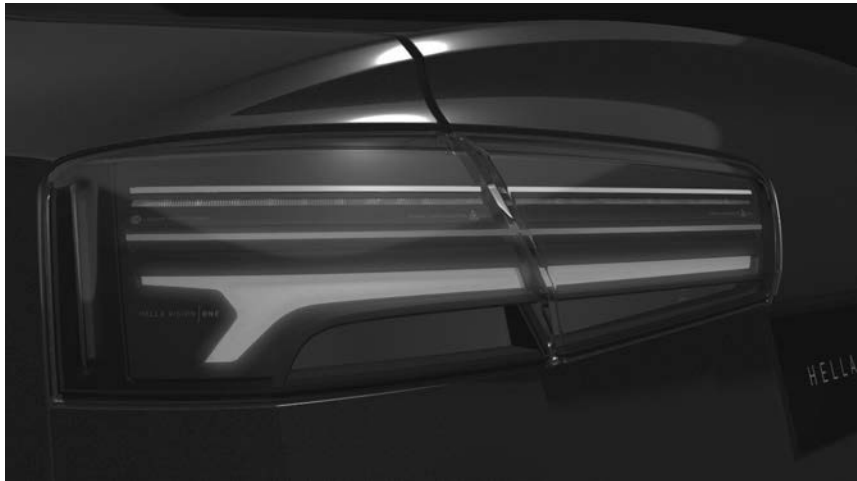


Bild 6: Schluss-Bremslicht, Bremslicht-Funktion nur untere Fläche

Die Performance des Systems ist so gut, dass als neuartiges Gestaltungselement ein schwarz beschichtetes Mikrolochblech mit einem Lochdurchmesser von 0,3 Millimetern vor der Zusatzlichtscheibe positioniert werden konnte und trotzdem noch die für ein Bremslicht notwendige Intensität erreicht wird.

3. Schmale Lichtsignaturen

Nach Jahren extremer formaler Vielfalt in der Fahrzeugbeleuchtung zeichnet sich jetzt immer mehr ein Trend zu reduzierten Signaturen, zu gestalterischer Präzision und Geradlinigkeit ab. Dabei spielt es keine Rolle ob als diffuse, hinterleuchtete Zusatzlichtscheibe oder als Lichtleitersystem, ob als umlaufende Kontur oder einfache lang gestreckte Linie, fast immer ist eine schmale, homogen ausgeleuchtete Signatur das Ziel.

Mit der Lichttechnik des VISION ONE geht HELLA noch einen Schritt weiter. Auch lichtstarke Funktionen, wie Fahrtrichtungsanzeiger und Rückfahrlicht, immerhin Signalfunktionen mit weit höheren Lichtstärken als bei einem Schlusslicht, sind als feine linienförmige Funktion mit lediglich 3 Millimetern Lichtaustrittshöhe ausgeführt und zudem noch in einem gemeinsamen Lichtleiter mit einer Coming-/Leaving-Home-Funktion kombiniert. Im Scheinwerfer ist ein ähnlicher Aufbau für eine Kombination von Fahrtrichtungsanzeiger, Positions- und Tagfahrlicht, sowie die farbige Coming-/Leaving-Home-Funktion realisiert. Um die hohen Lichtstärken des vorderen Fahrtrichtungsanzeigers und des Tagfahrlicht zu realisieren wurden Hochleistungs-LED eingesetzt, deren Licht durch eine Primäroptik (Linse) gebündelt und in den davor angeordneten EdgeLight-Lichtleiter eingestrahlt wird. Der 2K-Lichtleiter mit seiner diffusen Lichtaustrittsfläche zeigt, in der Abstimmung mit den Einkoppeloptiken und den LED-Positionen, eine gute Homogenität in der Ausleuchtung, selbst in dem stärker zurück laufenden Teilbereich.



Bild 7: Tagfahrlicht/Fahrtrichtungsanzeiger, zweiteilig

Die schmale Lichtsignatur setzt sich als Triple-Funktion bis in den Kühlergrill fort. Die beleuchtete Kühlergrillrippe ist Bestandteil der Coming-/Leaving-Home-Inszenierung des VISION ONE und wird auch für eine erweiterte Warnblinkfunktion angesteuert.



Bild 8: Fahrtrichtungsanzeiger Front, für Warnblinker auch im Kühlergrill

Die gleiche LED-Konfiguration kommt auch in der Heckleuchte zum Einsatz, wobei hier auf die zusätzliche Primäroptik verzichtet werden konnte. Die LED koppeln direkt in die verbreiterte Rückseite des EdgeLight-Lichtleiters ein, der sich, bis zu drei Millimeter Wandstärke am Lichtaustritt verjüngt. Der gekrümmte Verlauf des Lichtleiters, die LED liegen nicht in der gleichen Ebene des Lichtaustritts, verhindert einen direkten Blick auf die LED-Spots und unterstützt somit die homogene Ausleuchtung.



Bild 9: Fahrtrichtungsanzeiger und Schlusslicht der Heckleuchten

Das Rückfahrlicht wird durch eine neue, innovative Komfortfunktion unterstützt, die ebenfalls auf einem EdgeLight-Lichtleiter mit nur drei Millimeter Wandstärke basiert. Bereits 2012 im HELLA-Innovationsfahrzeug LIGHTRON Concept wurde eine das Rückfahrlicht unterstützende, zusätzliche seitliche Ausleuchtung der Fahrbahn integriert, die dynamisch durch den entsprechenden Lenkradeinschlag bei Rückwärtsfahrt aktiviert wurde. Das aktuelle Innovationsfahrzeug VISION ONE zeigt die Weiterentwicklung dieser Funktion, nun mit einer Fahrbahnausleuchtung hinter dem gesamten Fahrzeugheck bis zum Seitenbereich neben dem Fahrzeug, und einer dynamischen Schaltung die eine Schwerpunktverlagerung des Ausleuchtbereichs ermöglicht.



Bild 10: Rückfahrlicht (oberer Streifen) und Fahrbahnausleuchtung (unterer Streifen)

Wird der Kofferraum geöffnet, kann die Funktion ebenfalls aktiviert werden um den Bereich hinter dem Fahrzeug hell ausleuchten. Diese zusätzliche Komfortfunktion zur Fahrbahnausleuchtung ist nur mit weißen Hochleistungs-LED ausgestattet, die mittels einer Primäroptik in den EdgeLight-Lichtleiter einkoppeln. Die Kombination aus Primäroptik und Lichtleiter ermöglicht einen guten Wirkungsgrad, um das Licht möglichst effektiv in Richtung Fahrbahn abzustrahlen.

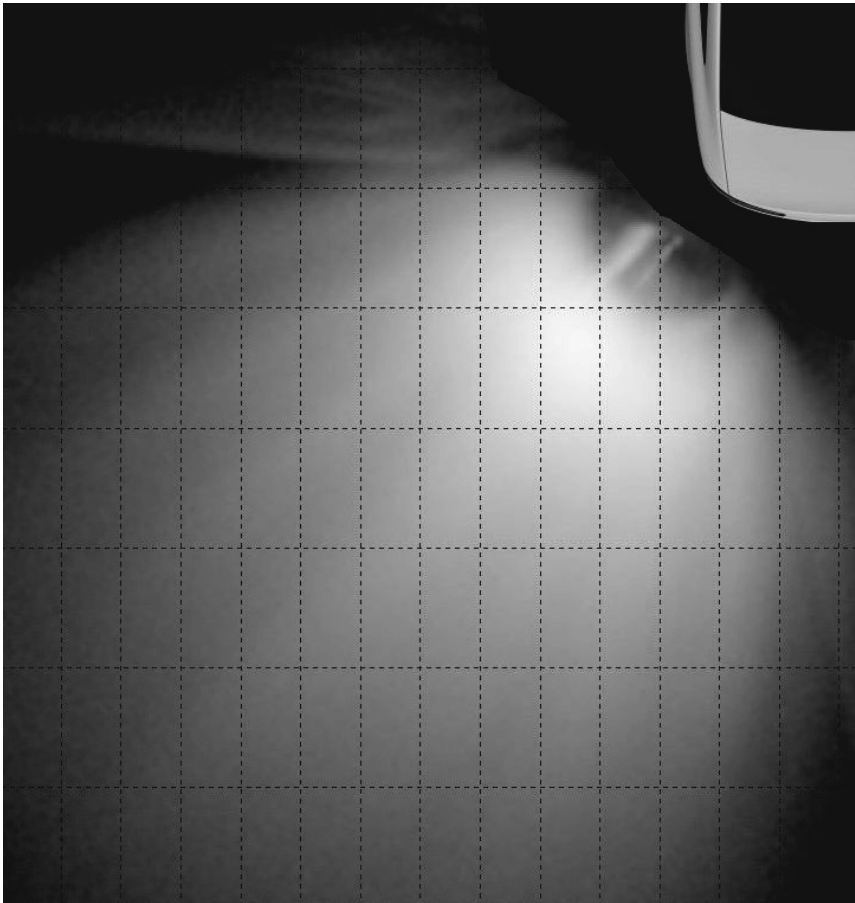


Bild 11: Simulation der Strassenausleuchtung der aussenseitigen Leuchte, 6m x 6m

4. Laser in Signalfunktionen

Spätestens seit der Einführung von Laser-Lichtquellen im Scheinwerfer rückt auch die Laserdiode als Lichtquelle für Signalfunktionen in den Blickpunkt. Die abweichenden Anforderungen für den Einsatz in Signalfunktionen, wie z.B. die Verwendung von Laserdioden zur Signaturausleuchtung, Beleuchtung flächiger Funktionsfelder und die Anmutung einer Signalfunktion, definieren jedoch stark die Einsatzmöglichkeiten der Laserdiode bzw. die Substitutionsmöglichkeiten von LED durch Laserdioden. Aktuell sind bereits rote Laserdioden un-

verschiedlicher Leistungsklassen für Signalfunktionen verfügbar, allerdings nicht als automotiv spezifizierte Lichtquellen. Die kritischen Randbedingungen automobiler Lichttechnik, insbesondere die thermischen Anforderungen an Lichtquellen, stellen die Hersteller von Laserdioden aktuell noch vor Herausforderungen. Laserdioden bieten den Vorteil eines sehr kleinen Lichtaustritts und einer engen, meist elliptischen Lichtverteilung. Durch kleine Primäroptiken ist eine sehr gute Fokussierung oder eine gewünschte Aufweitung des Lichts möglich, wobei auch wellenoptisch berechnete Optiken genutzt werden können. Eine Signalfunktion, beispielsweise das Nebelschlusslicht, kann dadurch extrem klein gestaltet werden und Designern, unter Berücksichtigung eines 100-Millimeter-Abstands zum Bremslicht, mehr Gestaltungsfreiheit in einer Heckleuchte ermöglichen. Die einfachere Lichteinkopplung in dünne Lichtleiter oder die Nutzung in optischen Systemen mit diffraktiven oder holografischen Optiken sind weitere Vorteile der Laserdioden.

Der von der LED eingeleitete Trend zu einer dunkelroten Lichtfarbe, 625nm bis 630nm, kann durch Einsatz von Laserdioden nochmals deutlich intensiviert werden. Laserdioden sind in einem breiten Range von 638nm bis zu 660nm, in Ausnahmen auch 670nm, erhältlich. Welche Lichtfarbe bei einer gewünschten Funktion sinnvoll einsetzbar ist hängt dabei auch von der optischen Leistung der jeweiligen Laserdiode ab.

Das typische Specklemuster einer von Laserlicht beleuchteten Fläche signalisiert dem Betrachter sofort, dass hier keine LED als Lichtquelle verwendet ist. Das Specklemuster polarisiert aber zugleich. Nicht wenige Betrachter einer Laser-Signalfunktion fühlen sich durch das unruhige Specklemuster der Ausleuchtung irritiert und empfinden die Speckle-Ausleuchtung als störend. Maßnahmen zur Reduzierung oder Eliminierung des Specklemusters sind deshalb unbedingt zu entwickeln und gegebenenfalls anzuwenden.

Zukünftige innovative Lichtsysteme auf Basis diffraktiver oder holografischer Optiken sind hervorragend für Laserdioden geeignet. Hologramme, insbesondere Bildhologramme, die beispielsweise eine grafische 3D-Signatur erzeugen, lassen sich mittels einer Laserdiode als Lichtquelle deutlich schärfer und kontrastreicher rekonstruieren als mit einer spektral breiteren LED.

Die Heckleuchten des VISION ONE beinhalten zwei völlig unterschiedliche Laser-Signalfunktionen. Das Nebelschlusslicht ist als extrem kleine Funktion ausgeführt.

Eine Freiformlinse mit den Abmessungen acht zu fünf Millimeter, von nur einer Laserdiode axial beleuchtet, generiert die rautenförmige Lichtverteilung eines ECE-Nebelschlusslichts. Die optische Leistung der verwendeten Laserdiode liegt bei 170mW. Eine derart kleine Lichtaustrittsfläche des Nebelschlusslichts liefert eine entsprechend hohe Leuchtdichte und bewirkt damit eine sehr gute Erkennbarkeit bei Nebel aber auch eine hohe Blendung bei

missbräuchlicher Betätigung des Nebelschlusslichts. Vorteilhaft ist ein kleines Nebelschlusslicht für die gestalterische Freiheit der Leuchten-Designer, weil es für die Schluss-Bremslichtfunktion mehr Raum zur Gestaltung zur Verfügung stellt und trotzdem der gesetzlich vorgeschriebene Mindestabstand von 100mm zum Bremslicht eingehalten werden kann. Die zweite Signalfunktion mit Laserdioden als Lichtquelle ist ein zusätzliches Schlusslicht mit einer speziellen lichttechnischen Ausführung. Die Signalfunktion selbst wird für einen Betrachter lediglich als beleuchtete, diffus-rote Lichtleiterrippe in der Abschlussscheibe sichtbar. Die Lichtquelle selbst ist nicht erkennbar.



Bild 12: Laser-Schlusslicht

Die Lichtquelle befindet sich, integriert in einem speziellen Optiksistem, hinter einer Blende mit einer kleinen, schlitzförmigen Öffnung. Das Licht einer seitlich positionierten Laserdiode wird durch eine Primärlinse fokussiert und auf einen Drehspiegel gelenkt. Der Drehspiegel ist ausgeführt als dreiseitiges Spiegelement, der das Licht in den definierten Winkelbereich ablenkt um die rückseitige Lichteintrittsfläche der Lichtleiterrippe einzeilig zu scannen und somit linear zu beleuchten. Durch die Drehung des Spiegels erfolgt der Scanvorgang in schneller Folge, für einen Betrachter nicht wahrnehmbar, und es entsteht das statische Bild der Ausleuchtung der Lichtleiterrippe. Bei bewusster Animation und sehr langsamer Drehbewegung des Spiegels kann ein Beobachter jedoch den Scanvorgang verfolgen. Eine solche verlangsamte, sichtbare Animation des Schlusslichts könnte Bestandteil einer Coming-/Leaving-Home-Funktion sein oder beim Einschalten des Schlusslichts erfolgen.

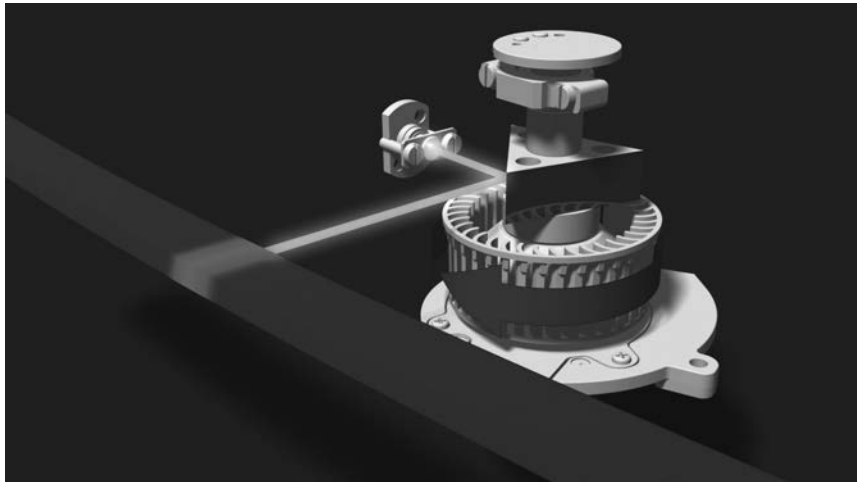


Bild 13: Prinzip des Drehspiegel-System für das Laser-Schlusslicht

Da der vom Drehspiegel abgelenkte Laserstrahl nicht sichtbar ist, erscheint für einen Betrachter die Beleuchtung der Lichtleiterrippe unerwartet wie aus dem Nichts. Heute üblichen Signalfunktion ist immer, meistens direkt sichtbar, die Lichtquelle zugeordnet, z.B. ist sie in Reflektoren sichtbar oder am Ende von stabförmigen Lichtleitern positioniert. Eine leuchtende Lichtleiterrippe in der Aussenscheibe ohne jegliche, direkt zugeordnete Lichtquelle ist ein ungewohntes Bild und damit ein neues, innovatives Gestaltungselement, möglich durch den Einsatz einer Laserdiode.

Dieses Lichtsystem ist mit einer LED-Lichtquelle in dieser Qualität nicht umsetzbar und zeigt dass die Vorteile von Laserdioden in speziellen optischen Systemen vollständig genutzt werden können und somit ein entsprechend hoher Wirkungsgrad zur Verfügung steht. Um das Potential der Laserdiode voll ausnutzen zu können, bedarf es neuer innovativer Optiksyste-me und neuer Ansätze in der Gestaltung.

5. Animiertes Lichtkonzept

Eine Lichtinszenierung wird erst durch animierte Lichtfunktionen und farbige Akzenten zum visuellen Erlebnis, beides wurde beim Innovationsfahrzeug VISION ONE umgesetzt.

Dabei ist die Animation der Fahrtrichtungsanzeiger als wischender Blinker bereits als funktio-naler Stand der Technik zu betrachten. Im Pannenfall, bei Betätigung des Warnblinkers, kommen beim VISION ONE jedoch neue Animationen des Fahrtrichtungsanzeigers zum

Tragen. Die Kühlergrillbeleuchtung wird als Teil des Warnblinkers hinzugenommen und neue Blinkzyklen und Blinkrhythmen erzeugen eine erhöhte Aufmerksamkeit. Dies könnte beispielsweise in Zukunft bei der Kennzeichnung von Einsatz- und Rettungsfahrzeugen genutzt werden.



Bild 14: Animation des Fahrtrichtungsanzeigers an der Front als Warn blinker

Auch für den potenziellen Fahrzeugkäufer ist eine markante Coming-/Leaving-Home-Funktion ein mögliches Kaufargument. Der Fahrzeughersteller verbindet damit seine Markenidentität und kommuniziert demonstrativ mittels der Lichtanimation seinen Anspruch an eine qualitativ hochwertige Fahrzeugausstattung. Aktuelle Lösungen greifen dabei auf Systeme zurück, bei denen die Fahrtrichtungsanzeiger aktiviert oder animiert werden oder in einer Lichtfunktion, z.B. dem Tagfahrlicht, eine zusätzliche farbige LED aktiviert wird.

Ein Fahrzeug besitzt jedoch eine Vielzahl von Beleuchtungseinheiten rund ums Fahrzeug, die bei einer entsprechenden Gestaltung und lichttechnischen Auslegung für eine fahrzeugübergreifende Lichtinszenierung genutzt werden können, bisher aber weitgehend unberücksichtigt bleiben. Der Ansatz der für das HELLA-Innovationsfahrzeug aufgegriffen und umgesetzt wurde bedient sich bewusst aller verfügbaren Beleuchtungseinheiten des Fahrzeugs und bindet diese wirkungsvoll in die gesamte Lichtanimation des Fahrzeugs ein.

Die Coming-/Leaving-Home-Funktion als Lichtinszenierung in der Farbe Cyan erstreckt sich über die kompletten Beleuchtungseinheiten im Exterieur. Betätigt der Fahrer die Fernsteuerung der Zentralverriegelung, erwacht das Fahrzeug, von der Fahrzeugfront beginnend, indem die Lichtinszenierung im Kühlergrill startet, sich durch die Scheinwerfer bis in die Seiten blinker, verbaut in den Außenspiegeln, fortsetzt. Seitlich ergänzt eine spezielle zweifarbig e Einstiegsleuchte, eingebaut im vorderen Bereich des Schwellers, eine linienförmige Lichtprojektion auf der Fahrbahn, die die Verbindung von der Fahrzeugfront zum Fahrzeugheck herstellt, ergänzt durch die gleichzeitige Einblendung des Schriftzugs VISION ONE(siehe Bild 5). Die Heckleuchte nimmt die linienförmige Signatur wieder auf, vervollständigt damit die Fahrzeugsignatur und setzt sie um das Fahrzeugheck herum fort. Den

Schlusspunkt der Aufwachsequenz der Coming-/Leaving-Home-Funktion bildet die Ausleuchtung des Kennzeichenbereichs, ebenfalls in Cyan. Damit erfolgt erstmals eine Lichtinszenierung unter Einbeziehung sämtlicher externer Lichtkomponenten.

Beim Schließvorgang des Fahrzeugs erfolgt die Deaktivierung der Lichtkomponenten in umgekehrter Richtung vom Fahrzeugheck bis zur Front.

Die Umsetzung einer fahrzeugübergreifenden Lichtinszenierung einer Coming-/Leaving-Home-Funktion demonstriert die emotionale Wirkung und auffallende Erscheinung des Fahrzeugs, die weit über die einfache Fahrtrichtungsanzeiger-Aktivierung oder eine einzelne, farbige Applikation im Scheinwerfer hinaus geht. Dabei können Fahrer und Mitfahrer von jedem Standort um das Fahrzeug herum die Lichtinszenierung wahrnehmen, insbesondere weil sie auch als Lichtprojektion im Seitenbereich des Fahrzeugs stattfindet.

6. Lichtprojektion

Ein Highlight im Beleuchtungskonzept ist die Leuchte zur Generierung der seitlichen Lichtprojektion. Sie ist an der Unterseite des Schwellers, direkt hinter dem Vorderrad, eingebaut und strahlt unter einem flachen Winkel seitlich entlang des Fahrzeugs auf die Fahrbahn. Hierbei wird eine Technologie des Fraunhofer IOF, Jena verwendet, die eine eingebettete Grafik durch ein Mikrolinsenarray (MLA) auf der Fahrbahn abbildet.

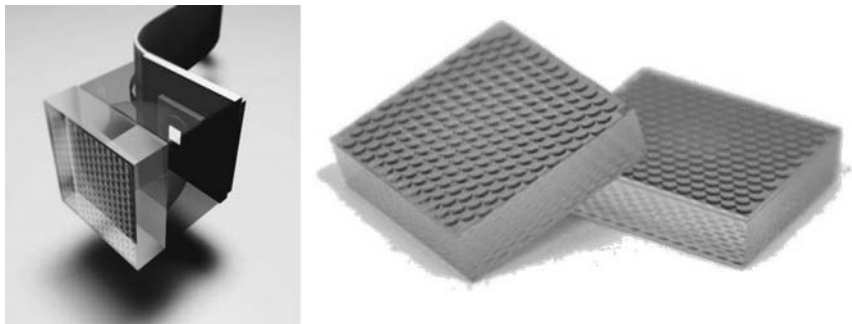


Bild 15: Prinzip Mikrolinsenarray und Mikrolinsen-Optikelement

Diese Technologie ermöglicht auch bei flachen Projektionswinkeln eine hohe Tiefenschärfe der Abbildung. Weil die Leuchte für den Betrachter selbst nicht direkt sichtbar ist, überrascht bei der Coming-/Leaving-Home-Inszenierung die großflächige, scharfe Lichtprojektion auf der Straße in hohem Maße.

Eine derartige Beleuchtung wurde von HELLA bereits im neuen BMW 7er als sogenannter Lichtteppich realisiert und ist im VISION ONE hinsichtlich ihrer Möglichkeiten weiterentwickelt worden.

Statt einer weißen LED, wie sie im BMW-Lichtteppich verwendet ist, kommen nun vier LED zum Einsatz um das nur einen Quadratzentimeter große Mikrolinsenarray zu beleuchten. Eng nebeneinander platziert, sind zwei LED für eine weiße Lichtprojektion und zwei cyanfarbige LED für die Coming-/Leaving-Home-Funktion integriert. Die unterschiedlichen Grafiken sind entsprechend der LED-Anordnung und Ausleuchtung in dem Mikrolinsenarray eingebettet. Der Kollimator wurde auf die Anordnung der vier LED abgestimmt, d.h. vier Einzellinsen sind zu einem kompakten, gerade einmal einen Quadratzentimeter großen Optikelement zusammengefasst und zudem als Zwei-Komponenten-Teil ausgeführt. Dabei sind mit einem schwarzen Kunststoff optische Trennungen der glasklaren Einzellinsen im Kollimator und Trennstege zwischen den LED realisiert worden, um weitgehend überscheinendes Licht und Geisterbilder zu vermeiden. Die Herausforderung liegt dabei in der Umsetzung derart kleiner 2K-Spritzgussteile mit entsprechender Güte und Genauigkeit, ein Thema an dem bereits intensiv für Serienanwendungen gearbeitet wird.

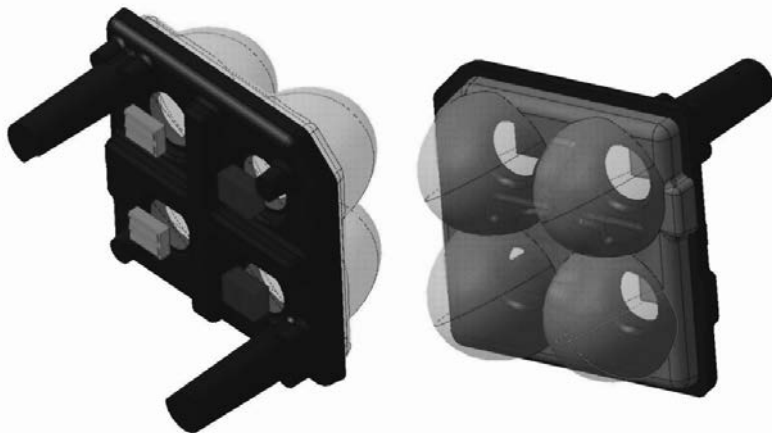


Bild 16: Vierfach-Kollimator für Lichtprojektion mit Mikrolinsenarray

Der optische Aufbau des Projektionsmoduls erlaubt somit eine Dynamisierung der Abbildung durch Abfolge von zwei unterschiedlichen Grafiken bzw. Lichtprojektionen bei gleichzeitigem Farbwechsel. Dieser innovative Ansatz macht das vorhandene Potenzial deutlich und zeigt das hohe Maß an möglicher Individualisierung für Coming-/Leaving-Home-Szenarien.

07. Holografischer Rückstrahler

Neue Technologien bei Lichtquellen, z.B. Laserdioden, und Optiksystemen sind die Treiber für innovative Erscheinungsbilder und Ausführungen. Die Entwicklung im Bereich diffraktiver und holografischer Optiken ist an einem Punkt angelangt der zunehmend interessanter ist für Anwendungen in der automobilen Lichttechnik. HELLA beschäftigt sich intensiv mit den lichttechnischen Möglichkeiten die sich durch Verwendung diffraktiver und holografischer Optiken bieten und deren prozesstechnischen Einbindung in die Fertigungsabläufe zukünftiger Leuchten. Als besonders interessant ist die Möglichkeit anzusehen mittels folienbasierter Volumenhologramme, Hologramme die in eine Photopolymerschicht eines Folienaufbaus eingeschrieben sind, unterschiedlichste Lichtfunktionen realisieren zu können und dabei ein fast transparentes Folienelement einzusetzen. Im VISION ONE kommt mit dieser Technologie erstmals der Prototyp eines holografischen Rückstrahlers zum Einsatz, auftreffendes weißes Licht wird von dem holografischen Rückstrahler selektiv rot reflektiert und realisiert den rückseitigen Rückstrahler des Fahrzeugs.

08. Zusammenfassung und Ausblick

Das HELLA-Konzept VISION ONE zeigt mit der farbigen Coming-/Leaving-Home-Funktion in allen externen Beleuchtungseinrichtungen, erstmals auch mit zweifarbigen Zusatzfahrtrichtungsanzeigern und Kennzeichenleuchten, ein ganzheitliches Konzept, das die Möglichkeiten einer Lichtinszenierung unter der Verwendung von LED-Technologie aufzeigt. Zukünftige Technologien, wie z.B. luminiszente Lackierungen, Beschichtungen, Folierungen, holografische Elemente oder ins Fahrzeug integrierte Displays werden die Möglichkeiten einer Lichtinszenierung noch vervielfachen, aber bereits mit dem im VISION ONE aufgezeigten Ansätzen wird deutlich welches Potential bereits mit heutigen Lichtsystemen für Serienanwendungen zur Verfügung steht. Fahrzeughersteller können mit einem derartig abgestimmten Fahrzeugbeleuchtungskonzept bereits heute zusätzliches Designpotential heben und ein ganzheitliches Licht-Branding vorantreiben. Dem Käufer wird eine einzigartige Lichtinszenierung des gesamten Fahrzeugs geboten, die sich deutlich gegenüber den bisher üblichen Funktionen absetzt und eine viel stärkere Aufmerksamkeit hervorruft. Dabei sind eine exakte Abstimmung des Beleuchtungskonzeptes, der verwendeten LED bezüglich der Farbe und der übergeordneten Lichtanimation des gesamten Fahrzeugs zu berücksichtigen, was eine abgestimmte Entwicklung aller Komponenten und der fahrzeugseitigen elektronischen Ansteuerung voraussetzt.

Weitere Möglichkeiten ergeben sich durch eine mehrfarbige Ausführung, um z.B. beim Öffnen des Fahrzeugs eine grüne Beleuchtung zu aktivieren und beim Schließen des Fahrzeugs eine rote Beleuchtung. Dies zeigt dem Fahrer durch eine eindeutige Farbzuoordnung ob sein Fahrzeug korrekt verriegelt wurde.



Bild 17: Ein- und Ausstiegsvisualisierung

Die Einstiegsleuchte mit zweifarbiger Grafik zeigt das gestalterische Potential neuer Technologien für vorgesehene Lichtanimationen und gleichzeitiger hoher Funktionalität mit einer scharf begrenzten weißen Ausleuchtfläche. Als nächster Schritt ist auch die Integration in Scheinwerfer und Heckleuchten denkbar, um vor und hinter dem Fahrzeug zusätzliche Grafiken, Informationen oder personalisierte bzw. markentypische Elemente abbilden zu können. Bei einer Integration in den Aussenspiegeln ist es möglich auch die seitliche Karosseriefläche als Projektionsfläche zu nutzen.

Gleichzeitig können Lichtprojektionssysteme auch sicherheitsrelevante Aufgaben übernehmen, beispielsweise kann eine seitliche Fahrbahn-Lichtprojektion, wie in Bild 16 dargestellt, auch beim beabsichtigten Spurwechsel oder beim Ausstieg aus dem Fahrzeug signalisieren, ob sich von hinten ein Fahrzeug nähert (rote Lichtwarnung) oder ein Spurwechsel bzw. Ausstieg gefahrlos möglich ist (grüne Lichtinformation). Beim Ausstieg auf der Beifahrerseite kann diese Warnung auch für sich nähernde Fahrradfahrer auf einem angrenzenden Gehweg bzw. Radweg erfolgen, deren Fahrweg durch eine geöffnete Fahrzeugtür blockiert werden würde. Die rote Lichtwarnung wäre in diesem Fall auch für den sich nähernden Radfahrer erkennbar, Gefahrensituationen oder Unfälle können vermieden werden. Auch als zusätzliches Element für den Fahrtrichtungsanzeiger ist eine Fahrbahn-Lichtprojektion denkbar indem eine Linie, ein Ausleuchtfeld oder eine Grafik im gleichen Blinkrhythmus auf der Fahrbahn abgebildet wird, in höchstem Maße sichtbar für andere Verkehrsteilnehmer.

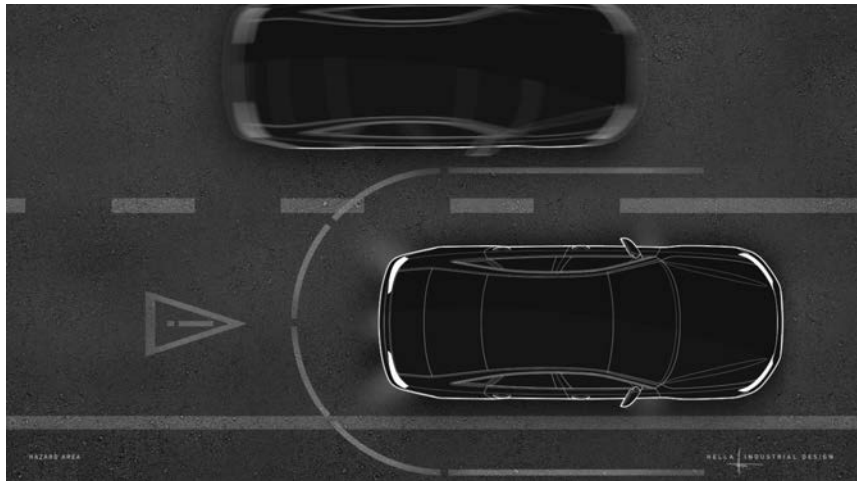


Bild 18: Projektion eines Warnfeldes und Zeichens auf die Fahrbahn

Bei zukünftig immer kleiner werdenden Heckleuchten und Scheinwerfern sind Doppel- und Tri-Funktionen erstrebenswert um den vorhandenen, reduzierten Bauraum effektiv zu nutzen. Die Umsetzung der Tri-Funktionen des VISION ONE mit transluzenter Auskoppelkante eines Lichtleiters zeigt neue Gestaltungsmöglichkeiten für Signaturen bei gleichzeitig guter Homogenität der Ausleuchtung. Die minimale Wandstärke von drei Millimeter setzt neue Maßstäbe für zukünftige Lichtsysteme.

Licht ist eine essentielle Komponente für Komfort und Sicherheit. Im privaten Umfeld werden Lichtinstallationen genutzt um eine behagliche Atmosphäre zu erzeugen und Sicherheit im Dunkeln zu schaffen indem Wege und Plätze ausgeleuchtet werden. Beim Fahrzeug, insbesondere beim Rangieren und Rückwärtsfahren oder beim Be- und Entladen, ist der Fahrer heute häufig von beklemmender Dunkelheit umgeben. Seitlich des Fahrzeugs ist die Ausleuchtung vom Rückfahrlicht meistens nicht mehr gegeben, hinter dem Fahrzeug oft zu schwach und eine komfortable Fahrbahnausleuchtung beim Be- und Entladen des Fahrzeugs wird in der Regel gar nicht geboten, zumal das Rückfahrlicht nur durch Einlegen des Rückfahrgangs aktiviert ist. Die adaptive Fahrbahnausleuchtung des VISION ONE zeigt wie es gehen kann. Moderne LED- und Lichtleitertechnologie, in Kombination mit Sensorik, bringt das Licht immer dann direkt hinter dem Fahrzeug auf die Fahrbahn und setzt die Ausleuchtung auch um die Karosserieecke herum fort wenn es benötigt ist. Der Fahrer fühlt sich sicherer beim Rangieren, weil er beim Blick in den Außenspiegel oder über die Schulter auch

seitlich des Fahrzeugs Hindernisse erkennen kann und beim Be- und Entladen wird das Fahrzeug um das gesamte Heck herum mit Licht umgeben. Der Fahrer steht nicht im Dunkeln und andere Verkehrsteilnehmer erkennen schneller dass hier ein Fahrzeug steht welches Be- oder Entladen wird.

Ein Fahrzeugbeleuchtungskonzept, wie es mit dem VISION ONE von HELLA vorgestellt ist, stellt jedoch die Arbeitsweise während der Entwicklung vor neue Herausforderungen. Sind heute Fahrzeugdesigner separat mit Scheinwerfer und Heckleuchte beschäftigt und werden weitere Einfunktionsleuchten eher untergeordnet betrachtet weil ihnen kein hohes Gestaltungspotential für das Fahrzeug unterstellt wird, ist zukünftig ein abgestimmtes Lichtdesign am gesamten Fahrzeug erforderlich um eine einheitliche Lichtinszenierung zu konzipieren. Einzelne Leuchten müssen aufeinander abgestimmt werden und eventuell gleiche Lichtsysteme und Optiken nutzen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit und Chance die Innenraumbeleuchtung mit in die gesamte Lichtinszenierung einzubeziehen.

HELLA als Entwickler und Lieferant sowohl von Fahrzeugaussenbeleuchtung wie auch von Fahrzeuginnenbeleuchtung stellt sich mit der Vorstellung des VISION ONE dieser zukünftigen Herausforderung einer ganzheitlichen Entwicklung von Beleuchtungskonzepten.

Laserperformance im Fernlicht – eine experimentelle Analyse von Reichweite und subjektiven Fahrerlebnis

Dr. rer. nat. **Klaus Ferdinand Albrecht**,
Dr.-Ing. **Ernst-Olaf Rosenhahn**,
Automotive Lighting Reutlingen GmbH

Kurzfassung

Der Einfluss hoher Lichtstärken im Fernlicht auf die visuelle Wahrnehmung des Fahrers wurde durch physiologische Experimente und Testfahrten im Straßenverkehr ermittelt.

Mittels Probandenstudien [1,2] wurde untersucht, in wie weit sich die Sehleistung des Fahrers durch hohe Lichtstärken im Fernlicht verbessert. Der Fokus lag hierbei auf dem Fernlichtbereich, d. h. auf Distanzen zwischen 120 m und 270 m vor dem Auto. Für verschiedene Lichtstärken wurden Objekterkennungsraten als auch Verlässlichkeiten von Distanzschätzungen ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine signifikante Verbesserung der Sehleistung durch hohe Lichtstärken bereits im Fernlichtbereich zu erwarten sind und nicht erst auf extrem großen Distanzen.

Zusätzlich wurden Testfahrten im Straßenverkehr durchgeführt [2], um subjektive Bewertungen verschiedener Fernlichtsysteme zu erhalten. Hierbei wurden Reichweite, Seitenausleuchtung, Selbstblendung und das Gesamtsystem unter Schön- als auch Schlechtwetterbedingungen bewertet. Das Resultat dieser Studie zeigt eine insgesamt signifikant verbesserte Bewertung von Fernlichtsysteme mit hohen Lichtstärken und zwar unabhängig von der gewählten Strecke sowie bei trockener, als auch bei nasser Fahrbahn.

Abstract

The effect of driving beams with high intensities on the visual performance of the driver are investigated using physiological experiments as well as driving tests in real traffic conditions. Physiological experiments [1,2] were carried out in order to study the influence of a laser-boosted high beam on the visual performance of the driver. Obstacle-detection probabilities and reliabilities for distance estimations have been determined at different levels of illuminations. The results indicate a clear improvement of the driver's visual performance when using

a high beam with high intensities. This effect becomes important already within the high beam range, i. e., on distances between 120 m and 270 m in front of the car.

In driving experiments [2], test drivers were asked to rate their subjective impression of a nighttime drive on rural roads using different high beam systems. Visual range, side illuminance, self-glare, as well as overall performance of the system are rated in good as well as in adverse weather conditions. The results show a significant overall improvement of the rating for high beams with high intensities independent of the chosen track and weather condition.

1. Einleitung

Im Jahre 2014 wurde erstmals ein Laser als Lichtquelle im Kfz-Scheinwerfer eingeführt. Die enorm hohe Leuchtdichte ermöglicht es sehr hohe Lichtstärken aus kleinen optischen Systemen zu realisieren, wodurch sich der Laser perfekt zur Reichweitenerhöhung des Fernlichts eignet. Diese Anwendung wurde zum Beispiel im Audi R8 umgesetzt, wo die Lasereinheit das Fernlichtmaximum auf mehr als 300 lx in 25 m erhöht. Solch einer hohen Beleuchtungsstärke, an der Grenze des von der ECE gesetzlich zugelassenen Lichtstärkewerts, schreiben manche Marketingprospekten Reichweiten von über 500 m zu, eine Angabe die durch die Lage der 1 lx Isoluxlinie motiviert ist (siehe Bild 1 für einen Vergleich der Isoluxlinien des Audi R8 Fernlichts mit und ohne Laserunterstützung). Betrachtet man nun eine alltägliche Fahrsituationen, so werfen diese hohen Reichweitenangaben die Frage auf, inwiefern der Fahrer überhaupt von einem Fernlicht mit so hohen Lichtstärken profitiert, oder ob ein Standardfernlicht in einer typischen Nachtfahrsituation nicht bereits vollkommen ausreichend ist.

Um diese Frage zu beantworten, werden im Folgenden Probandenstudien durchgeführt, die zum einen auf die physiologische Sehleistung des Fahrers, zum anderen auf dessen subjektiven Empfinden während einer Nachtfahrt abzielen. Hierbei ist es notwendig ein Maß zu definieren, um die Sehleistung des Fahrers in Abhängigkeit der Lichtstärke messen zu können. Betrachtet man eine beliebige Szene während einer Nachtfahrt, dann bestehen für den Fahrer folgende visuelle Aufgaben:

1. Erkennen möglicher Gegenstände auf der vor ihm liegenden Straße.
2. Falls Hindernisse erkannt werden muss er abschätzen, wie weit die Gegenstände entfernt sind.

Ausgehend von diesen Informationen kann der Fahrer dann entscheiden, ob eine Gefahr vorliegt und er bremsen oder ausweichen muss, oder ob er ungehindert weiterfahren kann.

Die zu diesen Aufgaben zugehörigen Messwerte sind beispielsweise die Objekterkennungsrate, d. h. mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmtes Objekt erkannt bzw. übersehen wird und die Szenenerkennungsrate, d. h. die Wahrscheinlichkeit mit der der Fahrer Distanzen zwischen sich und Objekten in der Szene richtig bzw. falsch eingeschätzt. Die zugehörigen Probandenversuche [1, 2] werden in Abschnitt 3 und 4 diskutiert.

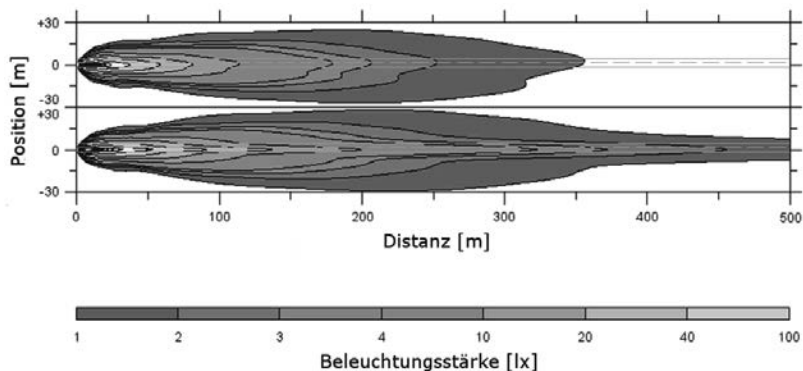


Bild 1: Isolinien des Audi R8 Fernlichts. Oben: Standard LED Fernlicht, unten: LED Fernlicht mit Laserunterstützung.

Während solche Versuche tiefgehende Rückschlüsse über die Sehleistung der Probanden in Abhängigkeit der Lichtstärke erlauben, erfordert eine umfassende Bewertung von hohen Lichtstärken auf der Fahrbahn auch Testfahrten auf öffentlichen Straßen. Hierbei kann das subjektive Empfinden des Fahrers in unterschiedlichsten Verkehrssituationen quantifiziert werden. Die durchgeführte Probandenstudie [2] wird in Abschnitt 5 beschrieben.

Im folgenden Abschnitt 2 wird zunächst der Aufbau des Versuchsfahrzeugs beschrieben, welches für alle vorgestellten Versuche verwendet wurde.

2. Versuchsfahrzeug

Um ein möglichst flexibles Fernlicht mit klar definierten Beleuchtungsstärken schalten zu können, wurde ein Testfahrzeug mit vier Satz LED-Bifunktionsprojektionsmodulen (Bi-eLight) Modulen ausgestattet (siehe Bild 2).



Bild 2: Foto des Versuchsfahrzeugs mit vier Satz Bi-eLight.

Während der Versuche wurde immer ein paar Bi-eLight für das Abblendlicht verwendet, so dass das Vorfeld konstant mit einem Lichtstrom von $\Phi_{Abl} = 850 \text{ lm}$ und einem Maximum von $E_{Abl} = 60 \text{ lx}$ ausgeleuchtet ist. Diesem Abblendlicht konnte nun wahlweise ein, zwei, oder vier Satz Bi-eLight Fernlichter zugeschaltet werden, welches je pro Anbauseite ca. 400 lm Lichtstrom und fast 100 lx Beleuchtungsstärke liefert. Durch diesen Aufbau kann somit, ausgehend von einer Standardfernlichtleistung, ein Hochleistungsfernlicht mit fast 190 lx bis hin zu über 360 lx Beleuchtungsstärke geschaltet werden (siehe Tabelle 1). Letztere Beleuchtungsstärke wird im Folgenden „Laserperformance“ genannt, in Anlehnung an die Lichtleistung des Lasers im Audi R8.

Tabelle 1: Messungen der unterschiedlichen Fernlichtschaltungen des Versuchsfahrzeugs.

Anzahl der geschalteten Bi-eLight Fernlichtpaare	E_{\max} gemessen in 25 m (eine Anbauseite) [lx]	E_{\max} gemessen in 250 m (beide Anbauseiten) [lx]
1	96	1,8
2	186	3,5
4	363	7,1

Dieser Versuchsaufbau ermöglicht die Untersuchung der Auswirkungen einer verdoppelten bzw. vervierfachen Lichtstärke in Bezug auf das Standardfernlichtsystem. Außerdem ist es möglich, auch während der Fahrt unterschiedliche Lichtstärkeniveaus anzusteuern, ohne das

der Testfahrer diesen Eingriff offensichtlich bemerkt. Diese Eigenschaft ist insbesondere für den Fahrversuch im Straßenverkehr wichtig (siehe Abschnitt 5).

3. Physiologisches Experiment – Erkennbarkeit

Bevor ein Fahrer eine (Gefahren-)Situation bei einer Nachtfahrt bewerten und danach reagieren kann, muss er zunächst die Szene erkennen. Eine solche Szene könnte z. B. aus einer oder mehreren Personen auf oder neben der Fahrbahn bestehen, oder es könnten Gegenstände auf der Fahrbahn liegen. Das Ziel des in diesem Abschnitt diskutierten Experiments ist es zu untersuchen, in wie weit sich die Erkennbarkeit von Sehzeichen durch eine Veränderung der Lichtstärke ändert. Der Fokus liegt hierbei auf dem Fernlichtbereich und drei verschiedenen Lichtstärken: Standardfernlicht, Hochleistungsfernlicht und Laserperformance (siehe vorheriger Abschnitt).



Bild 3: Versuchsszene mit verschiedene Sehzeichen vor einer schwach reflektierenden Hintergrundtafel. Kontraste (von links nach rechts): $C_{\text{Viereck}} = 0,15$; $C_{\text{Dreieck}} = 0,85$; $C_{\text{Dummy}} = 0,52$.

Für den Versuch wurden drei verschiedene Sehzeichen ausgewählt, Dummy, Rechteck und Viereck, mit jeweils drei verschiedenen Reflexionsgraden, aber gleichen effektiven Sehwinkele. Da die Erkennbarkeit eines Sehzeichens aber nicht durch den Reflexionsgrad des Ob-

jekts festgelegt ist, sondern immer vom Kontrast zur Umgebung bestimmt ist, ist es hilfreich einen möglichst einheitlichen, wohl definierten Hintergrund zu haben. Aus diesem Grund wurden die Sehzeichen vor einer Hintergrundtafel platziert (siehe Bild 3), welche einem Reflexionsgrad von 6 % besitzt. Dieser Wert kommt einer Nachtszene am ähnlichsten, wie in Vorversuchen herausgefunden wurde. Der Reflexionsgrad der Sehzeichen wurde so gewählt, dass die Kontraste bei $C_1 = 0,15$, $C_2 = 0,52$ und $C_3 = 0,85$ liegen, welche dunkel grauer Kleidung, einer „Standard“ Jeans, und einem dunkelblauen Hemd oder auch einer komplett schwarzen Hose entspricht (Anmerkung: für die Erkennbarkeit ist das Vorzeichen des Kontrasts irrelevant [3]). Der Abstand der Sehzeichen zum Versuchsfahrzeug wurde mit 250 m so gewählt, dass dieser Bereich noch klar innerhalb der Reichweite eines Standardfernlichts liegt, welches pro Anbauseite bei 250 m noch ca. 1 lx auf das Objekt wirft (siehe Tabelle 1 und Bild 1).

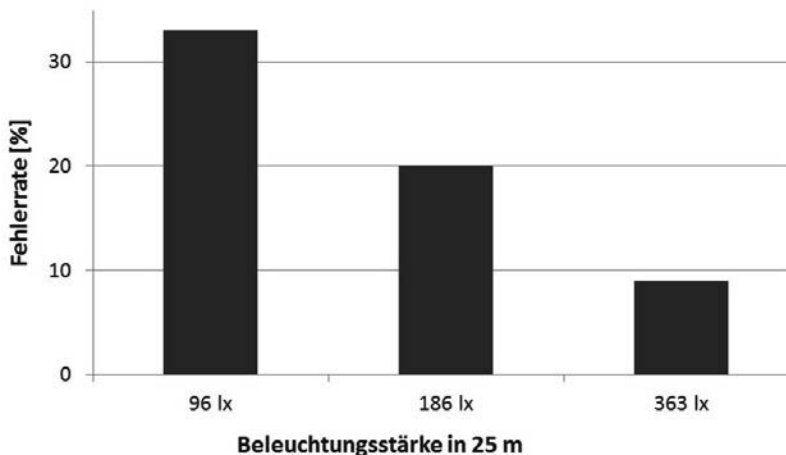


Bild 4: Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit ein Sehzeichen in 250 m zu übersehen in Abhängigkeit der Fernlicht-Lichtstärke.

Ein Versuchsdurchlauf bestand darin, dass die Probanden zunächst einen vorgegebenen Punkt im Abblendlichtbereich fixieren und dann 3 s in die gezeigte Szene im Fernlichtbereich schauen sollten. Anschließend notierten die Probanden die von ihnen erkannten Sehzeichen. Dieses Vorgehen simuliert ein quasidynamisches Fixationsverhalten, ohne dass sich die Randbedingungen bei jedem Probanden und Versuchsdurchlauf ändert. Insgesamt wurden für jede der drei Fernlichtstärken zehn Szenen mit je bis zu drei Sehzeichen und bis

zu drei Kontrasten gezeigt, so dass in der Summe die Erkennbarkeit von mehr als 1000 Objekten abgefragt wurde.

Bei der Auswertung der Versuche war der Fokus auf dem kritischsten Fehler, der einem Fahrer bei unzureichender Sicht unterlaufen kann, nämlich dem Übersehen eines Objektes in der Szene. In Bild 4 ist die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit ein Objekt in der Szene zu übersehen in Abhängigkeit der Fernlicht-Lichtstärke aufgetragen. Es zeigt sich, dass in dem durchgeführten Versuch die Wahrscheinlichkeit ein Sehzeichen auf 250 m zu übersehen mit einem Standardfernlicht bei etwa 33 % liegt. Dieser Wert reduziert sich deutlich auf 20 %, wenn die Fernlichtintensität verdoppelt wird und liegt bei lediglich 9 % bei einer Lichtintensität ähnlich dem laserverstärkten Fernlicht. Als Faustregel bewirkt eine Verdopplung der Lichtstärke somit eine auf fast die Hälfte reduzierte Fehlerrate. Der vorliegende Versuch zeigt also deutlich, dass eine signifikante Verbesserung der Sehleistung durch ein Höchstleistungsfernlicht, wie dem Laser, in einer in der Praxis relevanten nächtlichen Fahrsituation zu erwarten ist und nicht erst in 500 m – 600 m. Nachfolgende dynamische Experimente konnten diese Aussage bestätigen [4].

4. Physiologisches Experiment – Distanzschätzungen

Erkennt der Fahrer, dass sich Personen oder Objekte in seiner Fahrtrichtung befinden, muss er die vorliegende Szene bewerten und entsprechend handeln. Zum Beispiel hat er zu entscheiden, ob er bremsen muss, oder besser ausweicht. Hierbei ist es notwendig, dass der Fahrer möglichst genau die Distanzen, zum einen zwischen sich und der Szene, zum anderen aber auch zwischen Gegenständen in der Szene, abschätzen kann. In Bezug auf hohe Lichtstärken im Fernlicht stellt sich hier also die Frage, inwieweit diese die Distanzschätzungen beeinflusst.

Nachdem im vorherigen Abschnitt gesehen wurde, dass eine Laserunterstützung bereits im Fernlichtbereich zu einer deutlichen Verbesserung der Erkennbarkeit führt, ist der Fokus dieses Versuchs auf den Bereich zwischen 120 m und 270 m vor dem Versuchsauto. Ein Versuchsdurchlauf bestand nun darin, dass zunächst nur das Abblendlicht eingeschaltet wurde. Während dieser Phase wurde eine Szene aufgebaut, d. h. bis zu drei Personen haben sich in dem oben genannten Bereich auf vorgegebene Positionen begeben (siehe Bild 5 für eine typische Versuchsszene). Wichtig war hierbei, dass die Kleidung der Personen so hell gewählt wurde, dass sie auch auf 270 m mit einem Standardfernlicht gut erkennbar war. Dies unterscheidet das vorliegende Distanzschätzungsexperiment von dem vorangegangenen Erkennbarkeitsexperiment.

Nachdem die Szene aufgebaut wurde, wurde für 3 s das Fernlicht aktiviert. Innerhalb dieser Zeit sollten die Probanden im Testwagen sämtliche Distanzen in der Szene schätzen, hierbei hatten sie keine Orientierungshilfen, wie z. B. Distanzmarken an der Fahrbahn. Jede dieser Szenen wurde einmal mit Standardfernlicht und einmal mit Laserperformance gezeigt, wobei auf eine für den Probanden zufällig erscheinende Versuchsausführung geachtet wurde, so dass der Proband nicht erkennen konnte, dass er die Szene zuvor bereits mit einem anderen Fernlicht gesehen hat. In der Summe wurden mehr als 500 Einzeldistanzmessungen durchgeführt.



Bild 5: Bild einer typische Szene des Versuchs bei maximaler Beleuchtungsstärke von über 360 lx (gemessen auf 25 m). Abstände zwischen Versuchsfahrzeug und Personen in der Szene (von links): 165 m, 260 m, 195 m.

In Bild 6 ist der Anteil der korrekten Distanzschätzungen gegen die Beleuchtungsstärke aufgetragen, wobei korrekte Distanzschätzung bedeutet, dass die Abstände in der Szene um maximal ± 30 m vom exakten Wert abweichen durften, ein einziger Fehler von höchstens ± 60 m wurde ebenfalls noch toleriert.

Es zeigt sich deutlich, dass der Anteil an korrekten Distanzschätzungen innerhalb einer Szene mit zunehmender Beleuchtungsstärke zu nimmt. Während für ein Standardfernlicht lediglich 36 % der Distanzschätzungen korrekt waren, vergrößerte sich dieser Wert auf 58 % im Falle eines Fernlichts mit Laserperformance. An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es sich hier um spezifische Werte genau für dieses Experiment handelt. Somit sind für eine allgemeine Aussage nicht die absoluten Werte der gemessenen

Distanzerkennungsraten relevant, sondern vielmehr, dass eine Vervierfachung der Lichtleistung eine in der Größenordnung von 60 % verbesserte Distanzschätzung zulässt.

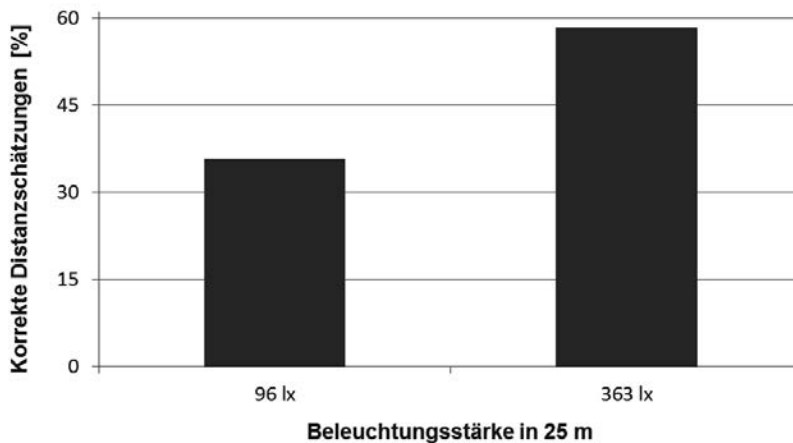


Bild 6: Anteil der korrekten Distanzschätzungen in Abhängigkeit von der Fernlichtlichtstärke.

Eine weitere Analyse der Versuchsdaten zeigt außerdem den Trend auf, dass die Probanden bei zu geringer Lichtstärke dazu tendieren die Distanzen zu überschätzen. Dieser kritische Fehler trat beim Standardfernlicht in 81 % aller falschen Distanzschätzungen auf, im Falle des Fernlichts mit Laserperformance in 70 %.

5. Fahrversuch – subjektive Bewertung des Fernlichts mit Laserperformance im Straßenverkehr

Für die Akzeptanz einer neuen Technik spielt das subjektive Gefühl des Fahrers eine zentrale Rolle, ein Faktor, der nur mittels einer Testfahrt abgefragt werden kann. Darüber hinaus bietet eine Testfahrt die Möglichkeit einen umfassenden Eindruck des System zu bekommen und so Stärken und Schwächen zu identifizieren und zu bewerten. Daher wird in diesem Abschnitt der Einfluss der Lichtstärke des Fernlichts auf die subjektive Bewertung einer Testfahrt untersucht. Hierzu wurden mit dem in Abschnitt 2 beschriebenen Versuchsauto Testfahrten im Straßenverkehr unternommen, nach denen der Fahrer vier Fragen beantworten sollte:

1. Wie groß ist die Reichweite des Systems? (1 sehr kurz, 5 durchschnittlich, 9 sehr weit)
2. Wie gut ist die Seitenausleuchtung? (1 sehr schlecht, 5 durchschnittlich, 9 sehr gut)
3. Inwieweit gab es Selbstblendeneffekte? (1 gar nicht, 5 gerade noch nicht störend, 9 sehr störend)
4. Was ist die Gesamtwertung für das getestete System? (1 sehr schlecht, 5 durchschnittlich, 9 sehr gut)

Um einen Einfluss der Erwartungen der Probanden an das Fernlichtsystem zu minimieren, wurde den Probanden nicht gesagt, mit welchem Fernlichtsystem sie unterwegs sind. Darüber hinaus konnte Abschnittsweise die Lichtstärke des Fernlichts geändert werden, ohne, dass dies für den Fahrer ersichtlich war.

Insgesamt wurden drei typische Landstraßenstrecken befahren, mit unterschiedlichen Kurvengeometrien, Beschilderungen und Steigungen. Jeder Proband hat sämtliche Strecken in beide Richtungen durchfahren, jeweils einmal mit einem Standardfernlicht und einmal mit einem Fernlicht mit Laserperformance. Nach jedem Streckenabschnitt wurde eine Bewertung durchgeführt.

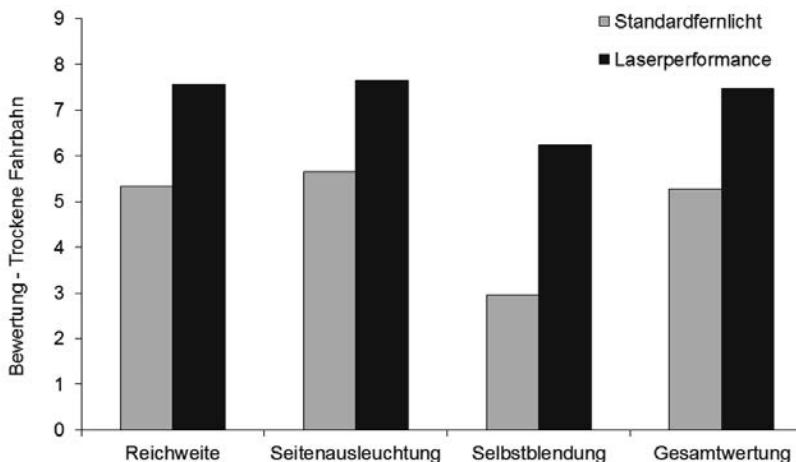


Bild 7: Bewertungen für ein Standardfernlicht und ein Fernlicht mit Laserperformance bei trockener Fahrbahn.

Unter guten Wetterbedingungen, d. h. bei trockener Fahrbahn und ohne Witterungseinflüsse zeigt die Versuchsauswertung aller 72 Bewertungen, dass die Probanden die zusätzliche

Lichtleistung des Laserlichts zu schätzen wissen: Bei Reichweite, Seitenausleuchtung als auch bei der Gesamtbewertung wurde das Fernlicht mit Laserperformance immer etwa 2 Punkte besser als das Standardfernlicht bewertet (siehe Bild 7). Dieses wiederum wurde mit etwa 5 Punkten bewertet, was exakt dem entspricht was für ein durchschnittliches Fernlicht als Maßstab angegeben wurde. Der umgekehrte Trend lässt sich bei der Selbstblendung beobachten: Während das Standardfernlicht selbst bei einer Strecke mit vielen Verkehrszeichen nie als störend bewertet wurde, ist dies durchweg der Fall für das Fernlicht mit Laserperformance.

Die Bewertungen ändern sich im Falle von schlechtem Wetter insbesondere bei Seitenausleuchtung und Selbstblendung nur wenig. Zwar verschlechtern sich die Bewertung für beide Systeme leicht, aber etwa in gleichem Maße. Obwohl die Straße das einfallende Licht spekulär reflektiert und somit schwarz erscheint, unabhängig von der Lichtstärke, vergrößert sich der Unterschied zwischen Standardfernlicht und Laserperformance bei der Bewertung der Reichweite. Das Fernlicht mit Laserperformance bleibt fast konstant auf hohem Niveau, das Standardfernlicht verschlechtert sich dahingegen deutlich auf nur noch knapp 4 Punkte. Im Umkehrschluss bedeutet dies dass der Fahrer von der verbesserten Ausleuchtung der Umgebung der Straße in größerer Entfernung profitiert und sich somit auch bei nasser Fahrbahn deutlich sicherer fühlt als mit einem Standardfernlicht.

6. Diskussion

Die Auswertung der durchgeführten Versuche zeigt und quantifiziert, wie ein Fahrer von einem Fernlichtsystem mit hohen Lichtstärken profitiert. Objekte können frühzeitiger erkannt werden (Abschnitt 3) und dem Fahrer bleibt so deutlich mehr Zeit um auf Objekte auf der Fahrbahn zu reagieren. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass sich auch die Distanzschätzung einer Straßenszene deutlich verbessert (Abschnitt 4), so dass der Fahrer eine Gefahrensituation besser einschätzen kann. Diese Verbesserungen sind bereits aufzeigbar in Entfernungen von 250 m und nicht erst auf extrem großen Distanzen.

Schließlich wurde durch Testfahrten (Abschnitt 5) gezeigt, dass sich auch das subjektive Fahrgefühl durch ein Fernlicht mit Laserperformance verbessert, unabhängig von der Wetersituation und der Strecke. Gleichzeitig wurde eine Grundproblematik bei hohen Lichtstärken im Fernlicht aufgezeigt: die Blendung. Der Fahrer des Autos mit hoher Lichtstärke selbst wird geblendet, z. B. durch Reflexionen an Verkehrszeichen. Um ein Fernlicht mit hohen Lichtstärken effektiv einsetzen zu können, bedarf es daher Systeme, die die Fernlichtunter-

stützung zu bzw. abschalten, basierend auf einer automatischen Auswertung der Verkehrssituation, z. B. mittels einer Kamera.

Betrachtet man neben den Verbesserungen bei den Laserlichtquellen auch aktuelle Entwicklungen bei den LEDs, wie z. B. Hochstrom LEDs, so ist klar, dass in absehbarer Zeit auch LED Fernlichtsysteme mit Lichtstärken vergleichbar mit dem aktuellen Laserscheinwerfer im Straßenverkehr zu finden sein werden. Mit diesen LEDs können nicht nur extrem hohe Maxima aufgebaut werden, sondern auch deutlich mehr Lichtstrom auf die Straße gebracht werden, als es derzeit mit einem Laser möglich wäre. Der Fahrer bekommt somit nicht nur in einem engen Bereich um HV ein hohes Lichtstärkemaximum zur Verfügung gestellt werden, sondern er kann auch von den Vorzüge von hohen Lichtstärken auf einem ausgedehnten Bereich im Fernlicht profitieren.

- [1] Rosenhahn, E.-O.; Lampen, M.; Albrecht, K. F.: „*Laser based Headlamp Range Extender: Hype or useful Feature for the Driver?*“, VISION, Paris, 2014.
- [2] Albrecht, K. F.; Austerschulte, A.; Rosenhahn, E.-O.: „*Reality Check: Laser High Beam Performance in Real Driving Tests*“, 11th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2015.
- [3] Rosenhahn, E.-O.; Lampen, M.: „*Reality Check II: How different is the Perception of LED-Light vs. Halogen-Light on the Road?*“, 10th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2013.
- [4] Kobbert, J.; Kosmas, K.; Polin, D.; Englisch D.; Schneider, K.; Khanh, T. Q.: „*Field Test of Visibility distances and recognition rates – comparison of LED and Laser systems*“, 11th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2015.

Quantifizierung des Blendpotenzials laserbasierter Scheinwerfersysteme

Quantifying the glare potential of a laser based headlamp system

Dipl.-Ing. **Melanie Helmer**, Prof. Dr. rer. nat. **Cornelius Neumann**,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Lichttechnisches Institut Karlsruhe

Abstract

In Europe, car manufactures are not restricted to conventional static headlamp systems. They are also allowed to use laser based glare-free high beam headlamp systems. In this case, the driver drives with their high beams permanently on and the regions with oncoming vehicles are detected and masked. This ensures the light is shining everywhere except on the oncoming cars. Using a laser could mean a higher discomfort glare. The combination of laser based headlamps and glare-free high beam represents an innovative headlamp system, which is to be examined regarding the discomfort glare.

To quantify the effects of a laser based headlamp system on discomfort glare and also on safety aspects, a dynamic study was performed. This study compared the discomfort glare between a laser based glare-free high beam (GFH) and a LED based system with low beam, high beam and GFH.

1. Einleitung/Motivation

In den vergangenen Jahrzehnten wurden verschiedene Systeme wie beispielsweise das blendfreie Fernlicht entwickelt, um dem Fahrer möglichst viel Licht zur Verfügung zu stellen, die Fahrbahn optimal auszuleuchten und dabei andere Verkehrsteilnehmer nicht zu blenden. Bei einem System mit blendfreiem Fernlicht fährt der permanent mit Fernlicht, wobei entgegenkommende und vorausfahrende Fahrzeuge ausgeblendet werden.

Die Umsetzung eines solchen Systems ist meist abhängig von der verwendeten Lichtquelle. Seitdem Laser als (Zusatz-)Fernlicht eingesetzt werden, wird versucht die gesetzlich erlaubte maximale Lichtstärke zugunsten maximaler Reichweite und Sichtweite auszureizen. Werden im blendfreien Modus Teile der Lichtverteilung ausgeschnitten, so hat die im ausgeleuchte-

ten Bereich immer noch unverändert hohe Lichtstärken und folglich im ausgeblendeten Bereich mehr Streulicht. In Kombination mit den für Lasermodule typischen kleinen Lichtaustrittsflächen hoher Leuchtdichte könnte dies zu einer verstärkten Blendung und verringerter Sicherheit führen. Aus diesem Grund wurde in einer volldynamischen Probandenstudie evaluiert, ob die psychologische wie auch physiologische Blendung eines laserbasierten blendfreien Fernlichtes wirklich höher ist als die eines blendfreien Fernlichtes auf LED-Basis. Hierzu wurde auf zwei zu testende Systeme mit gleicher Funktionsweise und Sensorik zurückgegriffen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und eventuelle Unterschiede bezüglich der Blendung auf die Lichtquelle zurückführen zu können.

2. Zielstellung und Konzept der Studie

Im Vordergrund dieser Untersuchung steht die Quantifizierung des subjektiven Blendpotenzials des zu untersuchenden Scheinwerfersystems.

Die im Folgenden beschriebene Studie unterteilt sich im Wesentlichen in die folgenden Teile:

- Auswahl kritischer Begegnungssituationen
- Messen der Beleuchtungsstärke für unterschiedliche Begegnungssituationen
- Dynamische Feldstudie zur Blendbewertung des HPM (High Performance Modul)

Im Hauptteil der Studie wird das subjektive Blendempfinden des laserbasierten Scheinwerfersystems (HPM) mit dem eines LED-basierten Scheinwerfersystems verglichen. Beide Systeme arbeiten im adaptiven, blendfreien Modus.

3. Material und Methoden

3.1 Versuchsträger entgegenkommender Verkehr

Als Versuchsträger standen zwei BMW 7er zur Verfügung. In Versuchsträger 1 (im Folgenden als BMW LED bezeichnet) war das konventionelle Scheinwerfersystem mit blendfreiem Fernlicht auf Basis von LEDs integriert. Versuchsträger 2 (im Folgenden als BMW HPM oder BMW Laser bezeichnet) verfügte über das zu testende High Performance Modul mit blendfreiem Fernlicht. Beide Fahrzeuge waren so programmiert, dass sich das System ab Geschwindigkeiten von 50 km/h aktivierte. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass lediglich der Unterschied der beiden Gesamtscheinwerfersysteme untersucht wurde. Auf den Algorithmus zur Objekterkennung bzw. der Ausblendung von Objekten konnte kein Einfluss genommen werden.

3.2 Versuchsträger Probandenfahrzeug

Die Probanden durchfuhren den Rundkurs mit einem Audi A6 Avant. Das Fahrzeug war mit einer Geschwindigkeitsregelanlage (GRA) ausgestattet.

Der Versuchsleiter befand sich während der Versuchsfahrt auf der Rückbank und steuerte von dort die Aufnahme der Beleuchtungsstärkemesswerte sowie den gesamten Versuchsablauf mithilfe eines selbstentwickeltem Kommunikationsmoduls und der entsprechenden Software über einen Laptop.

3.3 Anforderungen an Versuchsstrecke

Um eine geeignete Versuchsumgebung auszuwählen, sind zu Beginn die Anforderungen an diese zu definieren. Unter der Maßgabe, dass während der gesamten Versuchsdurchführung die Reproduzierbarkeit der Daten und folglich der Begegnungssituationen gewährleistet werden muss, ist eine kaum befahrene und eine möglichst von Fremdeinwirkungen geschützte Strecke zu wählen. Des Weiteren sollten unterschiedliche Straßengeometrien (Gerade/Kurve) zur Durchführung unterschiedlicher Begegnungssituationen zur Verfügung stehen.

Von einer Versuchsstrecke im realen Verkehrsraum musste aufgrund der unzureichenden Reproduzierbarkeit abgesehen werden, weswegen die Wahl schlussendlich auf den Hockenheimring gefallen ist.

3.4 Sehobjekte

Die verwendeten Sehobjekte sind in Bild 1 dargestellt. Die Fußgängerattrappen haben eine Höhe von 1,77 m und einen Reflexionsgrad von $\rho=0,1$. Dieser Wert wird mit dem Farbton RAL 7043- Verkehrsgrau B erreicht, wobei eine besonders matte Farbe verwendet wurde um eine möglichst raue und folglich lambertsch abstrahlende Oberfläche zu erzielen.



Bild 1: Sehobjekt

3.5 MOCOM

MOCOM ist das Akronym für *Multifunctional OTIA Communication Module* und wurde am Lichttechnischen Institut (LTI) entwickelt. Es handelt sich hierbei um ein Short- und Long-Range Funkmodul, das unter anderem sowohl über einen Touchscreen als auch über digitale I/O-Schnittstellen verfügt.

Im Rahmen dieser Feldstudie wurden sie dazu genutzt, die Reproduzierbarkeit der Begegnungssituationen zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurde jedes Fahrzeug und jede Lichtschanke mit einem MOCOM ausgestattet bzw. verbunden. Es war somit möglich die Startsignale für die entgegenkommenden Fahrzeuge zuverlässig und unmittelbar bei Durchfahren der Lichtschanke auszulösen. Über das MOCOM im Probandenfahrzeug konnte der Versuchsleiter zum einen überprüfen, ob das Signal korrekt ausgelöst wurde und zum anderen ohne Kenntnisnahme des Probanden mit den Fahrzeugen kommunizieren.

3.6 Probandenkollektiv

In Anlehnung an die Zielstellung der Studie sind die Anforderungen an das Probandenkollektiv entsprechend festzulegen. Dies ist notwendig, um die Vergleichbarkeit innerhalb der Studie zu gewährleisten. Zu diesen Anforderungen zählen neben dem Alter der Probanden auch die Mindestanforderungen an das Sehvermögen. Aufgrund des Alterseinflusses auf das Blendempfinden und um die Streubreite innerhalb der Daten möglichst gering zu halten, wird für den Feldversuch ein Mindestalter von 55 festgelegt. Die Probanden müssen um zum Versuch zugelassen zu werden über einen binokularen Mindestvisus von 0,8 und ein Kontrastsehvermögen von 10% mit Blendung verfügen.

Von der Untersuchung ausgeschlossen wurden Personen, welche die optometrischen Mindestanforderungen oder das Mindestalter nicht erreicht haben, sowie Personen ohne gültigen Führerschein. Bei den Probanden handelte es sich um naive Probanden, die zu Beginn der Studie nicht über den eigentlichen Untersuchungsgegenstand informiert waren.

Das Probandenkollektiv bestand aus 52 Probanden im Alter zwischen 55 und 67 Jahren (33 männlich und 19 weiblich), die alle in die Analyse einbezogen wurden. Das Durchschnittsalter lag bei 57,27 Jahren.

3.7 Fragebögen

Zur Erfassung der demographischen Daten und den Fahrgewohnheiten wurde zu Beginn des Versuchs ein Fragebogen ausgefüllt.

Auch zur subjektiven Bewertung der Begegnungssituationen wurde nach jeder ein Fragebogen mit vier identischen Fragen herangezogen:

- *Wie bewerten Sie die Erkennbarkeit des Sehzeichens von 1 - sehr schlecht bis 10 - sehr gut?*
- *Wie bewerten Sie den Einfluss des Gegenverkehrs auf die Erkennbarkeit des Sehzeichens von 1 - sehr störend bis 10 - sehr angenehm?*
- *Wie empfanden Sie die Helligkeit der Scheinwerfer des Gegenverkehrs von 1 - sehr störend bis 10 - sehr angenehm?*
- *Inwiefern haben Sie sich durch die Scheinwerfer des Gegenverkehrs geblendet gefühlt von 1 - sehr stark bis 10 - gar nicht?*

Zum Abschluss der Testfahrt wurde ein weiterer Fragebogen an die Probanden ausgegeben, der die subjektiven Eindrücke zum Thema Blendung im Straßenverkehr thematisierte. Dieser Fragebogen diente ausschließlich dazu, das Gesamtbild zu vervollständigen.

4. Versuchsdesign

4.1 Auswahl der Begegnungssituationen

Die Auswahl der Begegnungssituationen erfolgte nach der Maßgabe der als kritisch anzunehmenden Blendung. Es wird hierbei vorausgesetzt, dass beide Systeme identisch und fehlerfrei funktionieren.

Da der Einfluss der physiologischen Blendung auf das Sehleistungsvermögen des Fahrers mit der Dauer der Blendung einhergeht, sind kurze und schnelle Begegnungssituationen von der Auswahl auszuschließen. Folglich sind lang gezogene Kurven und lange Gerade als kritisch zu betrachten.

In Bezug auf die ausgewählte Versuchsstrecke, den Hockenheimring, wurden eine Linkskurve aus Sicht des Fahrers im Probandenfahrzeug (siehe Bild 2) und eine Geradensituation (siehe Bild 3) vorgesehen.



Bild 2: Sehzeichen am rechten Fahrbahnrand für die Begegnungssituation Kurve



Bild 3: Sehzeichen am rechten Fahrbahnrand für die Begegnungssituation Gerade

4.2 Messung der Blendbeleuchtungsstärke

Zur Messung der Blendbeleuchtungsstärke an Position des Fahrerauges wurde ein weiteres Versuchsfahrzeug des LTI genutzt, einen BMW Rechtslenker. An Position des Fahrerauges kann hier ein Beleuchtungsstärkemessgerät angebracht und diese gemessen werden. Während der Messungen stand das Fahrzeug. Um den Einfluss der Windschutzscheibe bei den Messungen berücksichtigen zu können, wurde auf die ausschließliche Verwendung von Stativ und Messkopf verzichtet.

Der Messpunkt *B50L* nach *ECE-Regelung 123* dient zur Blendungsbegrenzung von Abblendlicht. Der hier definierte Wert von kleiner gleich 350 cd ($\pm 0,56$ lx) pro Scheinwerfer darf nicht überschritten werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden dieser Wert als Vergleichswert herangezogen um eine mögliche Blendung durch das Scheinwerfersystem auszuschließen oder festzustellen.

Es wurden verschiedene Messreihen für eine lange Gerade von etwa 900m und eine langgezogene Kurve aufgenommen. Weder die Messreihen des BMW LED noch die Messreihen des BMW HPM überschritten in dem Punkt die maximal definierten Werte. Demnach sind die gemessenen Werte in Bezug auf die Blendung insgesamt als unkritisch anzusehen. Auch die Messwerte in der näheren Umgebung von Punkt *B50L* lagen nicht im kritischen Bereich.

4.3 Versuchskonzept der dynamischen Studie

Zur Blendbewertung der beiden Scheinwerfersysteme wurde ein volldynamisches Versuchskonzept entwickelt. Dies erlaubt eine realitätsnahe Umsetzung, da sich somit die Dynamik der beiden sich begegnenden Fahrzeuge in die Blendbewertung einbeziehen lässt. Die Geschwindigkeiten der sich begegnenden Fahrzeuge wurden vorgegeben.

Als abhängige Variable wurde die subjektive Blendbewertung mittels Fragebögen nach jeder Begegnung und als unabhängige Variable das Scheinwerfersystem herangezogen.

Es handelt sich hier um ein Within-Subjects-Design, da alle Probanden den Rundkurs mit allen Begegnungssituationen durchfuhren. Allerdings wurde den Probanden bei erstmaligem Durchfahren des Rundkurses ein Ankerreiz geboten, indem ihnen in der Begegnungssituation Kurve zunächst der BMW LED mit Abblendlicht und dann in der Begegnungssituation Gerade der BMW HPM mit Fernlicht entgegen kam. Alle weiteren Begegnungssituationen wurden randomisiert und mit aktiviertem GFH umgesetzt.

Die reproduzierbare Durchführung der verschiedenen Begegnungssituationen wurde durch den Einsatz der MOCOMs gewährleistet.

Die exakte Position der Begegnung musste zudem so gewählt werden, dass der Proband das direkte Umschalten von Abblendlicht auf blendfreies Fernlicht nicht wahrnehmen kann.

Zur Berücksichtigung der fahrzeugseitigen Unterschiede (Signalbild und u.a. auch die Farbe der Begegnungsfahrzeuge) wurde den Probanden in der Instruktion eine andere Aufgabenstellung als die eigentliche vermittelt. Laut dieser stand die Erkennbarkeit von Sehzeichen bei entgegenkommendem Verkehr im Fokus. Dementsprechend wurden auch die vier Fragen, die nach jeder Begegnung zu beantworten waren, konzipiert. Die Position der Sehzeichen am rechten Fahrbahnrand wurde im Abstand von je 50 m so gewählt, dass sie sich genau in dem Bereich befanden, in dem sich die Fahrzeuge begegneten.

Von der Wiederholung einer einzelnen fehlerhaften Begegnungssituation wird abgesehen. Grund hierfür ist die damit einhergehende zusätzliche Belastung für den Probanden.

Daher sieht das Versuchskonzept vor, dass jede Situation grundsätzlich dreimal durchlaufen wird und der Versuchsablauf redundant aufgebaut ist.

4.4 Versuchsdurchführung

Zunächst wurde den Probanden die Instruktion zum Versuchsablauf schriftlich vorgelegt, wobei als Untersuchungsgegenstand die „Erkennbarkeit von Sehobjekten bei Gegenverkehr“ angegeben wurde. Anschließend wurde der Sehtest durchgeführt und der Eingangsfragebogen zur Aufnahme der demographischen Daten von den Probanden ausgefüllt. Sofern der Proband keine weiteren Fragen zum Ablauf hatte, wurde er gebeten im Versuchsfahrzeug Platz zu nehmen und die Fahrposition einzustellen. Der Proband wurde gebeten loszufahren und auf dem ersten Streckenabschnitt den Tempomat auf 50 km/h einzustellen und zu aktivieren.

Ein Überblick über die gesamte Versuchsstrecke ist in Bild 4 zu sehen.

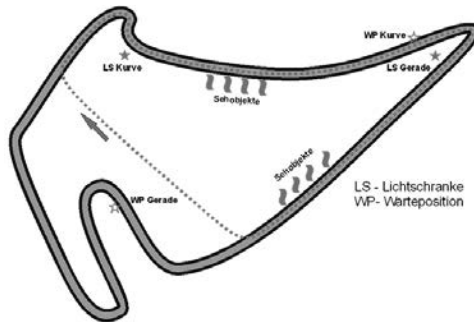


Bild 4: Vereinfachte Skizze des Hockenheimrings mit eingezeichneter Versuchsstrecke inkl. Positionen der Sehobjekte, Lichtschranken und Wartepositionen für die entgegenkommenden Fahrzeuge

Passierte das Probandenfahrzeug mit der Reflexfolie die Lichtschranke wurde sofort ein Signal (Aufleuchten eines grünen Buttons und einer grünen LED) über die MOCOMs an das jeweilige Fahrzeug an der jeweiligen Warteposition weitergegeben. Das Fahrzeug fuhr dann unmittelbar nach Aufleuchten des entsprechenden Buttons los und beschleunigte auf 60 km/h, sodass das blendfreie Fernlicht aktiviert werden konnte. Diese Geschwindigkeit wurde während der Begegnungssituation mittels Geschwindigkeitsregelanlage beibehalten. Mittels des *Ahlborn Almemo 2890-9* wurde über den an der Kopfstütze befestigten Beleuchtungsstärkemesskopf die Beleuchtungsstärke mittgeloggt.

Mithilfe der MOCOMs konnte der Versuchsleiter mit den beiden anderen LTI-Mitarbeitern kommunizieren und ihnen so die nächste Warteposition mitteilen. Die Reihenfolge der um-

gesetzten Begegnungssituationen erfolgte randomisiert und wurde zu Beginn der Studie mittels Randomisierer festgelegt.

Nach Beendigung der Versuchsfahrt füllten die Probanden einen Abschlussfragebogen mit Fragen zum Thema "Blendung im Straßenverkehr" aus.

5. Auswertung der Studie

Es wird ausschließlich die vierte Frage „Inwiefern haben Sie sich durch die Scheinwerfer des Gegenverkehrs geblendet gefühlt von 1 - sehr stark bis 10 - gar nicht“ ausgewertet. Bedingt durch einzelne fehlende Messwerte fließen insgesamt 701 von 728 Bewertungen in die Analyse ein.

Die graphische Gegenüberstellung der subjektiven Blendbewertung für die jeweilige Begegnungssituation ist in Bild 5 mittels Boxplot dargestellt. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem die Hälfte aller Messwerte liegt. Das untere und das obere Quartil werden durch die sogenannten Whiskers (Antennen) dargestellt. Bei den mit einem Kreis markierten Messwerten handelt es sich um Ausreißer in Bezug auf die Bewertung der Probanden. Diese Werte bilden demnach die reale Situation ab und sind nicht als Messfehler zu interpretieren, weshalb sie in weitere Analysen mit einbezogen werden.

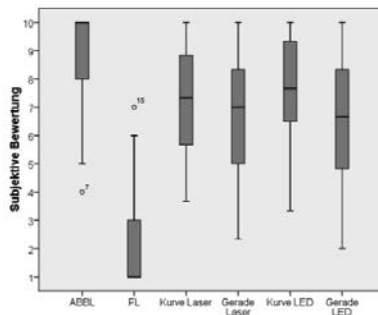


Bild 5: Boxplotdarstellung der subjektiven Blendbewertung für die verschiedenen Begegnungssituationen

Entsprechend der gängigen Praxis wird das Signifikanzniveau auf 5% festgelegt. Zur statistischen Auswertung wird ein t-Test verbundener Stichproben ausgewählt, da jeder Proband alle Situationen durchlaufen hat. Zudem ist aufgrund der Nullhypothesenformulierung ein zweiseitiger t-Test erforderlich, weshalb sich das Signifikanzniveau auf 2,5% halbiert. Folglich ist ein p-Wert kleiner 0,025 für den Nachweis einer Signifikanz notwendig.

Die Nullhypothesen lauten wie folgt:

- *Es gibt einen Unterschied zwischen dem subjektiven Blendempfinden des laserbasierten Scheinwerfersystems und des konventionellen Scheinwerfersystems.*
- *Es gibt einen Unterschied zwischen beiden Systemen in Hinblick auf die Art der Begegnungssituation (Kurve/Gerade).*

Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse aus der statistischen Auswertung dieser beiden Nullhypothesen kann abschließend folgende Hypothese abgelehnt oder dieser zugestimmt werden:

- *Mit dem Einsatz eines laserbasierten Scheinwerfersystems geht ein erhöhtes Blendepotenzial einher, welches sich negativ auf die Sicherheit im Verkehr auswirken kann.*

Erwartungsgemäß liegen Mittelwert und Median der Blendbewertung für das Abblendlicht im oberen und das gezeigte Fernlicht deutlich im unteren Bereich. Die vier anderen untersuchten Situationen liegen dazwischen. Wie in der Bild 5 zu erkennen ist, wurden beide Systeme schlechter bewertet als das dargebotene Abblendlicht, jedoch deutlich besser als das dargebotene Fernlicht. Dies lässt Schlüsse auf die Validität der Ergebnisse zu.

Mithilfe eines zweiseitigen t-Tests wird zunächst untersucht inwiefern Unterschiede zwischen den beiden Scheinwerfersystemen (Vergleich zwischen BMW LED und BMW HPM) und den beiden Begegnungssituationen (Gerade und Kurve) bestehen. Die innerhalb der statistischen Datenanalyse berechneten Signifikanzwerte sind in

Tabelle 1 zusammengefasst. Der Vollständigkeit halber ist für beide Auswertungen außerdem die berechnete standardisierte Differenz und deren Effektstärke nach Cohen angegeben.

Tabelle 1: Berechnete Signifikanzen und berechneten standardisierte Differenzen nach Cohen für die beiden durchgeführten t-Tests

T-Test	Signifikanz (2-seitig)	Standardisierte Differenz
Mittelwert- BMW HPM & Mittelwert-BMW LED	0,149	0,102 (kein Effekt nach Cohen)
Mittelwert-Kurve & Mittelwert-Gerade	0,143	0,424 (kleiner Effekt nach Cohen)

Die berechneten Werte zeigen, dass sich basierend auf den erhobenen Daten keine Signifikanz hinsichtlich der beiden Scheinwerfersysteme noch hinsichtlich der beiden Begegnungs-

situationen nachweisen lässt. Nach Cohen ergibt sich beim Vergleich der Begegnungssituationen zwar ein kleiner Effekt, allerdings lässt sich dieser nicht mit der zweiseitigen Signifikanz bestätigen. Wie bereits die Unterschiede beim Verlauf der gemessenen Blendbeleuchtungsstärken zeigten, kann dies als Indiz für den kleinen Effekt nach Cohen angesehen werden.

6. Auswertung des Abschlussfragebogens

Die Ergebnisse des Abschlussfragebogens können dazu genutzt werden, das Gesamtbild in Bezug auf das Thema Blendung im Straßenverkehr zu ergänzen und die aufgenommenen Daten zu vervollständigen.

Die erste Frage bezog sich auf die Beeinträchtigung entgegenkommender Fahrzeuge im nächtlichen Straßenverkehr, welche die Probanden von 1 (gar nicht) bis 9 (sehr stark) bewerten sollten. Im Mittel bewerteten die Probanden mit 4,42, was einer kleinen bis mittleren Beeinträchtigung zuzuordnen ist.

Die nachfolgende Frage, inwiefern sie der Meinung sind, dass dies eine Gefahr mit sich bringt, bewerteten 25 der 52 Probanden als nicht gefährlich, die 27 übrigen jedoch schon. Als Begründung hierfür wurde in den meisten Fällen angegeben, dass sich unter anderem die Sichtverhältnisse verschlechtern und sich dies negativ auf das Sicherheitsgefühl auswirkt.

Auf die Frage hin, bei welchen Szenarien die Probanden ein hohes Blendpotenzial sehen, steht „Gegenverkehr mit Fernlicht“ mit 90,4% an erster Stelle. Außerdem nannten die Probanden das Szenario „Nasse Fahrbahn“ (86,5%) und „Nachfolgendes Fahrzeug mit Fernlicht“ (69,2%). Im Gegensatz dazu sahen die Probanden die Szenarien „Gegenverkehr mit Abblendlicht“ und „Trockene Fahrbahn“ zu jeweils 98,1% als nicht kritisch/blendend an.

Auch bei der Frage bei welchen Begegnungssituationen ein Blendempfinden bei Nachfahrten durch entgegenkommende Fahrzeuge vorhanden ist, wählten 84,6% der Befragten das Szenario „Nasse Fahrbahn“. Am zweithäufigsten nannte sie „Fahrten über Kuppen“ (63,5%) gefolgt von „Fahrten auf der Landstraße“ (53,8%). Als Begegnungssituationen mit geringem Blendpotenzial bewerteten die Probanden „Fahrten auf der Autobahn“ (15,4%) und „Fahrten in der Stadt“ (9,6%).

7. Interpretation und Fazit

Ziel der durchgeführten volldynamischen Probandenstudie war es, das Blendpotenzial des laserbasierten blendfreien Fernlichtes von BMW zu quantifizieren. Als Vergleichssystem wurde ein System mit blendfreiem Fernlicht auf LED-Basis herangezogen.

Die 52 naiven Probanden im Alter zwischen 55 und 67 Jahren durchfuhren bei Nacht einen Rundkurs mit verschiedenen Begegnungssituationen auf dem Hockenheimring. Sie wurden vor der Versuchsfahrt schriftlich über den Ablauf der Versuchsfahrt informiert, allerdings wurde ihnen als Untersuchungsschwerpunkt die Erkennbarkeit von Sehobjekten bei entgegenkommendem Verkehr genannt. Umgesetzt wurden eine Begegnungssituation in der Kurve und eine auf der Geraden mit Sehobjekten am rechten Fahrbahnrand im Bereich der Begegnung beider Fahrzeuge. Bis auf die erste Runde bei Durchfahren des Rundkurses, die zum einen als Proberunde und zum anderen dazu diente, den Probanden einen Ankerreiz mitzugeben, wurden alle weiteren Begegnungssituationen randomisiert und reproduzierbar dargeboten. Nach jeder Begegnung erfolgte unter anderem eine subjektive Blendbewertung der entgegenkommenden Fahrzeuge durch die Probanden. Zur statistischen Auswertung der aufgenommenen Daten wurde ein t-Test verbundener Stichproben herangezogen. Hierbei ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Scheinwerfersystemen hinsichtlich des subjektiven Blendempfindens. Auch in Bezug auf die Art der Begegnungssituation (Kurve und Gerade) und das damit verbundene Blendpotenzial konnte keine Signifikanz nachgewiesen werden. Eine gegenüber konventionellen Systemen verstärkte physiologische Blendung tritt bei korrekt arbeitenden Systemen nach den gewonnenen Messwerten nicht auf.

Aus den Daten des Abschlussfragebogens, welcher den Probanden nach der Versuchsfahrt ausgehändigt wurde, ging hervor, dass sich die Befragten der Gefahr durch Blendung aufgrund entgegenkommender Fahrzeuge nicht unmittelbar bewusst sind oder diese als nicht sicherheitsgefährdend ansehen. Vielmehr wurden Fahrten auf nasser Fahrbahn oder Fahrten über Kuppen als besonders blendend eingestuft. Assistenzsysteme, wie der sogenannte Fernlichtassistent oder Blendfreies Fernlicht, waren dem überwiegenden Teil der Probanden kein Begriff. Auch über den Einsatz von Lasern als Lichtquelle in Scheinwerfern hatten mehr als 80% der Probanden keine Kenntnis.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass das laserbasierte System mit blendfreiem Fernlicht nicht signifikant anders bewertet wurde als das LED-basierte System mit blendfreiem Fernlicht. Von einem höheren Blendpotenzial und einem daraus resultierenden Sicherheitsrisiko ist somit nicht auszugehen.

Sicherheitskonzepte für Laserscheinwerfer

Joachim Knittel, Martin Licht, Siqi Jin, Christian Buchberger,
Automotive Lighting GmbH, Reutlingen

Abstract

Laser headlights may require an active safety system to shut down the laser in case of a defect. In this article we evaluate different techniques that could be used to implement a safety system. With the help of simulations we show that the highly directional emission property of the laser can be used to obtain a reliable error signal.

1. Einführung

Mit Lasern können Weißlichtquellen mit extrem hohen Leuchtdichten gebaut werden, die mit konventionellen LEDs nicht zu erreichen sind. Dies eröffnet die Möglichkeit kompakte und effiziente Scheinwerfer zu entwerfen, die über hohe Reichweiten verfügen. Wie in Bild 1a vereinfacht dargestellt besteht ein Laserscheinwerfer aus einem Halbleiterlaser, welcher blaues Licht bei etwa 450nm erzeugt. Dieses Licht wird mit einer Optik auf einen Konverter fokussiert, der etwa 2/3 des Lichts in Fluoreszenzlicht in grün-roten Spektralbereich umwandelt und den übrigen blauen Anteil diffus streut. In der Mischung ergibt sich weißes Licht mit der Abstrahlungscharakteristik eines Lambert-Strahlers ähnlich einer konventionellen LED. Da die Laserstrahlung auf eine kleine Fläche fokussiert werden kann, ergeben sich extrem hohe Leuchtdichten. In der Praxis ist die maximale Leuchtdichte durch thermische Prozesse im Konverter und nicht durch den Laser nach oben beschränkt [1]. Ein Reflektor oder eine Projektionsoptik verteilt das Licht auf der Fahrbahn.

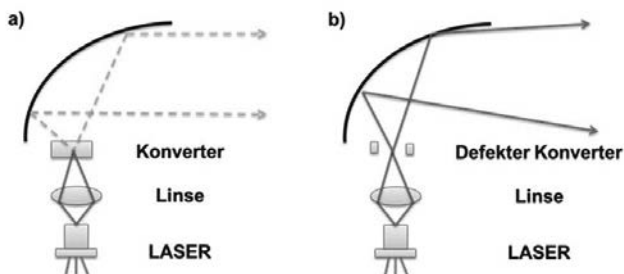


Bild 1: Schematische Darstellung eines intakten (a) und defekten (b) Laserscheinwerfers

Im normalen Betriebszustand gelangt kein direktes bzw. nicht gestreutes Laserlicht in die Umgebung und der Scheinwerfer kann unter gewissen Voraussetzungen, die in der neusten Ausgabe der Lasernorm IEC 60825-1 festgelegt sind, als Laserklasse 1 Produkt eingestuft werden. In diesem Fall fällt der Scheinwerfer unter die Lampennorm EN 62471.

Wird der Konverter beschädigt oder entfernt, kann je nach Konstruktion des Scheinwerfers ein gewisser Anteil nicht gestreuter Laserstrahlung austreten (Bild 1b). Beschädigungen könnten z.B. durch die intensive Laserstrahlung hervorgerufen werden, welche zu thermischen und mechanischen Belastungen im Konverter führt. Im Fall eines solchen Fehlers muss die Laserquelle innerhalb eines gewissen Zeitraums abgeschaltet werden. Dieser Zeitraum ist abhängig vom Gefährdungspotential der austretenden Laserstrahlung. Dazu sind Methoden notwendig die einen Fehlerzustand erkennen können. Im vorliegenden Artikel werden einige dieser Techniken vorgestellt und an Hand von Simulationen untersucht. Dabei beschränken wir uns auf aktive Detektionsmethoden, in denen beispielsweise ein Photodetektor die Strahlung überwacht. Diese stehen im Gegensatz zu passiven Methoden bei denen der direkte Laserstrahl durch konstruktive Maßnahmen bei einem Defekt blockiert oder umgelenkt wird und somit nicht aus dem Scheinwerfer austreten kann.

2. Detektionsprinzipien

Eine Beschädigung des Konverters ist unter dem Aspekt der Sicherheit von Bedeutung, wenn sich der Anteil der Laserstrahlung im ursprünglich weißen Licht erhöht. Da sich einige der physikalischen Eigenschaften der Laserstrahlung von denen des im Normalfall emittierten weißen Licht unterscheiden, können Änderungen dieser Eigenschaften grundsätzlich zur Erkennung eines Defekts genutzt werden. Diese Eigenschaften sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Das schmalbandige Spektrum des Lasers (1-5nm) wird durch die fluoreszierenden Bestandteile im Konverter in den grün-roten Spektralbereich verbreitert. Eine Reduktion des Fluoreszenzanteils lässt auf einen Defekt schließen und kann mit einem Spektrometer oder einfacher zwei Detektoren mit einem blauen bzw. gelben Filter detektiert werden. In der Praxis ist es jedoch schwierig dieses Signal zu nutzen, da die relativen Änderungen klein sind. Darüber hinaus ist spektrale Verteilung temperaturabhängig.

Falls die Laserquelle eine Amplitudenmodulation im MHz Bereich erlaubt, kann die spektrale Veränderung über die Lebensdauer des Fluoreszenzübergangs detektiert werden. Bei dieser Methode wird die Frequenzabhängigkeit der Modulationsamplitude ausgenutzt. Zeigen Fluoreszenz- und Laserstrahlung bei niedrigen Frequenzen (<10kHz) die gleiche Modulations-

amplitude, so nimmt die Modulationsamplitude der Fluoreszenzkomponente mit steigender Frequenz ab. Die Abnahme ist signifikant, wenn die Modulationsfrequenz über der inversen Lebensdauer des Fluoreszenzübergangs liegt (etwa 1-10MHz). Diese unter dem Begriff „frequency-domain lifetime measurement“ bekannte Methode hat den Vorteil, dass nur ein einziger Photodetektor notwendig ist [2].

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften der Laserstrahlung für die Defekterkennung

Eigenschaft der Laserstrahlung	Einfluss des Konverters	Detektionsprinzip
Schmalbandiges Spektrum	Verbreiterung des Spektrums	Spektrometer, Farbe, Amplitudenmodulation
Gerichtete Abstrahlcharakteristik	Streut Laserstrahlung, erzeugt Lambertverteilung	Veränderung der räumlichen Intensitätsverteilung
Hohe Kohärenz	Weglängenvarianz wird vergrößert, Kohärenz reduziert.	Kohärenzlänge oder Specklekontrast messen
Laserstrahlung ist (teilweise) polarisiert	Depolarisation durch Vielfachstreuung	Polarisationsgrad bestimmen
Rückkopplungseffekte	Rückreflex vom Konverter koppelt in Laserresonator	Ausgangsleistung, Spannungsabfall an Laserdiode

Eine Laserdiode strahlt das Licht gerichtet ab, während das erzeugte weiße Licht eine Lambertverteilung zeigt. Setzt man, wie in Bild 2 gezeigt, einen Detektor in Richtung der Strahlrichtung des Lasers über den Konverter so trifft im Normalfall nur wenig Laserlicht auf den Detektor, da es diffus vom Konverter gestreut wird. Im Falle eines Defekts trifft ein relativ großer Anteil der Laserstrahlung (im Vergleich zum diffusen Anteil) auf den Detektor, was zu einer großen Signaländerung führt. Hierbei wird vorausgesetzt, dass der direkte Laserstrahl auf den Detektor trifft. Um Toleranzen auszugleichen, muss der Detektor eine Mindestgröße besitzen, damit die direkte Laserstrahlung unter allen Umständen auf den Detektor trifft. Ein größerer Raumwinkel reduziert aber die Empfindlichkeit des Systems.

Eine wichtige Eigenschaft der Laserstrahlung ist die Kohärenz. Sie zeigt sich zum Beispiel in dem charakteristischen und oft als störend empfundenem Specklemuster. Speckle entstehen

durch zufällige Interferenzen an rauen Oberflächen. Die im Scheinwerfer verwendeten Hochleistungsdioden sind Multimode-Laser und haben eine Spektralbreite von etwa 1-5 nm. Daraus ergibt sich eine Kohärenzlänge von etwa 50µm. Tritt diese Laserstrahlung durch den Konverter so legen die Photonen auf Grund der Vielfachstreuung unterschiedlich lange Wege zurück. Sind diese Weglängenunterschiede größer als die Kohärenzlänge des Lasers, wird die Kohärenz des gestreuten Lichts merklich reduziert und das Licht verliert seine typische Lasereigenschaft. Das mit dem Laser erzeugte weiße Licht hat aber immer noch eine etwas größere Kohärenzlänge (bzw. ein kontrastreicheres Specklemuster) als das weiße Licht einer LED [3]. Für die praktische Anwendung zur Defekterkennung im Scheinwerfer fehlt aber ein einfaches Messverfahren mit dem die Kohärenz gemessen werden kann.

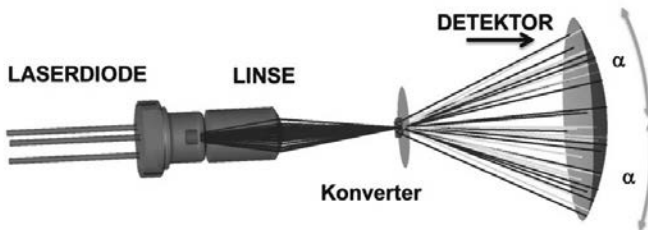


Bild 2: Weißlichterzeugung mit Laserdiode, Linse und Konverter. Der Detektor mit Raumwinkel $\Omega = 2\pi(1 - \cos\alpha)$ liegt auf der optischen Achse des Lasers. Der Kugelmittelpunkt des Detektors liegt auf dem Konverter.

Wenn man den Lasers als Detektor nutzen könnte, würde man keinen zusätzlichen Photodetektor benötigen. Dies ist prinzipiell möglich, da ein Laser auf die in den Resonator zurückgestreute Laserstrahlung reagiert und dies über die am Laser anliegende Spannung messbar ist [4]. Der Konverter streut einen Teil der Laserstrahlung in den Resonator zurück. Da ohne Konverter weniger Laserstrahlung zurückgestreut wird, sollte auf diese Weise im Prinzip ein Defekt erkennbar sein. In unseren Experimenten konnten wir aber selbst mit einer single-mode Laserdiode kein praktisch nutzbares Signal erhalten.

3. Simulation eines Laserscheinwerfers mit Sensor

Im Folgenden wird die Simulation eines Laserscheinwerfers vorgestellt, bei dem der Zustand des Konverters mit einem Photodetektor überwacht wird.

Um die Empfindlichkeit des Detektorsystems in Bezug auf einen Defektzustand beurteilen zu können, ist eine Quantifizierung der Gefährlichkeit des Defektzustandes notwendig. Wir verwenden dazu das Verhältnis $P/C6$, wobei P die Leistung der Strahlung ist (Fluoreszenzlicht, gestreute und nicht gestreute Laserstrahlung), welche in den von $C6$ beschriebenen Bereich fällt [5]. Der in der Lasernorm definierte Korrekturfaktor $C6$ beschreibt die räumliche Ausdehnung der Lichtverteilung auf der Netzhaut mit Werten zwischen 1 (minimale Ausdehnung) und 66 (maximale Ausdehnung). In der Simulation werden der Adaptationszustand des Auges und dessen Position variiert um den maximalen Wert von $P/C6$ zu finden, d.h. den Zustand in dem die Strahlungsbelastung des Auges am höchsten ist. Damit der Laserscheinwerfer als Laser Klasse 2 deklariert werden kann, muss der Wert $P/C6$ unter 1 mW liegen. In den folgenden Diagrammen wird dieser Wert als Grenzwert angezeigt.

Bild 3 zeigt das Gefährdungspotential eines Laserscheinwerfers mit Reflektor in 2m Abstand. Der Scheinwerfer hat einen Lichtstrom von 180 lm und eine Lichtstärke von 330 lx in 25 m. Der Lichtstrom wird von einer einzelnen 1.5 W Laserdiode erzeugt (siehe Bild 2). Zur Simulation eines Defekts im Konverter wird die Schichtdicke schrittweise von der Normaldicke 65 μm beginnend verringert. Je dünner die Schicht ist, desto mehr Laserlicht tritt durch den Konverter. Gleichzeitig nimmt der Anteil an nicht gestreuter Laserstrahlung zu. Unter einer Schichtdicke von 42 μm fällt die vom Scheinwerfer emittierte Strahlung nicht mehr in den Bereich eines Lasers der Klasse 2. Spätestens an diesem Punkt muss ein Sensorsystem den Defekt erkennen und den Laser abschalten. Bei einer Schichtdicke von 0 μm ist kein Konverter mehr vorhanden.

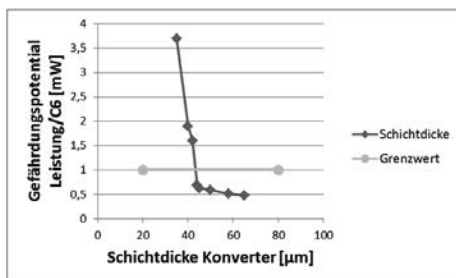


Bild 3: Gefährdungspotential gegen Schichtdicke [μm]

Als Beispiel für ein Sensorsystem haben wir die in Bild 2 gezeigte Detektoranordnung gewählt. Der Detektor ist so positioniert, dass er bei fehlendem Konverter die maximale Strahlungsleistung empfängt. In der Simulation machen wir die Annahme, dass der Detektor zu

100% transparent ist und somit für den Scheinwerfer unsichtbar. Da die Strahlungsleistung im Reflektor sehr viel größer ist als die Leistung, die den Photodetektor in Sättigung bringt, ist die vom Photodetektor benötigte Leistung vernachlässigbar. Vor dem Detektor mit dem halben Öffnungswinkel α ist wahlweise ein Filter angebracht der entweder nur Laserlicht (BLAU) oder nur Fluoreszenzlicht (GELB) transmittiert. Der Abstand zwischen Scheinwerfer und Beobachter ist wieder auf 2m festgelegt. Die Detektorsignale sind für den Normalzustand (Konverter in Ordnung) auf 1 normiert. Das Detektorsignal GELB in Bild 4 nimmt erwartungsgemäß mit zunehmender Gefährdung ab, da weniger Laserlicht konvertiert wird. Die Signale sind wegen der Lambertverteilung des Fluoreszenzlichts nur wenig vom Öffnungswinkel α abhängig. Eine Abnahme des Signals um etwa 15% zeigt an, dass das System den Grenzwert erreicht hat und der Laser abgeschaltet werden muss. Das Detektorsignal BLAU ist hingegen wegen der Abstrahlcharakteristik der Laserdiode stark vom Öffnungswinkel α abhängig. Bei Erreichen des Grenzwertes erhöht sich das Signal bei $\alpha = 30^\circ$ um den Faktor 1,9, bei $\alpha = 5^\circ$ sogar um den Faktor 4,3. Dies zeigt, dass die Richtungsabhängigkeit sehr gut dazu geeignet ist, defektbedingte Änderungen der spektralen Verteilung zu verstärken.

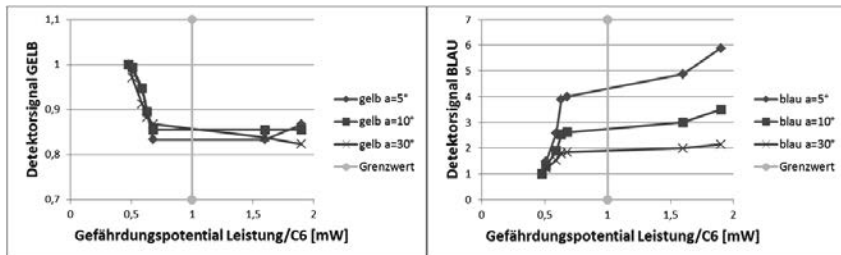


Bild 4: Normierte Detektorsignale für blaues Laserlicht und gelbes Fluoreszenzlicht als Funktion von P/C_6 .

4. Zusammenfassung

Anhand von Simulation konnten wir zeigen, dass durch geschickte räumliche Anordnung eines Detektors mit einem nur für das Laserlicht transparenten Filter ein empfindliches Defekterkennungssignal generiert werden kann. Im vorgestellten Beispiel erhöht sich das Detektorsignal um mehr als einen Faktor 4 bevor die austretende Laserstrahlung den Grenzwert für die Laserklasse 2 überschreitet. Die entsprechenden Veränderungen im Fluores-

zenzlicht sind weniger stark ausgeprägt und somit auch weniger gut für eine Defekterkennung geeignet.

5. Literaturangaben

- [1] Alan Lenef, John Kelso, Yi Zheng, Maxim Tchoul, "Radiance limits of ceramic phosphors under high excitation fluxes," Proc. SPIE 8841, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIV, 884107 (September 25, 2013).
- [2] Lakowicz, Joseph R., ed. Principles of fluorescence spectroscopy. Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] Ikeda, Yoshihisa, et al. "Incoherentized high-brightness white light generated using blue laser diodes and phosphors—effect of multiple scattering—." Journal of Light & Visual Environment 37.2_3 (2013): 95-100.
- [4] Thomas Taimre, Milan Nikolić, Karl Bertling, Yah Leng Lim, Thierry Bosch, and Aleksandar D. Rakić, "Laser feedback interferometry: a tutorial on the self-mixing effect for coherent sensing," Adv. Opt. Photon. 7, 570-631 (2015).
- [5] Karl Schulmeister, "Classification of extended source products according to IEC 60825-1," ILSC 2015 Proceedings (2015): 271-280.

Auflösungskriterien adaptiver Scheinwerfersysteme

Resolution Criteria for Adaptive Headlamps

M.Sc. **Patric Jahn**, KIT – Lichttechnisches Institut, Karlsruhe

Abstract

Since Konrad Zuse still had problems to realize his idea of a matrix beam [1] due to technological restrictions, we have multiple technologies to choose from nowadays. Especially these are LED matrix beam, LCD (VoLiFa 2020), DMD and even scanning laser systems (iLaS). Each of them has advantages as well as disadvantages, but also the term “resolution” is not defined unique.

Depending on the desired functionality and performance of the system, different requirements can be set. Therefore the previously named systems shall be presented briefly, their corresponding resolution will be defined resulting in a discussion about their strengths and weaknesses. Based on examples of safety and comfort features it will be demonstrated how to find an optimal solution for each system. In addition, the human perception will be taken into account.

1. Motivation

Rund 100 Jahre hat sich in der automobilen Lichttechnik vergleichsweise wenig getan: Halogenlampen, asymmetrische Hell-Dunkel-Grenze und Kurvenlicht gehörten zu den größten Errungenschaften. Dagegen überschlugen sich die Ereignisse in den letzten 10 Jahren regelrecht: Voll-LED-Scheinwerfer, Laserscheinwerfer, blendfreies Fernlicht und Matrixbeam sind nur ein paar der Schlagworte. Doch gerade adaptive Systeme sind alles andere als genormt und unterscheiden sich in Technologie und Funktionalität grundlegend. Verstärkt ist nun auch von hochauflösenden Systemen die Rede, doch ab wann ein System als hochauflösend gilt und welche Funktionen damit umgesetzt werden können, wird nicht einheitlich definiert.

Im Folgenden soll nun versucht werden, die gängigen Technologien kurz zu erklären, den Begriff „Auflösung“ näher im Kontext der jeweiligen Technologie zu spezifizieren und abschließend die häufig gestellte Frage nach der benötigten Auflösung zu beantworten.

2. Aktuelle Technologien adaptiver Scheinwerfer

Nachfolgender Abschnitt soll einen kurzen Überblick über die Funktionsweise aktueller adaptiver Scheinwerfersysteme geben, sowohl im Serieneinsatz als auch als Gegenstand aktueller Forschung.

Blendfreies Fernlicht mittels Blenden und/oder Schwenkmodulen

Die ersten blendfreien Fernlichtsysteme (*Adaptive Driving Beam*, ADB oder *Glare Free High Beam*, GFH) nutzten eine oder mehrere Blenden, die in den Strahlengang geschoben wurden und somit einen Teil der Lichtverteilung ausschnitten. Durch Verschieben der Blenden kann Position und Größe des ausgeblendet Bereichs stufenlos variiert werden. Weitere Vorteile ergeben sich aus der einfachen Ansteuerlogik, nachteilig ist allerdings, dass nicht zwischen zwei oder mehr Objekten durchgeleuchtet werden kann.

Eine Alternative bieten Schwenkmodule. Hier wird das Fernlicht aus mehreren unabhängig voneinander schwenkbaren Modulen aufgebaut. Die komplexere Ansteuerung bietet dafür die Möglichkeit, auch mehrere Bereiche gezielt aus der Lichtverteilung auszusparen, ohne Licht zu verschwenden. Eine Kombination der beiden Varianten ist prinzipiell möglich.

LED Matrix

Über einen LED Matrixscheinwerfer mit n LEDs lässt sich der Verkehrsraum in bis zu n Segmente unterteilen. Jedes Segment kann unabhängig voneinander gedimmt oder ganz ausgeschaltet werden, bewegliche Teile sind (mit Ausnahme von Lüftern) nicht mehr notwendig. Die erste Idee hierfür (allerdings noch mit Glühlampen und Photodioden anstatt LEDs und kamerabasierter Bildverarbeitung) hatte Konrad Zuse bereits im Jahr 1967 [1]. Prinzipiell lässt sich bei Verwendung hinreichend vieler LEDs eine große Zahl an Objekten ausblenden oder markieren ohne Licht absorbieren zu müssen. Die diskreten Schaltvorgänge erlauben selbst bei Wahl geeigneter Dimmkennlinien nur bedingt weiches Verschieben der ausgeblendeten Bereiche, erhöhen dafür aber die „Erlebbarkeit“.

DMD

DMD (*Digital Micromirror Device*) bezeichnet ein mikro(opto)elektromechanisches System (MEMS oder MOEMS), welches das Licht einer Quelle auf einem Array von Mikrospiegeln bündelt, wo es wahlweise durch eine Sekundäroptik ausgegeben oder in einen Absorber gelenkt wird. Der bekannteste Einsatz solcher Systeme ist in Projektoren, hier wird zumeist auf die Mikrospiegel von *Texas Instruments*, genannt DLP (*Digital Light Processing*), zurück-

gegriffen. Aktuelle Mikrospiegel haben eine Größe von ca. $5,4\text{ }\mu\text{m}$ Kantenlänge bei einer Auflösung von 1920×1080 Spiegeln pro Array [2].

LCD – VoLiFa 2020

Das BMBF geförderte Projekt *VoLiFa 2020* hat sich zum Ziel gesetzt, einen hochauflösenden Scheinwerfer mittels eines Flüssigkristallarrays (*Liquid Crystal Display, LCD*) zu realisieren. Das Prinzip eines LCD liegt fast allen aktuellen Computerbildschirmen und Fernsehern zu Grunde. Das Herzstück, der Flüssigkristall, bestimmt, welchen Transmissionsgrad ein einzelner Pixel hat. Die genaue Funktionsweise eines LCD kann geeigneter Fachliteratur entnommen werden. Während vergleichsweise einfach hohe Auflösungen erzielt werden können, liegt die Herausforderung im Kontrast und der Effizienz des LCD.

Scannende Systeme – iLaS

Ein gänzlich anderes Prinzip verfolgen scannende Systeme. Während sich Weißlichtquellen für scannende Systeme nicht durchsetzen konnten, wird im Rahmen des BMBF geförderten Projekts *iLaS* die Anwendung eines Lasers in Kombination mit einem Remote Phosphor (*Laser Activated Remote Phosphor, LARP*) untersucht. Im Gegensatz zum DMD wird ein einziger, „großer“ Spiegel (Größenordnung: einige Millimeter) verwendet, um das Licht einer oder mehrerer Laserdioden über einen Phosphor zu lenken und in Kombination mit der Ansteuerung der Laserdioden so beliebige Lichtverteilungen auf diesem darzustellen. Über eine Sekundäroptik gelangt das Licht dann auf die Straße. Durch geeignete Ansteuerung des Mikrospiegels kann der Lichtschwerpunkt ohne Einbußen im Duty Cycle der Laserdioden verschoben werden.

3. Auflösungsdefinitionen

Der Begriff „Auflösung“ wird je nach Zusammenhang unterschiedlich interpretiert. Daher muss für das weitere Verständnis zunächst ein einheitliches Vokabular definiert werden. Allgemein gibt die Auflösung die Größe der Pixelmatrix in Form eines Produktes ($n_{\text{horizontal}} \cdot m_{\text{vertikal}}$) an (z.B. FullHD = $1920 \cdot 1080$). Um zu beschreiben, wie groß die einzelnen Pixel sind, muss noch die Punktdichte herangezogen werden. Sie definiert, wie viele Pixel pro Flächenelement oder Raumwinkelelement enthalten sind, woraus sich der Pixelöffnungswinkel ableiten lässt, der dann genau dem Raumwinkelelement eines einzelnen Pixels entspricht.

Im Kontext adaptiver Scheinwerfersysteme werden die Begriffe Auflösung und Pixelöffnungswinkel allerdings meist gleichgesetzt, weshalb der Begriff Auflösung im Folgenden, sofern nicht anders deklariert, auch so verwendet wird. Dabei gilt es zwischen der Ein- und

der Ausblendauflösung zu unterscheiden. Einblendauflösung bezeichnet das kleinste Element, das leuchten kann. Dies entspricht intuitiv dem Pixelöffnungswinkel. Die Ausblendauflösung kann je nach System deutlich kleiner sein. Sie bezeichnet die minimale Größe eines Dunkelbereiches in der Lichtverteilung. Weiterhin wird für die Gesamtanzahl an Pixeln der Begriff Systemauflösung eingeführt.

Sowohl die verwendete Technologie eines adaptiven Scheinwerfers als auch die Systemauslegung haben einen großen Einfluss auf die effektiv erzielbare Auflösung. Daher soll nachfolgend die Auflösung der oben genannten Technologien einzeln erläutert werden.

Blendenkulisse

Da hier nur Bereiche der Lichtverteilung ausgespart werden können, ist das Einblenden/Markieren einzelner Objekte nicht möglich, die Einblendauflösung entfällt. Die Ausblendauflösung ist limitiert durch die Größe der in den Strahlengang geschobenen Blende und somit in der Regel recht niedrig.

Schwenkmodule

Die Einblendauflösung ergibt sich über den kleinsten verwendeten Modulöffnungswinkel und ist damit vergleichsweise niedrig. Dafür kann die Ausblendauflösung durch präzises Ansteuern der Module nahezu beliebig hoch sein, sofern die Module hinreichend scharfe Kanten in der Lichtverteilung haben. Weiterhin lässt sich die Größe des auszublendenden Bereiches frei variieren und die Position stufenlos verschieben.

LED Matrix

Bei einem Matrix-LED Scheinwerfer bestimmt die Anzahl verwendeter LEDs die Systemauflösung. Im Gegensatz zu den kontinuierlichen Aspekten der erstgenannten Systeme, hat dieses nur diskrete Lichtverteilungen. Dabei gibt es zwei grundsätzliche Varianten im Aufbau: (Nahezu) lückenlose Aneinanderreihung der Emitter auf einer gemeinsamen Platine oder eine Anordnung mit Lücken. Erstere Methode hat eine einzige, leicht streuende Sekundäroptik um das Licht auf die Straße zu projizieren und eine lückenlose Ausleuchtung zu erzeugen. Letztere Methode kann eine gemeinsame Sekundäroptik haben, aber eben auch pro LED(-gruppe) eine separate Sekundäroptik. In beiden Fällen muss die Optik aber gewährleisten, dass sich die Lichtkegel der einzelnen LEDs überlagern, um keine Lücken zu erzeugen. Eine exakte, lückenlose Aneinanderreihung der Kegel ohne Überlagerung an einer Wand ist nur in genau einer Entfernung möglich. In kürzeren Distanzen entstehen Lücken, weiter entfernt überlagern sie sich. Hierdurch wird schnell klar, dass bei beiden Metho-

den die Einblendauflösung genau der eines einzelnen, eingeschalteten LED-Chips entspricht. Die Ausblendauflösung im nicht-überlagernden Fall ist hierzu identisch, im überlagernden Fall aber immer abhängig von der Objektentfernung und -position. Ein weiterer Vorteil gegenüber ersteren Systemen ist die Dimmbarkeit. Die einzelnen Pixel können je nach Ansteuerung nicht nur binär ein- oder ausgeschaltet sein, sondern über Modulation auch einen beliebigen Zustand dazwischen annehmen.

DMD und LCD

Für DMDs und LCDs gelten dieselben Regeln wie für eine lückenlose LED-Matrix, wobei jeder Mikrospiegel respektive jeder Flüssigkristall einen Pixel abbildet. DMDs und LCDs sind aber wesentlich kompakter als eine LED-Matrix, weshalb sich hier leichter eine höhere Systemauflösung erzielen lässt.

Scannender Laserscheinwerfer

Scannende Systeme erlauben eine kontinuierliche Verschiebung sowohl ein- als auch auszublenender Bereiche, ähnlich schwenkbarer Module, erzielen dabei aber eine deutlich bessere Einblendauflösung. Für einen Laserstrahl mit rechteckiger Flat-Top-Intensitätsverteilung ergäbe sie sich aus der minimalen Einschaltzeit des Lasers und den Abbildungseigenschaften der Sekundäroptik, die den leuchtenden Punkt auf dem Phosphor in einen Raumwinkel transformiert. Die Ausblendauflösung wäre in einem idealen System beliebig klein, sofern die Schaltzeit der Laserdiode kleiner als der Quotient aus Spotbreite und momentaner Scangeschwindigkeit ist. Reale Laserstrahlen haben jedoch einen runden oder ovalen Spot mit gaußförmigem oder noch flacherem Strahlprofil. Daher muss hier zunächst definiert werden, ab welcher Schwelle ein Bereich als dunkel gilt. Größen wie 10% des Maximums, Halbwertsbreite (FWHM) oder $1/e$ wären zwar denkbar, jedoch willkürlich gewählt. Im Rahmen des iLaS-Projektes wurde ein Pixel daher als dunkel definiert, wenn er eine Grenze von 625 cd unterschreitet, wie in Bild 1 illustriert. Dies entspricht der maximal erlaubten Lichtstärke in B50L.

Weiterhin muss der Dynamik Rechnung getragen werden, indem die Lichtstärke gemittelt wird. Es ergeben sich für die Ein- und Ausblendauflösung die Formeln 1 und 2:

$$\alpha_{\text{ein}} = 2 * \sigma * \text{erf}^{-1} \left(1 - 2 * \left(\frac{I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}} \right) \right) + \alpha_{\text{open}} \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{aus}} = 2 * \sigma * \text{erf}^{-1} \left(1 - \left(\frac{I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}} \right) \right) + \alpha_{\text{open}} \quad (2)$$

Für die Herleitung sei an dieser Stelle auf [3] verwiesen.

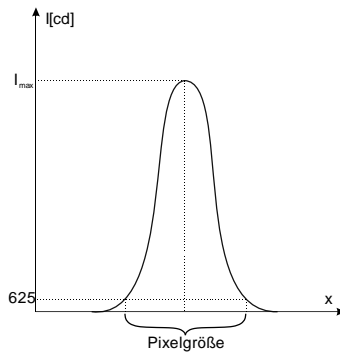


Bild 1: Definition der Pixelgröße eines scannenden Laserscheinwerfers am Beispiel iLaS

4. Benötigte Auflösung

Die benötigte Auflösung hängt neben der verwendeten Scheinwerfertechnologie vor allem vom gewünschten Funktionsumfang sowie der integrierten Sensorik ab. Nachfolgend soll die benötigte Auflösung anhand von drei exemplarischen Funktionen hergeleitet werden.

Ausblendung des Gegenverkehrs

Um Fahrzeuge effizient auszublenden, muss die Kante zwischen Ausleuchtung und Ausblendung möglichst nahe am auszublendenden Fahrzeug positioniert sein. Andererseits ist das Komfortgefühl des Fahrzeugführers mit adaptivem Scheinwerfersystem wichtig. Hofner konnte für den statischen Fall und eine Entfernung zum Vordermann von 40 m feststellen, dass ein zu kleiner Sicherheitsbereich den Fahrern stärker das Gefühl vermittelt, den Vordermann zu blenden [4]. Die subjektive Bewertung aller getesteten Sicherheitsbereiche war zwar moderat, die durchschnittliche Bewertung der Probanden auf einer Skala von 1-6 konnte aber erst ab 1° Sicherheitsbereich unter 2 sinken, (niedrige Werte entsprachen dem Gefühl, den Vordermann nicht zu blenden).

Somit sollte für die optimale Ausblendung eine Ausblendauflösung von

$$\alpha_{\text{Ausblend}} = 2 * 1^\circ + \alpha_{Fzg} \quad (3)$$

realisiert werden, wobei α_{Fzg} dem Projektionswinkel des anderen Fahrzeuges in Abhängigkeit der Entfernung entspricht. Dieser kann anhand von Bild 2 über Formel (4) hergeleitet werden.

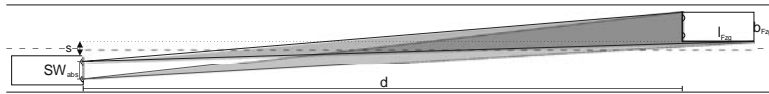


Bild 2: Skizze zur Erklärung der Variablen für die Herleitung von Formel (4)

$$\alpha_{Fzg, SW, rechts}^{SW, rechts} = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{3}{2} b_{Fzg} + s \pm \frac{SW_{abs}}{2}}{d} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{s + \frac{b_{Fzg} \pm SW_{abs}}{2}}{d + l_{Fzg}} \right) \quad (4)$$

Trägt man die Funktion in einem Diagramm auf (siehe Bild 3) sieht man, dass bereits ab einer Entfernung von ca. 100 m entgegenkommende Fahrzeuge einen Winkel von $<1^\circ$ einnehmen (Annahmen: Fahrzeugbreite 2 m, Fahrzeuglänge 5 m, Scheinwerferabstand 1,6 m, Fahrspurbreite 3 m). Da die Ausblendung bereits früher beginnt, kann die Anforderung an die optimale Ausblendung mit

$$\alpha_{Ausblend} = 2 * 1^\circ + \alpha_{Fzg} < 3^\circ \quad (5)$$

abgeschätzt werden. Allerdings ist durchaus denkbar, dass für die Wahl des Sicherheitsbereichs eher ein absoluter Abstand gewählt werden muss, sodass sich der Winkel bei größeren Entfernungen verringert. Dies müsste aber erst noch in einer weiteren, gegebenenfalls vordynamischen Probandenstudie evaluiert werden.

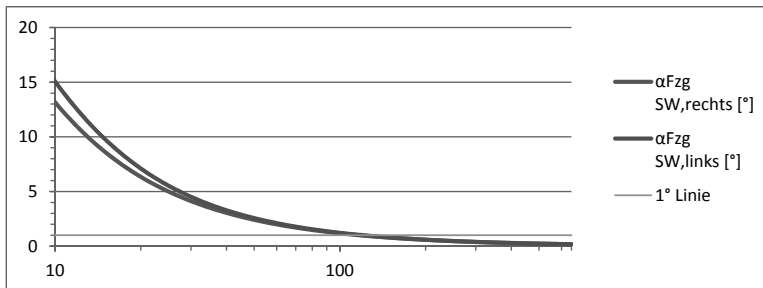


Bild 3: Winkel, unter dem ein entgegenkommendes Fahrzeug gesehen wird aus der Position des rechten und linken Scheinwerfers bis d=500 m

Im Gegensatz zur vergleichsweise geringen Anforderung an die Ausblendauflösung ist die Anforderung an die Verschiebeauflösung hier deutlich höher. Für Systeme mit kontinuierlicher Verschiebung ist dies keine Herausforderung, diskrete Systeme wie LED-Matrix mit einer Auflösung α_{Pixel} , die gerade der Mindestanforderung entspricht ($\alpha_{Pixel} = \alpha_{Ausblend}$), wären die meiste Zeit jedoch nicht im optimalen Betriebspunkt. Wann immer der Gegenverkehr sich nicht genau in der Mitte eines oder mehrerer Pixel befindet, muss ein zusätzlicher Bereich ausgeschaltet werden, wodurch sich der ausgeblendete Bereich unnötig verdoppelt. Das unfreiwillige Ausblenden von Wild auf der eigenen Fahrbahn könnte die Folge sein. Eine

konkrete Anforderung an die Verschiebeauflösung kann nicht gegeben, lediglich die Effizienz der Ausblendung mittels Formel (6) in einer Dimension beziffert werden:

$$\eta_{\text{Ausblend}} = \frac{\alpha_{\text{Ausblend}}}{\alpha_{\text{Fzg}} + \alpha_{\text{Pixel}}} \quad (6)$$

Das Ausblenden mehrerer Fahrzeuge ist, wie eingangs erwähnt, mit Blenden fast nicht möglich. Auch diskrete Systeme mit geringer Auflösung können hier nur selten Zwischenbereiche ausleuchten. So erscheinen zwei entgegenkommende Fahrzeuge aus Sicht des rechten Scheinwerfers (der Winkel des linken Scheinwerfers wäre noch kleiner) unter einem Differenzwinkel von

$$\Delta = \tan^{-1} \left(\frac{s + \frac{b_{\text{Fzg}} + SW_{\text{abs}}}{2}}{d_1 + l_{\text{Fzg}}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\frac{3}{2} b_{\text{Fzg}} + s + \frac{SW_{\text{abs}}}{2}}{d_2} \right) \quad (7)$$

was bedeutet, die Lücke zwischen den beiden Fahrzeugen verschwindet wenn

$$\frac{s + \frac{b_{\text{Fzg}} + SW_{\text{abs}}}{2}}{d_1 + l_{\text{Fzg}}} = \frac{\frac{3}{2} b_{\text{Fzg}} + s + \frac{SW_{\text{abs}}}{2}}{d_2} \quad (8)$$

gilt. Ist Fahrzeug 1 beispielsweise noch 100 m entfernt, so muss Fahrzeug 2 einen Abstand von mindestens 80 m zu Fahrzeug 1 einhalten, damit überhaupt eine Lücke zwischen den beiden Fahrzeugen entsteht. Halten die beiden Fahrzeuge einen Sicherheitsabstand von 50 m ein, so entsteht die Lücke erst ab einer Entfernung von 58 m respektive 108 m, die Begegnungssituation dauert dann bei einer Differenzgeschwindigkeit von 140 km/h noch 1,5 s.

Hiermit kann festgehalten werden, dass die Sinnhaftigkeit, mehrere entgegenkommende Fahrzeuge ausblenden zu wollen, fraglich ist. Einen Unterschied in der Performanz machen hier nur kontinuierliche gegenüber diskreten Systemen.

Markieren und Abblenden von Verkehrsschildern

Eine Mischung zwischen Sicherheits- und Komfortfunktion stellt das Markieren und Abblenden von Verkehrsschildern dar. Eine Schildermarkierung ist sicherlich nicht für alle Schilder sinnvoll, sondern sollte selektiv nur für Schilder erfolgen, die vor potenziellen Gefahrenstellen warnen. Dennoch scheint hier eine präzise Markierung erstrebenswert, um andere Verkehrsteilnehmer nicht „anzublinden“. Dies stellt zwar nicht unbedingt eine Gefahrenquelle dar, könnte aber zur Verwechslung mit der Lichthupe und somit zu Irritationen führen. Zur Herleitung der zur Markierung nötigen Auflösung sollen zunächst wieder einige Annahmen getroffen werden: Das Fahrzeug fährt mit 100 km/h, das Schild sei eine „Ronde Größe 3“, Bremsverzögerung 2 m/s². Um das Fahrzeug rechtzeitig abzubremsen muss das Schild be-

reits frühzeitig erkannt werden. Ein Abbremsvorgang auf 70 km/h beträgt nach Formel (9) bereits 126 m:

$$s = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot a} + v_1 t \quad (9)$$

In dieser Entfernung nimmt das Schild einen Winkel von $0,34^\circ$ ein. Analog der Ausblendung anderer Fahrzeuge ist dies als Einblendauflösung für diskrete Systeme nur dann ausreichend, wenn das Schild sich exakt mittig eines Pixels befindet. Für eine korrekte Nachverfolgung des Schilds muss die Auflösung deutlich kleiner gewählt werden (siehe Bild 4: links). Für kontinuierliche Systeme ist hier wieder die Verschiebeauflösung ausschlaggebend. Insbesondere ein laserbasiertes System hat hier keine Nachteile durch die weichen Kanten, wie in Bild 4: rechts zu sehen ist.

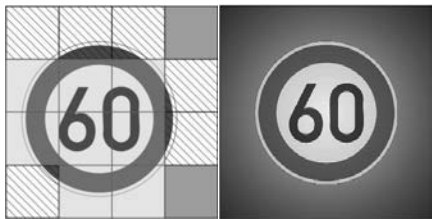


Bild 4: Links: Markierung eines Schildes mittels diskretem System, $\alpha_{\text{Pixel}}=0,1^\circ$.

Rechts: Weiche Übergänge und deutlich reduzierte Lichtstärke außerhalb des Schildes bei $\alpha_{\text{Einblend}}=0,5^\circ$.

Die Berechnungen können analog für ein Fußgängermarkierungslicht übernommen werden, da eine Ronde der Größe 3 einen Durchmesser von 750 mm aufweist und somit in der Größenordnung eines Fußgängerprofils liegt.

Das Abblenden von Verkehrsschildern stellt keine höheren Anforderungen an die räumliche Auflösung des Systems dar, wohl aber an die Helligkeitsabstufungen. Wie von Jahn in [5] gezeigt wurde, beträgt die Beleuchtungsstärke am Fahrerauge durch ein Verkehrsschild in 50 m Entfernung ca. 6,1 lx (Annahmen: 100.000 cd pro Scheinwerfer, geschwindigkeitsbegrenzendes Schild Typ „Ronde 3“, 1000 cd/(lx*m²) Reflexionskoeffizient durch Messungen bestimmt). Verglichen mit 0,28 lx in B50L (2 Scheinwerfer, 50 m Entfernung, 350 cd) führt diese Beleuchtungsstärke zu einer starken Beeinträchtigung der Sicht. Ein komplettes Ausblenden des Schildes ist nicht unbedingt sinnvoll, wohl aber die Reduzierung der Lichtstärke in dessen Richtung. Zwar wäre dies auch pauschal auf einen niedrigen Wert möglich, jedoch sollen hier hochauflösende Systeme betrachtet werden. In Anlehnung an ECE R 123, die für Schilder in 50 m Entfernung eine niedrigere Mindestlichtstärke fordert als für solche in 100 m

(190 cd gegenüber 375 cd), wäre über eine adaptive Absenkung der Lichtstärke entsprechend des doppelten Entfernungsquadrats nachzudenken. Dies würde in einer für den Fahrer konstanten Leuchtdichte resultieren, was hier ohne gesonderte Überprüfung als komfortabler angesehen wird als ein 2-Stufen-System.

Baustellenlicht

Als letztes Beispiel wird ein Baustellenlicht gewählt, welches dem Fahrer helfen soll, in engen Baustellen seine Fahrzeugbreite besser abzuschätzen. Dieses ist grundsätzlich in zwei Variationen denkbar: als Lichtteppich oder in Form zweier Streifen.

Bild 5 zeigt den Projektionswinkel eines 15 cm breiten Streifens über der Entfernung. Für eine HDG in 65 m Entfernung und ein Baustellenlicht bis zu dieser Grenze liegt der Winkel bei $\alpha_{\text{Baust.}} \geq 0,13^\circ$.

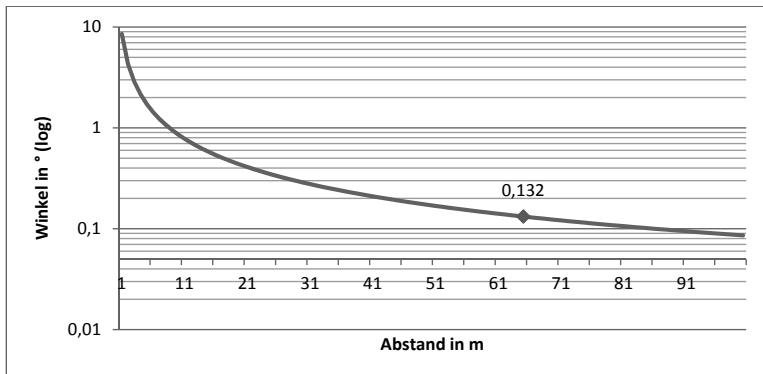


Bild 5: Projektionswinkel einer 15 cm breiten Linie in Abhängigkeit vom Abstand.
Hervorgehoben der Punkt bei 65 m an der Hell-Dunkel-Grenze

Problematisch ist hierbei allerdings, dass ein solcher Streifen mit der arctan-Funktion breiter wird, was an den Kanten der Lichtverteilung zu einer Treppenform führt. Für eine gleichmäßig breite Linie muss die Auflösung entweder deutlich höher sein oder die Kanten weiche Übergänge besitzen. Letzteres passiert zu einem gewissen Grad auch über den Fahrbelag, der insbesondere im Kontext von optischen Abbildungen sehr rau ist.

Im Falle eines Lichtteppichs sind die Anforderungen somit nur scheinbar geringer, wenn versucht wird, mit harten Kanten zu arbeiten. Die Problematik mit den Treppen an den Rändern bleibt bestehen. Für eine Verwendung weicher Kanten spricht allerdings, dass Harte Kanten zu Fixationen des Auges führen können, und somit ein erhöhtes Ablenkungspotenzial für

andere Verkehrsteilnehmer mit sich bringen sowie den Blick des Fahrers auf das Vorfeld reduzieren.

Somit ist ein scannendes System für einen Lichtteppich prädestiniert, kann aber bei der Wahl zweier Streifen aufgrund der zu geringen Einblendauflösung nicht die Kriterien erfüllen. Hochauflösende DMD- oder LCD-Systeme sind hier durchaus in der Lage, solche Muster darzustellen, komplexere Figuren wie Pfeile stehen dann aber im Widerspruch zu den weichen Kanten. Generell ist allerdings fraglich, ob zu spezielle Lichtmuster überhaupt sinnvoll und zulassungsfähig sind, da sie andere Verkehrsteilnehmer ablenken könnten. Auch der Nutzen ist zumindest in dichter befahrenen Gegenden nicht erwiesen. Gerade wenn mehrere Fahrzeuge mit einer solchen Technologie unterwegs sind, kann der Fahrer gegebenenfalls nicht mehr unterscheiden, welches Symbol für ihn bestimmt ist. Hierzu sind aber noch gesonderte Untersuchungen erforderlich. Aufgrund dieser Bedenken soll hier auch auf eine Berechnung der benötigten Auflösung für komplexere Lichtmuster verzichtet werden.

Menschliches Auge

Als oberes Limit für die benötigte Auflösung kann das menschliche Auge angesehen werden. Hier begrenzt allein schon die Größe der Rezeptoren den Visus auf theoretische Werte von unter 2,0, was einer Auflösung von $0,0083^\circ$ entspricht. Realistischer sind allerdings Annahmen, der durchschnittliche Visus betrage zwischen 0,7 (Mindestanforderung zum Erhalt der Fahrerlaubnis nach FeV [6]) und 1,0. Dennoch sei an dieser Stelle explizit auf die Nonius-Sehschärfe verwiesen, die die Empfindlichkeit des Auges gegenüber Parallelverschiebungen beschreibt, was Effekte wie Aliasing bei Treppenstrukturen erklärt. Für nähere Informationen sei auf [7] verwiesen.

5. Fazit

Es wurde gezeigt, dass die pauschal gestellte Frage „Welche Auflösung wird benötigt“ sich nicht mit einem einzigen Zahlenwert beantworten lässt. Seitens der Entwicklung muss natürlich immer eine Abwägung zwischen technologischen Möglichkeiten, Anforderungsprofil und Budget getroffen werden. Dennoch sollte bereits bei der Wahl der verwendeten Technologie Tabelle 1 Berücksichtigung finden. Diese fasst die gewonnenen Erkenntnisse über die Anforderungen an das System zusammen und zeigt auf, mit welchen Technologien man welche Funktionen gut umsetzen kann und auf welche man besser verzichtet.

Tabelle 1: Übersicht über die vorgestellten Systeme und Funktionen mit Bewertung

Funktion	Blenden/Projektionsmodul	LED-Matrix	DMD	LCD	Scannendes Lasersystem
Blendfreies Fernlicht	++	+	+	+	++
Markierungslicht	-	+	+	+	+
Baustellenlicht/ komplexe Figuren	--	+	++	++	0
menschliches Auge	+	+	+	+	++

Ebenfalls sollten frühzeitig Überlegungen angestellt werden, wie genau ein Pixel im zu entwickelnden System definiert ist, insbesondere hinsichtlich der Unterscheidung von Einblend- und Ausblendauflösung.

Abschließend muss auch in Abhängigkeit des Funktionsumfangs der Systemöffnungswinkel definiert werden. Für die meisten Funktionen reicht hier ein geringer Öffnungswinkel, sodass die Systemauflösung vergleichsweise klein sein kann oder alternativ die Randbereiche niedriger aufgelöst werden.

Literatur

- [1] K. Zuse, US3316442A, Apparatus for controlling headlights by counterlight (1967).
- [2] Texas Instruments, Datenblatt DLP4710 0.47.1080p DMD (2015).
- [3] C. Gut et al., *Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer*, Elektronik im Fahrzeug (ELIV), Baden-Baden, 2015.
- [4] R. Hofner, Bewertung von Ausblendungsstrategien bei adaptiven Scheinwerfersystemen, *Bachelorarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2014.
- [5] P. Jahn, Kriterien zur Auflösungsbestimmung von adaptiven Scheinwerfersystemen, *Masterarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2014.
- [6] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, "Fahrerlaubnis-Verordnung vom 13. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1980), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. April 2014 (BGBl. I S. 348) geändert worden ist": FeV, 2010.
- [7] *Strabismus: 72 Tabellen*, 3rd ed. (Eds: H. Kaufmann, W. de Decker), Thieme, Stuttgart, 2004.

Dynamische Sicherheitsbereiche für hochauflösende Fernlichtsysteme

Said Omerbegovic, Prof. Dr. rer. nat. **Cornelius Neumann**,
Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe;
Dr.-Ing. **Christian Funk**, AUDI AG, Ingolstadt

Abstract

The introduction of high resolution high beam systems requires the application of intelligent algorithms in order to ensure an optimal illumination of the environment for the driver and an accurate deglaring of other traffic participants. The prediction of vehicle trajectories and the interpretation of dynamic traffic scenarios using approaches in the field of artificial intelligence enable a precise estimation of future states of the vehicle environment and a predictive control of the headlight system. This contribution describes the processing for a predictive glare-free high beam, considering the processing of the sensor set, including the ECU controlling the actuator. Furthermore, first results regarding the performance of the system and a comparison to conventional approaches in the control of glare-free high beam systems are discussed.

Kurzfassung

Der Einsatz von hochauflösenden Fernlichtsystemen erfordert den Einsatz von intelligenten Algorithmen, um eine optimale Ausleuchtung für den Fahrer und eine genaue Entblendung anderer Verkehrsteilnehmer sicherstellen zu können. Die Prädiktion von Fahrzeugtrajektorien und die Interpretation von dynamischen Verkehrsszenarien unter Nutzung von Ansätzen aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz ermöglicht eine präzise Schätzung von zukünftigen Zuständen des Fahrzeugumfelds und eine vorausschauende Ansteuerung von Scheinwerfersystemen. In diesem Beitrag wird die Wirkkette von Sensor zu Aktuator mit den zugehörigen Ansteuerungskomponenten für ein vorausschauendes, blendfreies Fernlicht dargestellt. Außerdem werden Ergebnisse hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Systems und der Vergleich mit einer konventionellen Vorgehensweise bei der Ansteuerung des blendfreien Fernlichts diskutiert.

1. Einleitung

Die Fortschritte im Bereich der Lichttechnik, besonders hinsichtlich effizienter Lichtquellen mit hoher Intensität, erlauben die Entwicklung von hochauflösenden Scheinwerfersystemen, die eine optimale und präzise Ausleuchtung der Fahrzeugumgebung ermöglichen. [1] Aktuelle Scheinwerfersysteme, die ein blendfreies Fernlicht oder ein Markierungslicht mittels einer Walze zwischen Lichtquelle und Linse oder einer gezielten Anordnung der Projektionsoptiken realisieren, sind limitiert durch die Anzahl an möglichen Dunkelbereichen oder deren Größe. Hochauflösende Scheinwerfersysteme hingegen können beliebige Bereiche der Umgebung gezielt beleuchten oder aus der Lichtverteilung ausblenden und die Dunkelbereiche bis hin zu den Konturen eines Objekts reduzieren. Diese Tatsache bietet erhebliche Möglichkeiten für zukünftige Lichtfunktionen, impliziert aber gleichzeitig hohe Anforderungen an die im Fahrzeug verbauten Sensoren sowie die Verarbeitungs- und die Ansteuerungseinheit.

Dementsprechend erfordert die Nutzung von hochauflösenden Scheinwerfersystemen in Fahrzeugen eine Erweiterung der aktuellen Verarbeitungslogik, die ein erkanntes Objekt basierend auf dessen Position beleuchtet oder ausblendet. Um die Anforderungen zu erfüllen werden Algorithmen verwendet, die eine Aussage über zukünftige Zustände des Fahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer erlauben.

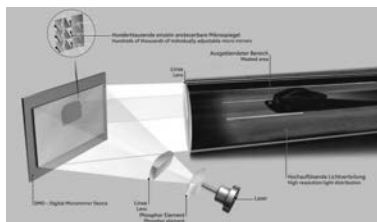
In dieser Ausarbeitung werden zunächst neuartige Lichtfunktionen, die mittels hochauflösender Scheinwerfer realisiert werden können, und ein Konzept, das einen entsprechenden Ansatz hinsichtlich der Architektur des Fahrzeug und der Software beschreibt, vorgestellt. Des Weiteren werden erste Ergebnisse hinsichtlich der Leistungsfähigkeit eines solchen Systems anhand realer Testfahrten im Vergleich zu einer konventionellen Ansteuerung dargestellt. Abschließend erfolgt eine Diskussion dieser Ergebnisse und ein Ausblick auf zukünftig erforderliche Untersuchungen, die die Leistungsfähigkeit des Systems bestätigen.

2. Hochauflösende Scheinwerfersysteme und lichtbasierte Assistenzsysteme

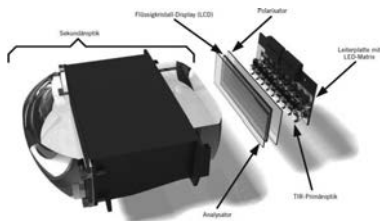
Es gibt eine Reihe von aussichtsreichen Technologien, die die Entwicklung von hochauflösenden Scheinwerfersystemen ermöglichen. Eine grundlegende Unterscheidung hinsichtlich der Funktionsweise ist in diesem Fall möglich: Auf der einen Seite findet man Systeme, die eine bildgebende Einheit mittels einer Lichtquelle beleuchten. [2, 3] Die bildgebende Einheit wird hierbei von einer Elektronik angesteuert, um das Licht gezielt auf die Projektionsoptik zu lenken oder zu absorbieren. Auf der anderen Seite werden scannende Systeme genutzt, um einen Laserstrahl mittels eines mikroelektromechanischen Systems über einen Phosphor zu führen, der den Laserstrahl in weißes Licht umwandelt, das anschließend durch eine Projek-

tionsoptik abgebildet wird. [4, 5, 6] Abbildung 1 zeigt drei mögliche Technologien, die für die Entwicklung hochauflösender Scheinwerfersysteme genutzt werden können.

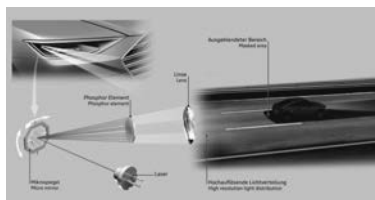
Die Technologien bieten Vor- und Nachteile hinsichtlich der möglichen Auflösung und der Effizienz. Für eine nähere Betrachtung ihrer Eigenschaften wird auf die entsprechende Literatur verwiesen. [3, 7]



(a) System basierend auf Digital Micromirror Device [7]



(b) System basierend auf Flüssigkristallanzeige [3]



(c) System basierend auf mikroelektromechanischem System [7]

Bild 1: Technologien für hochauflösende Scheinwerfersysteme

Hochauflösende Scheinwerfersysteme erlauben die Entwicklung neuartiger Lichtfunktionen. Im Abblendlichtbereich sind Funktionen vorstellbar, die dem Fahrer bei der Spurführung unterstützen oder Empfehlungen zu einer sicheren und effizienten Fahrweise geben. Des Weiteren ermöglicht die hochauflösende Lichtverteilung eine Kommunikation mit der Umwelt, die in Zukunft für pilotiert fahrende Automobile von großer Bedeutung ist. So können andere Verkehrsteilnehmer, vor allem Fußgänger, durch die Projektion eines Fahrschlauchs die zukünftige Fahrzeugtrajektorie oder durch die Projektion eines Fußgängerüberweg die Möglichkeit zum sicheren Überqueren der Straße wahrnehmen. Abbildung 2 zeigt die Umsetzung einer Reihe von Lichtfunktionen im Abblendlichtbereich.



(a) Spurführung



(b) Empfehlung

Bild 2: Lichtfunktionen mit hochauflösenden Scheinwerfersystemen

Doch auch für aktuell in Serie befindliche lichtbasierte Assistenzsysteme bietet eine hochauflösende Lichtverteilung enormes Potential. Im nächsten Abschnitt dieser Ausarbeitung wird ein Konzept vorgestellt, dass ein vorausschauendes Blendfreies Fernlicht realisiert. Durch eine entsprechende Ansteuerung soll der Dunkelbereich beim Ausblenden anderer Verkehrsteilnehmer minimiert werden.

3. Konzeptionierung einer prädiktiven Ansteuerung

Blendfreie Fernlichtsysteme basieren auf der Detektion und Klassifikation anderer Verkehrsteilnehmer durch ein im Fahrzeug befindliches Kamerasystem. Die Bildverarbeitung bestimmt hierbei als Information die Position und die Dimension des Objekts, die anschließend von der Ansteuerungseinheit für die Scheinwerfer ausgewertet wird. Diese Einheit regelt die Lichtverteilung in der Hinsicht, dass andere Verkehrsteilnehmer ausgeblendet werden und die restliche Umgebung weiterhin durch das Fernlicht beleuchtet wird. Bei der Bestimmung der Objektgrenzen ist ein Vorhalt notwendig, um Toleranzen bei der Kalibrierung zwischen Kamerasystem und Scheinwerfer oder durch das Setzverhalten des Scheinwerfers zu berücksichtigen. [9] Durch eine Kalibrierung des Scheinwerfersystems zur Kamera während des Betriebs des Fahrzeugs kann diese Komponente entscheidend reduziert werden. [10] Doch eine Reduktion des Vorhalts bei dem Einsatz von hochauflösenden Scheinwerfern beinhaltet das Risiko, andere Verkehrsteilnehmer in dynamischen Fahrsituationen aufgrund von Latenzen bei der Verarbeitungskette zumindest kurzzeitig zu blenden.

Das folgende Konzept soll eine vorausschauende Ansteuerung des Toleranzvorhalts und dessen Minimierung in Abhängigkeit von der Fahrsituation ermöglichen. Abbildung 3 zeigt die hierfür vorgesehene Systemarchitektur.

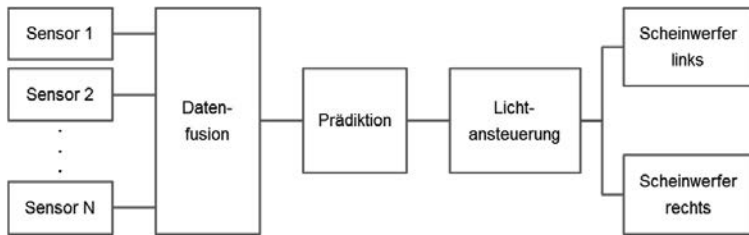


Bild 3: Systemarchitektur für eine prädiktive Ansteuerung

Die Realisierung einer prädiktiven Ansteuerung erfordert die Nutzung von Sensoren, die Informationen über die Entfernung zu anderen Verkehrsteilnehmern und deren Bewegungscharakteristik erfassen können, wie zum Beispiel Radarsysteme. Die Informationen eines solchen Sensors werden mit den Daten der Kamera fusioniert. Mittels der fusionierten Daten werden die zukünftige Trajektorie des Fahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer prädiziert, wobei eine Trajektorie charakteristische Größen der Fahrzeugbewegung, wie z.B. Position, Richtung und Geschwindigkeit, enthält. Anhand eines Abgleichs der geschätzten, zukünftigen Trajektorie der Fahrzeuge mit den von der Sensorik erfassten Daten zum aktuellen Zeitpunkt erfolgt eine Festlegung der Objektgrenzen, die zur korrekten Ausblendung erforderlich sind.

4. Leistungsfähigkeit der prädiktiven Ansteuerung

Die vorausschauende Ansteuerung des Toleranzvorhalts für das blendfreie Fernlicht ist für eine Untersuchung der Leistungsfähigkeit in einem Testfahrzeug mit Seriensensorik implementiert worden. Die Datenfusion kombiniert Informationen der Kamera und des Radarsystems des Fahrzeugs, um die benötigte Kenntnis über das Fahrzeugumfeld für die Prädiktion bereitzustellen. Das Fahrzeug verfügt über einen adaptiven Scheinwerfer mit 128 Segmenten im Fernlicht, der für die Realisierung genutzt wird.

Bisherige Untersuchungen im Bereich des blendfreien Fernlichts konzentrieren sich auf den Vergleich von Einschaltzeiten in Abhängigkeit der Auflösung des Scheinwerfers. [11] Ein Vergleich zwischen der konventionellen Ansteuerung des Scheinwerfers und der Ansteuerung, der die Prädiktion der Trajektorien vorgelagert ist, wird über die Gegenüberstellung der Einschaltzeiten der einzelnen Scheinwerfersegmente bei einer Testfahrt auf einer Landstraße in der Umgebung von Ingolstadt ermöglicht. Diese Einschaltzeiten sind in Abbildung 4 dargestellt.

Anhand eines Vergleichs der Einschaltzeiten der konventionellen und der prädiktiven Ansteuerung lässt sich das Potential des in dieser Ausarbeitung vorgestellten Ansatzes bestätigen. Besonders im zentralen Bereich der Fernlichtverteilung lässt sich ein Anstieg der Einschaltzeit um etwa 10% feststellen.

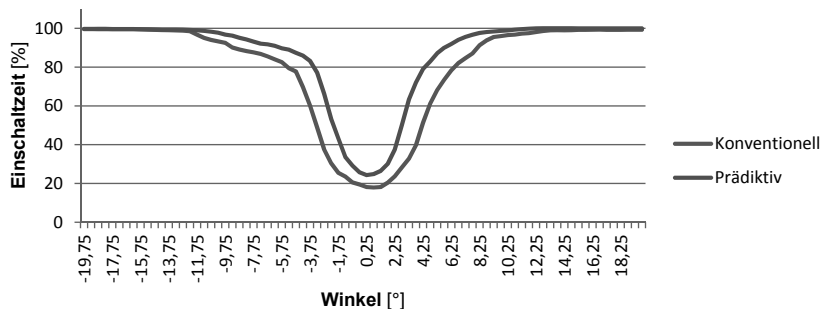


Bild 4: Vergleich der Leistungsfähigkeit

5. Zusammenfassung

In dieser Ausarbeitung wird ein Konzept für eine vorausschauende Ansteuerung des Toleranzvorhalts einer Dunkellücke bei einem blendfreien Fernlicht vorgestellt. Dieses Konzept wird in einem Testfahrzeug implementiert und anhand eines Vergleichs mit einer konventionellen Ansteuerung auf seine Leistungsfähigkeit untersucht.

Erste Ergebnisse zeigen das Potential des Konzepts, die Einschaltzeit des Fernlichts weiter zu erhöhen. Zukünftige Untersuchungen konzentrieren sich auf die Optimierung und Absicherung des Systems, vor allem hinsichtlich der Sicherstellung der Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer.

- [1] S. Berlitz, V. Krstajic: „Future of Lighting – Aesthetic, Dynamic and Interaction“, 11th International Symposium on Automotive Lighting, September 2015.
- [2] V. Bhakta, B. Ballard: „High resolution adaptive headlight using TI DLP®Technology“, 11th International Symposium on Automotive Lighting, September 2015.
- [3] Henrik Hesse: „LCD-Scheinwerfer für eine volladaptive Beleuchtung“, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, November 2015.
- [4] C.Gut, M. Seitz, C. Neumann: „The perfect light: MOEMS controlled matrix laser headlamp“, 17th International Congress Electronics in Vehicles, Oktober 2015.
- [5] A. Petersen et. al.: „Challenges for MOEMS based scanning laser systems“, 11th International Symposium on Automotive Lighting, September 2015.
- [6] J. Roth et. al.: „RGB-Laser Scanning Module for onRoad Projection“, 11th International Symposium on Automotive Lighting, September 2015.
- [7] C. Gut, I. Rotscholl, C. Neumann: „Theoretische Leistungs- und Effizienzanalyse laserbasierter Pixellichtsysteme“, 6. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik, Mai 2014.
- [8] Audi MediaCenter: <https://www.audi-mediacycenter.com/de>.
- [9] A. Totzauer: „Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht“, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [10] S. Söhner: „Entwicklung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation“, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- [11] H. Vogt, A.Austerschulte: „Glare-Free LED High Beam System – Segments – Pixel – High Resolution Matrix“, 11th International Symposium on Automotive Lighting, September 2015.

Licht führt!? – Einsatzmöglichkeiten von lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen in Einfädelsituationen

Guiding Light!? – Usage of light-based driver assistance systems in merging situations

M. Sc. **Anna Zoé Krahnstöver**, Dipl.-Ing. **Sebastian Thomschke**,
Dr. **Gunnar Koether**, Volkswagen AG, Wolfsburg;
Prof. Dr. **Mark Vollrath**, Technische Universität Braunschweig

Kurzfassung

Der Beitrag schildert eine Untersuchung mit dem Ziel, Verkehrsteilnehmer in Einfädelsituationen durch aktive Lichtfunktionen zu unterstützen. Dafür projizieren andere Fahrzeuge dynamische Pfeilspitzen (sog. Gräten) in verschiedenen Darstellungen auf die Fahrbahn, um den Fahrer über mögliche Spurwechselmanöver zu informieren oder zu warnen. Die Untersuchung liefert zum einen Erkenntnisse über die Auswirkung der neuartigen Lichtkonzepte auf das Fahrverhalten; zum anderen werden verschiedene subjektive Bewertungen sowie das jeweilige Verständnis der Fahrerassistenz erfasst. Anhand dieser Daten wird dargestellt, wie der Fahrer durch innovative Lichtassistenz am besten unterstützt werden kann.

Abstract

The article describes an examination aiming to assist road-users during merging-scenarios using innovative lighting functions. Therefore dynamic arrowheads (so-called fish bones) are projected on the street by other road-users. A distinction between lighting functions with a warning and an informing message is made. Thereby further insight into the effects of innovative lighting functions on driving behavior is gained; additionally the subjective evaluation and understanding of the lighting concepts are pointed out. The data gathered is used to discuss an adequate way to assist the driver using innovative lighting functions.

1. Motivation

Der Unfalltyp „Unfälle im Längsverkehr“ umfasst einen Großteil aller Unfälle mit Getöteten und Pkw-Beteiligung außerorts bei Tageslichteinschränkungen. Der Fahrstreifenwechsel spielt hierbei eine große Rolle. Die fehlerhafte Einschätzung von Geschwindigkeit und Abstand des nachfolgenden Verkehrs sowie Spurwechsel trotz unzureichender Sichtverhältnisse sind als Hauptunfallursachen zu nennen [1]. Da laut [2] neunzig Prozent der Informationen beim Fah-

ren visuell aufgenommen werden, soll durch aktive Lichtfunktionen im Blickfeld des Fahrers versucht werden, diesen bei Spurwechselmanövern zu unterstützen.

Für die Gestaltung etwaiger Lichtfunktionen wird auf die Ergebnisse einer Studie zur Wirkung von Lichtmustern und -dynamiken [3] zurückgegriffen. Aufgrund des gefundenen positiven Einflusses von einfachen Pfeilspitzen, sog. Gräten, hinsichtlich des Fahrverhaltens und subjektiven Verständnisses bilden diese Formen die Basis der hier untersuchten Lichtkonzepte.

Da die Lichtprojektionen auf der Fahrbahn für mehrere Verkehrsteilnehmer sichtbar sind, wird der Schwerpunkt in dieser Studie auf den kooperativen Einsatz dieser Fahrerassistenz gesetzt. Für den kooperativen Kontext wurde das Einfädelszenario auf einer Autobahn ausgewählt, da es neben einem Unfallschwerpunkt eine mehrspurige Situation darstellt, welche sich zum Kommunikationsaustausch eignet. Daher unterstützen andere Fahrzeuge im Straßenverkehr die sich einfädelnde Person durch Lichtprojektionen.

2. Fahrsimulatorstudie

Ziel dieser Untersuchung ist, eine anerkannte Form von Lichtfunktionen [3] im kooperativen Kontext hinsichtlich der Wirkung auf das Fahrverhalten sowie des subjektiven Verständnisses zu untersuchen. Folgende Forschungsfrage soll beantwortet werden:

- Wie kann die längsführende Lichtfunktion als Fahrmanöverunterstützung in kooperativen Szenarien eingesetzt werden?

Dafür wurden verschiedene Einfädelszenarien vorbereitet, in denen die Versuchsperson sich entweder einfädeln musste oder die Einfädelung eines anderen Fahrzeugs miterlebte. Es erschien immer ein zweites Fahrzeug, welches je nach Szenario eine Lichtfunktion auf die Straße projizierte. Dieses Fahrzeug ist im Folgenden mit dem Begriff „Lichtfahrzeug“ gekennzeichnet. Die Versuchsperson fuhr ein Auto ohne Fahrerassistenz.

In zwei Szenarien (Szenario der Bremsung und Szenario der Warnung) hatte der Proband die Aufgabe, sich einzufädeln. Dabei näherte sich jeweils auf der rechten Spur der Autobahn das Lichtfahrzeug an, während die Versuchsperson den Beschleunigungsstreifen befuhr. Im Szenario der Bremsung verzögerte das Lichtfahrzeug, um dem Probanden die Einfädelung zu ermöglichen. Im gleichen Moment projizierte das Lichtfahrzeug Gräten auf die Fahrbahn, welche sich im Blickfeld der Versuchsperson befanden. Im Szenario der Bremsung wird zwischen zwei unterschiedlichen Lichtprojektionen unterschieden: In der ersten Variante stellte die Lichtfunktion eine reine Informationsweitergabe des für den Einfädelnden nicht sichtbaren Bremslichtes dar. Dabei liefen Gräten auf das Lichtfahrzeug dynamisch zu, die Pfeile zeigten ebenfalls auf das projizierende Fahrzeug (Bild 1a). In der zweiten Variante kommunizierten die

Gräten eine Handlungsaufforderung zum Einfädeln. Dabei liefen die projizierten Pfeile nun von rechts nach links zur Fahrspur der Autobahn (Bild 1b).

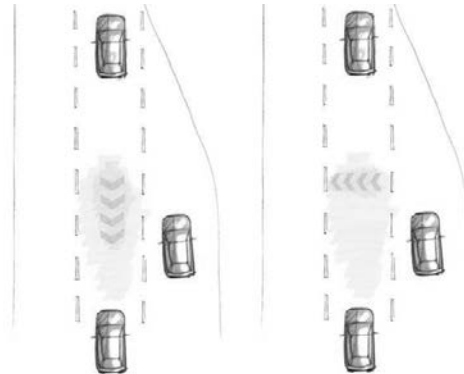


Bild 1: Szenario der Bremsung. A: Reine Bremsinformation. B: Handlungsaufforderung.

Im Szenario der Warnung bremste das Lichtfahrzeug nicht ab, sondern behielt seine Geschwindigkeit bei. Ein gefahrenloses Einfädeln war somit nicht möglich. Zur Warnung projizierte das Lichtfahrzeug nach vorne laufende und zeigende Gräten, um den Probanden über seine Anwesenheit in Kenntnis zu setzen (Bild 2).

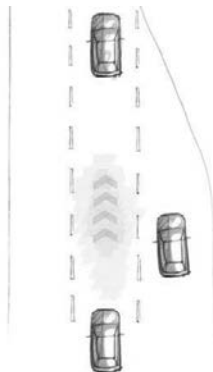


Bild 2: Szenario der Warnung.

In dem dritten Szenario, dem der Information, fuhr der Proband auf der Autobahn und beobachtete bei Annäherung des Beschleunigungsstreifens die Einfädelung des Lichtfahrzeugs. Dieses projizierte kurz vor dem Einfädelmanöver mehrere Gräten in geschlängelter, dynamischer Form, welche die Fahrtrichtung des Lichtfahrzeugs andeuteten (Bild 3).

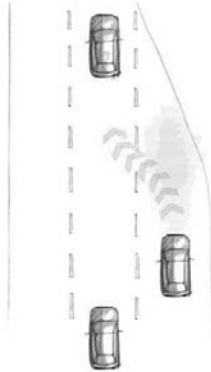


Bild 3: Szenario der Information.

Jedes Szenario wurde ebenfalls ohne eine Projektion des Lichtfahrzeugs mit einfachem Abblendlicht durchfahren. Es ergaben sich somit drei Teilstudien mit der unabhängigen Variable *Fahrerinformation* mit jeweils einfaktoriellen Versuchsplänen samt drei (Bremsung) beziehungsweise zwei (Warnung und Information) Faktorstufen. Jeder Proband durchfuhr alle Szenarien.

In allen Szenarien wurden Fahrdaten sowie subjektive Daten (Fragebögen zur Demografie und Bewertung der Lichtfunktion) als auch teilstandardisierte Interviews als abhängige Variablen erhoben. Bzgl. des Fahrverhaltens wurde die Dauer bis zum Einfädelmanöver sowie der Abstand zum sich annähernden Lichtfahrzeug beim Spurwechsel erfasst. Der Fragebogen zur subjektiven Bewertung fragte ab, inwiefern die Lichtfunktionen als *verständlich*, *hilfreich*, *störend*, *ablenkend*, *beim Fahren unterstützend*, *angenehm* und *nervig* empfunden wurden. Die teilstandardisierten Interviews erhoben erlebte Auffälligkeiten während der Fahrt, die verstandene Intention jeder Lichtfunktion sowie die wahrgenommene Auswirkung auf das Fahrverhalten. Zur Beantwortung jedes subjektiven Items diente eine fünfzehnstufige Skala in Anlehnung an [4] von „lehne stark ab“ bis „stimme stark zu“.

Die Untersuchung wurde in einem statischen Fahrsimulator in einem abgedunkelten Raum realisiert, um eine Nachtfahrt darzustellen. Als Fahrzeuersatz diente eine Sitzkiste mit Pedalerie und Lenkrad. Ein Rück- und zwei Seitenspiegel wurden mithilfe von Displays geschaffen. Die Nachtfahrten auf einem Autobahnrundkurs mit Auffahrten wurden durch die Simulationssoftware Virtual Test Drive realisiert. Die Abblendlichtverteilung sowie die Lichtfunktionen wurden in der Entwicklungssoftware ADTF programmiert.

Insgesamt nahmen $N=57$ Probanden an der Untersuchung teil, von denen alle Datensätze ausgewertet werden konnten. Der Altersdurchschnitt lag bei $M=37.2$ Jahren ($SD=12.1$). Es nahmen $n=20$ Frauen und $n=37$ Männer an der Studie teil. Im Mittel besaßen die Probanden seit $M=18.8$ Jahren ($SD=11.4$) den Führerschein und zeigten einen normalen Relativanteil an zurückgelegter Fahrleistung bei Dunkelheit: 90% der Probanden legen bis zu 40% ihrer jährlichen Fahrleistung bei Dunkelheit zurück. Die Anstrengung bei Dunkelheit zu fahren sowie die Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen lagen jeweils im mittleren Bereich ($M_{AbD}=7.2$, $M_{EmF}=8.9$).

3. Ergebnisse

Fahrdaten – Szenario der Bremsung

Hinsichtlich des Fahrverhaltens wird zuerst die Dauer (in s) bis zum Einschermanöver ausgewertet. Es zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt ($F(2,106)=5.3$, $p<0.05$). Im paarweisen Vergleich wird ersichtlich, dass die Dauer bis zum Einschermanöver mit der Lichtfunktion der Handlungsaufforderung ($M=5.5$, $SD=1.6$) signifikant kürzer ausfällt als bei der reinen Informationsdarbietung ($M=6.4$, $SD=2$, $p<0.05$). Der Vergleich zur Kontrollgruppe ergibt, dass die Dauer bei der Handlungsaufforderung mit Tendenz ($p=0.054$) signifikant kürzer ist als ohne Lichtfunktion ($M=6.2$, $SD=2$). Bild 4 zeigt die Unterschiede in einem Liniendiagramm mit Standardfehler.

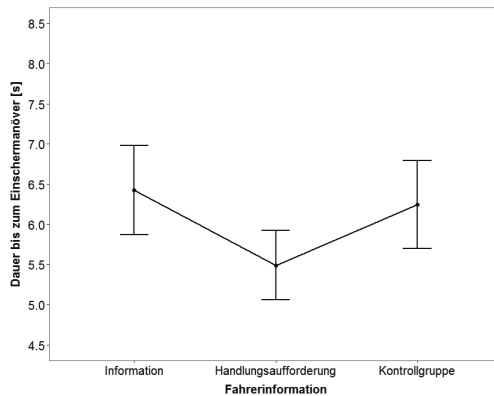


Bild 4: Szenario Bremsung. Dauer bis zum Einschermanöver.

Bezüglich des Abstands (in m) zum Lichtfahrzeug beim Spurwechsel wird ein weiterer Haupteffekt gefunden ($F(2,106)=8.8$, $p<0.001$). Der paarweise Vergleich stellt einen signifikant kürzeren Abstand zum Lichtfahrzeug bei der Handlungsaufforderung ($M=-91.1$, $SD=12.2$) als bei der reinen Information ($M=-100.7$, $SD=18$, $p=0.001$) dar. Im Vergleich zur Kontrollgruppe ist der Abstand der Handlungsaufforderung ebenfalls signifikant kürzer als ohne Lichtfunktion ($M=-100.8$, $SD=21.8$, $p=0.004$). Bild 5 visualisiert die Ergebnisse grafisch.

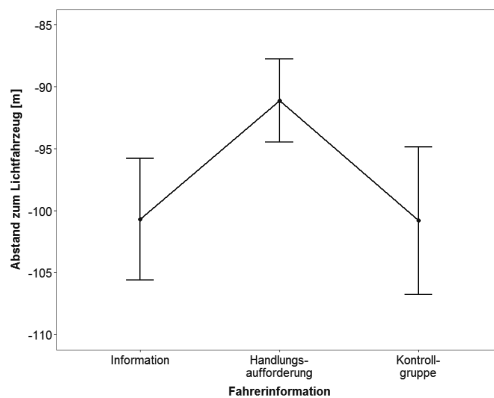


Bild 5: Szenario Bremsung. Abstand zum Lichtfahrzeug beim Spurwechsel.

Fahrdaten – Szenario der Warnung

Hinsichtlich des Abstands zum Lichtfahrzeug wird ein signifikanter Unterschied zwischen der Versuchsfahrt mit Lichtfunktion und der Kontrollfahrt ohne Lichtfunktion gefunden ($t(49)=3.1$; $p<0.05$). Warnt das Lichtfahrzeug den Probanden mithilfe der Grätenprojektion, ist der Abstand zwischen ihm und dem einfädelnden Fahrzeug beim Spurwechsel signifikant größer ($M=48.8$, $SD=12.6$) als wenn keine Lichtfunktion erscheint ($M=41.1$, $SD=14.6$). Bild 6 stellt die Ergebnisse in einem Liniendiagramm mit Standardfehler dar.

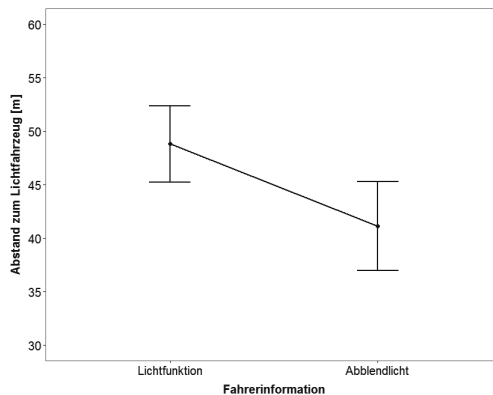


Bild 6: Szenario der Warnung. Abstand zum Lichtfahrzeug beim Spurwechsel.

Die Dauer bis zum Einschermanöver zeigt dagegen keinen signifikanten Unterschied zwischen der Versuchsfahrt und der Kontrollfahrt ($t(49)=-1.5$, $p>0.05$).

Da im Szenario der Information keine Einfädelung vom Probanden vorgenommen wird, sondern dieser lediglich das Umfeld von der Autobahn aus beobachtet, werden hier keine Fahrdaten ausgewertet.

Für die Auswertung der subjektiven Bewertung werden alle vier Lichtfunktionen der drei Szenarien (Szenario der Bremsung (Information und Handlungsaufforderung), Szenario der Warnung, Szenario der Information) miteinander verglichen. Dafür werden nach Berechnung eines ausreichenden Cronbachs Alphas [5] ($\alpha=.940$) Gesamtmittelwerte pro Szenario gebildet.

Eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung deckt einen Haupteffekt auf ($F(3,129)=10$, $p<0.001$). Die paarweisen Vergleiche zeigen, dass die Lichtfunktion der Warnung ($M=10.4$, $SD=2.4$) signifikant besser bewertet wird als die Lichtfunktion der reinen Infor-

mation zum Bremsen ($M=9$, $SD=2.6$, $p<0.05$). Zudem wird das Szenario der Information des Einfädelns ($M=11.3$, $SD=2.1$) mit höheren Werten beurteilt als beide Lichtfunktionen im Szenario der Bremsung ($M_{Ha}=9.5$, $SD_{Ha}=2.5$, $p_{In}<0.001$, $p_{Ha}=0.001$). Bild 7 stellt die Gesamtmittelwerte der verschiedenen Szenarien grafisch dar.

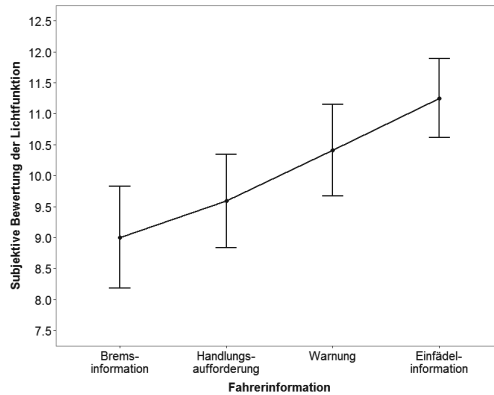


Bild 7: Subjektive Bewertung der verschiedenen Lichtfunktionen.

Die Aussagen der teilstandardisierten Interviews zusammengefasst, kann festgehalten werden, dass die Lichtfunktion im Szenario der reinen Bremsinformation die Probanden stark irritiert. Die Gräten werden teilweise verdreht wahrgenommen und stören die Probanden während des Einfädelmanövers. Bezüglich der Handlungsaufforderung ist die Mehrzahl der Nennungen von positivem Charakter. Die Intention wird korrekt identifiziert und eine Unterstützung beim Einscheren wahrgenommen. Fast alle Probanden (91%) nehmen die Lichtfunktion als eine Fahrerassistenz des eigenen Fahrzeugs wahr. Hinsichtlich des Szenarios der Warnung wird die Lichtfunktion richtig verstanden und als Hinweis auf den nachkommenden Verkehr interpretiert. Die Lichtfunktion zur Information des Einfädelns wird als verständlich eingestuft. Allerdings häufen sich die Meinungen, dass diese Information im Alleingang überflüssig sei. Eine Kombination mit der Handlungsaufforderung wird als mögliche Erweiterung genannt.

4. Diskussion und Ausblick

Die beschriebene Untersuchung hat zum Ziel zu erfassen, wie die Lichtfunktion in Form der Gräten als Fahrmanöverunterstützung in kooperativen Szenarien genutzt werden kann.

Angefangen mit dem Fahrverhalten, kann im Szenario der Bremsung die positive Wirkung der Handlungsaufforderung hervorgehoben werden. Die Dauer bis zum Einschermanöver wird im Vergleich zur reinen Bremsinformation sowie zur Kontrollgruppe um eine knappe Sekunde verkürzt. Auch beim Abstand unterstützt die Handlungsaufforderung positiv. Der Fahrer zeigt beim Spurwechsel einen kürzeren Abstand zum Lichtfahrzeug, welcher weiterhin im vertretbaren Rahmen bzgl. der Fahrzeugsicherheit liegt. Liegt ein hohes Verkehrsaufkommen auf der Autobahn vor, könnte diese Verhaltensänderung beispielsweise zu einer geringeren Störung im Verkehrsfluss führen. Im Szenario der Warnung wird ebenfalls eine Wirkung auf das Fahrverhalten entdeckt: Im Gegensatz zur Handlungsaufforderung zeigen die Fahrer hier bei der Grätenprojektion einen signifikant größeren Abstand zum Lichtfahrzeug beim Spurwechsel als bei reinem Abblendlicht. Die Lichtfunktion warnt die Fahrer dementsprechend erfolgreich und alarmiert die Versuchspersonen zur Vorsicht.

Hinsichtlich der subjektiven Bewertung fällt der Unterschied zwischen der reinen Bremsinformation und dem Szenario der Warnung auf. Während die vom Lichtfahrzeug weglauenden Gräten als Alarmierung von den Probanden verstanden werden, stören die auf das Fahrzeug zulaufenden Gräten die Fahrer. Anhand der Wahrnehmung durch die Seitenspiegel verdrehen viele Probanden die Richtung der Gräten im Kopf und lassen sich somit irritieren. Die Intention der Lichtfunktion wird dadurch missverstanden und führt zu einem negativen Einfluss auf das Fahrverhalten. Der signifikante Unterschied in der subjektiven Bewertung zwischen den beiden Varianten der Bremsung und dem Szenario der Information wird auf die unterschiedlichen Aufgaben und Handlungsabläufe zurückgeführt. Während die Varianten der Bremsung einen hohen, kognitiven Aufwand erforderten, waren die Probanden beim Szenario der Information lediglich zum Beobachten des Umfelds aufgefordert. Da die Vergleichbarkeit dadurch erschwert ist, wird dieser Unterschied nicht überinterpretiert. Dass kein signifikanter Unterschied zwischen der Handlungsaufforderung und dem Szenario der Warnung gefunden wird, spiegelt sich in den Aussagen der teilstandardisierten Interviews wider. Beide Funktionen werden subjektiv verstanden und als nützlich empfunden. Nennungen der Interviews verdeutlichen zudem den Vorsprung der Handlungsaufforderung gegenüber der reinen Bremsinformation. Die geteilte Wahrnehmung der Bremsinformation auf der Straße und im Seitenspiegel verunsichert die Probanden, während die klare Handlungsaufforderung im Blickfeld auf der Straße intuitiv verständlich ist und die Probanden unterstützt. Dass viele die Lichtfunktion dem eigenen Fahrzeug zuordnen, wird an dem geringen Abstand zum Ego-Fahrzeug und der damit fehlenden Verbindung zum Lichtfahrzeug liegen. Die warnende Lichtfunktion wird von der Mehrheit der Probanden als verständliche, informative Lichtfunktion wahrgenommen und in ein vorsichtigeres Fahrverhalten umgesetzt. Die Information des einfädelnden Fahrzeugs ist

eine weitere, verständliche Lichtfunktion. Dennoch wünschen die Probanden hier die Kombination mit der Handlungsaufforderung, um dem Fahrer das Einfädeln zu erleichtern und den nachkommenden Verkehr über den geplanten Spurwechsel zu informieren.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die reine Bremsinformation in der hier genutzten Ausprägung aufgrund ihres häufigen Missverständnisses nicht in kooperativen Szenarien genutzt werden sollte. Die Handlungsaufforderung stellt dagegen eine positive Variante dar und eignet sich zur Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern. Die warnende Lichtfunktion wird von der Mehrheit als hilfreiche, informative Lichtfunktion verstanden und veranlasst zu einem vorsichtigeren Fahren. Die Information des einfädelnden Fahrzeugs mithilfe der geschlängelten Gräten wird ebenfalls verstanden und als Unterstreichung des Blinkers gesehen, allerdings nur in Kombination mit der Handlungsaufforderung als notwendig anerkannt.

Zukünftig sollte basierend auf den Ergebnissen eine konkrete Lichtfunktion zur Spurwechselunterstützung ausgearbeitet werden. Es kann festgehalten werden, dass eine Fahrerassistenz im eigenen Fahrzeug gewünscht ist, welche den Fahrer beim Einfädeln unterstützt und gleichzeitig eine Information für den nachkommenden Verkehr aufgrund ihrer allgegenwärtigen Sichtbarkeit darstellt.

5. Literaturangaben

- [1] GIDAS: German In-Depth Accident Study, unter: <http://www.vufo.de/forschung-und-entwicklung/gidas/> (abgerufen am: 21.07.2014)
- [2] Schlag, B., Petermann, I., Weller, G. u. Schulze, C.: Mehr Licht - mehr Sicht - mehr Sicherheit? Zur Wirkung verbesserter Licht- und Sichtbedingungen auf das Fahrverhalten. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2009
- [3] Krahnstöver, A., Thomschke, S., Koether, G. u. Vollrath, M.: Licht führt!? – Beeinflussung von Fahrer und Verkehrsteilnehmern durch lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme. Braunschweig: VDI Tagung „Der Fahrer im 21. Jahrhundert“, 10.-11.11.2015
- [4] Heller, O.: Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorieunterteilung (KU). In: Psychologische Beiträge 27 (1985), S. 509–519
- [5] Kline, R.: Principles and Practice of Structural Equation Modeling. New York: The Guilford Press 2011

Optische Eigenschaften eines RGB-Laserprojektionsmoduls für den Verkehrsraum

Dipl.-Ing. **G. Kloppenburg**, Dipl.-Ing. **A. Wolf**,
Prof. Dr.-Ing. **R. Lachmayer**,
Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und
Gerätebau;
Dipl.-Ing. **J. Roth**, Leibniz Universität Hannover,
Institut für Dynamik und Schwingungen

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein scannendes Laserprojektionssystem vorgestellt, welches auf drei Laserdioden basiert und der RGB-Projektion in das erweiterte Fahrzeugvorfeld dient. Die projizierten Informationen wie Navigationshinweise oder Warnungen können sowohl monochromatisch als auch durch die überlagerte Emission der Dioden in Weiß oder anderen Mischfarben dargestellt werden. Durch den Einsatz von Laserprojektion ist dabei eine scharfe Abbildung auf der Straße unabhängig von deren Oberflächentopologie möglich. Durch die temperaturabhängige Emissionsleistung der Dioden ist der erzeugte Farbtort des kombinierten Lichts abhängig von den Betriebs- und Umgebungsbedingungen der Dioden. Diese Einflüsse werden in der vorliegenden Arbeit diskutiert, ebenso die bei Lasern systembedingt auftretenden Speckles. Außerdem wird abgeschätzt, bis zu welcher Umgebungshelligkeit das vorgestellte System Symbole bzw. Text mit ausreichendem Kontrast projizieren kann.

Abstract

In this paper we present a scanning system for the RGB-projection of relevant information onto the road in the driver's field of view. Based on laser diodes, the system can project monochromatic light offering a good color contrast as well as mixed light, e.g. white. Due to the laser based projection the influence of the road topology on the sharpness of the projected image is negligible.

The color of the mixed light is strongly influenced by the diodes' temperatures. This fact and the generation of speckles will be discussed. We give an approximation of the maximum environment illuminance that still allows the recognition of the projected symbol or text.

1. Einleitung

Die Entwicklung hochauflösender Scheinwerfer mit hoher Lichtstärke steht seit einigen Jahren im Fokus der Automobilbeleuchtung. Zur Realisierung von Scheinwerfern mit hoher Lichtstärke und kleinem Bauraum kommen aktuell neben den bereits weit entwickelten LEDs auch die verhältnismäßig neuen Laserdioden als Lichtquelle ins Spiel. Erste Serienanwendungen von Lasern in der Fahrzeugbeleuchtung setzen auf statische Systeme, die über einen laserangeregten Leuchtstoff eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke und damit eine Vergrößerung der Leuchtweite von Fahrzeugen erzielen sollen [1 - 4].

Neben der Entwicklung von Scheinwerfersystemen zur optimierten Ausleuchtung des Verkehrsraumes stehen zunehmend auch Scheinwerfermodule zur Bereitstellung von lichtbasierten Fahrerassistenzfunktionen im Fokus der Entwicklung. Durch die Informationsprojektion in einem Bereich von etwa 10 – 25 m vor dem Fahrzeug ergibt sich eine Vielzahl von Möglichkeiten, den Fahrer zu unterstützen. So können beispielsweise Navigationsinformationen und Warnungen direkt in das Blickfeld des Fahrers projiziert werden, ohne dass dieser den Blick von der Straße abwenden muss. Bei aktuellen Systemen werden die Daten größtenteils im Armaturenbrett oder im Entertainmentsystem angezeigt, die neben der Abwendung des Blickes auch eine Adaption des Auges an die veränderte Sehentfernung erfordert. Als Verbesserung dazu können die vermehrt eingesetzten Head-Up-Displays gesehen werden, bei denen Informationen auf kleinen Scheiben vor dem Fahrer oder direkt in die Windschutzscheibe projiziert werden. Solange die dort angezeigten Daten nur knapp über der Motorhaube dargestellt werden, ist allerdings auch hier eine Neufokussierung der Augen notwendig. Bei der Informationsprojektion direkt auf die Straße entfallen diese Nachteile. Außerdem kann eine sogenannte „kontaktanaloge“ Darstellungsweise mit geringem Aufwand erreicht werden. Dabei werden die angezeigten Daten dynamisch an die Umgebung angepasst, so dass beispielsweise die zu verwendende Fahrspur oder Abzweigung direkt markiert wird. Laser eignen sich aufgrund ihrer hohen Energiedichte besonders gut für den Einsatz in dynamischen Anzeigesystemen. Durch die hohen Beleuchtungsstärken, die mit Lasern möglich sind, lassen sich hohe Kontraste zwischen projizierter Information und Umgebungslicht erzeugen.

2. Technologie scannender Systeme

Grundsätzlich lassen sich Mikros Scanner in ihren Antriebsmechanismen unterscheiden. Die durch den Antriebsmechanismus erzeugte Kraft führt zu einer Auslenkung der jeweiligen Scannerachse. Am häufigsten ist bei Mikros Scannern die Krafterzeugung durch elektrostatische und elektrodynamische Antriebsmechanismen vorzufinden. Bei elektrostatischen

Mikroscannern sind Rotor und Stator meist als Fingerelektroden ausgeführt und ermöglichen lediglich ein Anziehen dieser, so dass der Spiegel durch Anlegen einer Spannung in seine Ursprungslage gezogen werden kann. Elektrostatische Mikroscanner werden deshalb häufig resonant mit einer Rechteckspannung betrieben. Um den Mikrospiegel in eine Schwingung zu versetzen ist ein bestimmter Anfahrzyklus notwendig. Beginnend von hohen Frequenzen werden diese verringert, bis der Spiegel nahe seiner Resonanzfrequenz betrieben wird. Pro Spiegelschwingperiode ergeben sich zwei Perioden des Ansteuersignals. Ein elektrostatischer Mikrospiegel wird deshalb mit der doppelten Schwingfrequenz betrieben. Eine definierte Positionierung des Spiegels oder ein beliebiges Bewegungssignal kann mit einem solchen Mikroscanner nicht umgesetzt werden, da diese typischerweise resonant betrieben werden und somit näherungsweise eine Sinusschwingung ausführen. Auch bei elektrostatisch angetriebenen Mikroscannern gibt es Ansätze, die Elektroden des Stators unter die Elektroden des Rotors zu positionieren, so dass eine beliebige Winkelauslenkung durch Anpassung der Spannung ermöglicht wird.

Bei elektrodynamischen Mikrospiegeln erfolgt die Krafterzeugung durch einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld. Das Magnetfeld wird dabei durch einen Permanentmagneten unter dem Mikrospiegel erzeugt. Beim Anlegen einer Spannung fließt ein Strom durch die auf dem Mikrospiegel verlaufenden Leiterbahnen. Entsprechend der Lorentzkraft wirkt auf diesen Leiter eine Kraft, die vereinfacht abhängig von der magnetischen Flussdichte, der Stromstärke und dem Winkel zwischen diesen Größen sowie der Leiterlänge ist. Nach diesem Antriebsprinzip lassen sich die Achsen auch mit beliebigen Signalen, etwa einem Sägezahn, betreiben. Ebenfalls ist der resonante Betrieb mit elektrodynamischen Mikroscannern möglich.

Zur Erzeugung eines Bildes muss der einfallende Laserstrahl in zwei Raumrichtungen abgelenkt werden. Dies lässt sich entweder durch zwei hintereinander geschaltete 1D Mikrospiegel oder durch einen kardanisch aufgehängten 2D Mikrospiegel realisieren. Je nach Betriebsart der jeweiligen Achsen ergeben sich drei grundsätzliche Betriebsmöglichkeiten:

Scanner resonant-resonant: Werden beide Achsen des Mikrospiegels resonant betrieben, ergibt sich in der Projektion aufgrund der überlagerten Sinusbewegungen eine Lissajous-Figur, die je nach Frequenzverhältnis beeinflusst werden kann. Dies hat den Vorteil, dass große Winkelumplituden bei geringen Spannungen ermöglicht werden. Die Bildpunkte werden bei diesem Verfahren nicht nacheinander gescannt.

Scanner quasistatisch-resonant: Eine weitere Möglichkeit ist der quasistatische Betrieb einer Achse und der resonante Betrieb der anderen Achse. Typischerweise wird bei der Bildprojektion ein Sägezahnprofil auf der vertikalen Achse realisiert, so dass ein linearer,

vertikaler Geschwindigkeitsverlauf entsteht. Die resonante Achse führt eine Sinusbewegung aus, so dass sich eine Trajektorie ergibt, die zum Zeilenscanning verwendet werden kann. Die Bildinformation kann sowohl unidirektional als auch bidirektional projiziert werden. Bei der unidirektionalen Projektion ergeben sich gleiche Abstände der Bildpunkte. Bei der bidirektionalen Darstellung kommt es zu einer Pixelverdichtung zu den Rändern. Jedoch ermöglicht ein bidirektionales Verfahren, mehr Licht in die Projektion zu strahlen.

Scanner quasistatisch-quasistatisch: Ein Verfahren, was hauptsächlich zur Darstellung von Vektorgrafiken bzw. Grafikumrissen genutzt werden kann, wird durch den quasistatischen Betrieb auf beiden Achsen erreicht. Hierbei werden nacheinander Punkte einer Gesamtfigur abgefahren, so dass sich die Umrisse dieser als Projektion ergeben. Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass sich – im Gegensatz zu den vorher genannten Verfahren – keine Flächen ausleuchten lassen. Jedoch wird die verfügbare Leistung auf eine kleinere Fläche verteilt, so dass sich höhere Beleuchtungsstärken und damit ein besserer Kontrast zu einer vorhandenen Untergrundbeleuchtung ergeben.

3. Demonstratoraufbau

Wie in den vorausgegangenen Abschnitten dargestellt, lässt sich durch den Einsatz eines schnell bewegten Spiegels in Kombination mit verschiedenfarbigen Laserdioden ein vielseitig einsetzbares, dynamisches Projektionssystem aufbauen. Um gleichzeitig hohe Auflösungen und Kontraste bei einer variablen Farbdarstellung zu ermöglichen, ist die Wahl eines geeigneten Ansteuerungskonzepts notwendig. Umso kleiner der strahlablekende MEMS-Spiegel (Microelectromechanical system) ist, desto hochfrequenter kann er angesteuert werden. Gleichzeitig sind hohe Auflösungen sowie hohe Bildwiederholraten möglich. Dies beschränkt die Auswahl möglicher Lichtquellen, da das abgestrahlte Licht so auf die Spiegelfläche fokussiert werden muss, dass es den Spiegel mit einem durch die Pixelgröße definierten Divergenzwinkel verlässt. Als Lichtquellen kommen als Kantenemitter ausgeführte Laserdioden zum Einsatz, die mit ihrer gegenüber LEDs sehr kleinen Emissionsfläche ein sehr kleines Étendue und damit hervorragende Eigenschaften zur Strahlformung und -lenkung besitzen.

In dem hier vorgestellten Prototypenaufbau (Bild 1) wird die Emission drei verschiedenfarbiger Laserdioden überlagert und anschließend mit einem Mikrospiegel abgelenkt. Die verwendeten Dioden strahlen bis zu 1,6 W blau (450 nm), 150 mW grün (520 nm) und 500 mW rot (638 nm) ab [5 - 7]. Für den gewählten Einsatzzweck eines quasistatisch-resonant betriebenen Mikrospiegels müssen sehr hohe Schaltfrequenzen für die einzelnen Dioden realisierbar sein, um eine hohe Bildwiederholrate bei angemessener Auflösung erreichen zu

können. Die verwendeten Treiber ermöglichen Schaltfrequenzen von etwa 10 MHz pro Diode.

Um die von den Dioden emittierten Laserstrahlen zusammen mit dem Mikrospiegel verwenden zu können, ist ein optischer Aufbau zur Strahlformung und –kombination erforderlich. Die Abstrahlcharakteristik einer Laserdiode lässt sich mit zwei Winkeln θ_{\parallel} und θ_{\perp} beschreiben, die ohne weitere optische Elemente zu einem rechteckigen Emissionsbild führen. Die Winkel unterscheiden sich je nach Diodentyp. Für jeden der drei Strahlengänge werden individuell angeordnete optische Bauteile eingesetzt, um ein gleichmäßig beleuchtetes Pixel zu erzeugen. Allen eingesetzten Kantenemittern ist gemein, dass der Öffnungswinkel in einer Richtung deutlich kleiner ist als in der anderen Richtung. Typische Werte für die eingesetzten Dioden sind beispielsweise $\theta_{\parallel} = 6 - 7^{\circ}$ und $\theta_{\perp} = 20 - 40^{\circ}$ (FWHM, Öffnungswinkel bis zur Hälfte der Maximalleistung) [8].

Für die Kombination der verschiedenfarbigen Strahlen werden im Aufbau dichroitische Spiegel verwendet. Diese verfügen über eine teildurchlässige Beschichtung, die bestimmte Wellenlängenbereiche reflektiert, während sie für andere durchlässig ist. Für die Strahlkombination der drei eingesetzten Laser sind zwei dichroitische Spiegel notwendig. Aufgrund der großen Öffnungswinkel der Dioden wird das emittierte Licht kurz hinter der Lichtaustrittsfläche mit Primärlinsen gesammelt, die zur Kollimation der Strahlen eingesetzt werden können. Für den Aufbau als Scanner sollen jedoch Pixel mit einer gewissen Größe erzeugt werden. Erreicht wird dies durch Kombination der einzelnen Primäropitken mit einer weiteren Linse.

Hinter dem Spiegel soll der Strahl über einen in beiden Richtungen ähnlichen Divergenzwinkel verfügen, der die Pixelgröße in einem bestimmten Abstand definiert. Hierzu wird der Laserstrahl zunächst auf den Mikrospiegel fokussiert um sich anschließend mit dem geforderten Winkel aufzuweiten. Mit zunehmender Entfernung vom Lichtaustritt des Scanners vergrößert sich also auch der Laserpunkt.

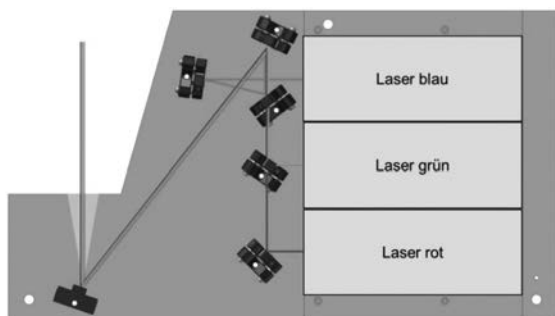


Bild 1: Aufbau des optischen Systems mit Strahlkombination

Ziel des Aufbaus ist eine Pixelgröße von $50 \times 50 \text{ mm}^2$ auf einer angestrahlten Wand in 10 m Entfernung vom Scanner. Um dies zu erreichen muss der kombinierte Strahl einen Öffnungswinkel (zur optischen Achse) von $0,14^\circ$ besitzen. Hierzu wird die Länge der drei optischen Pfade auf die Abstrahlcharakteristik der jeweiligen Diode angepasst (Bild 1). Die Strahlenlenkung erfolgt entweder über die bereits beschriebenen dichroitischen Spiegel oder über breitbandig reflektierende Spiegel, die jeweils in zwei Achsen eingestellt werden können und somit zwei Freiheitsgrade für die Strahlpositionierung liefern. Für die Überlagerung der drei Strahlen sind insgesamt acht Freiheitsgrade notwendig. Um bestmögliche Ergebnisse für die Darstellung weißer Farben zu erzeugen, muss die Effizienz des grünen und roten Strahlengangs maximal sein, da die blaue Diode im Verhältnis dazu immer genügend Leistung zur Verfügung stellen kann. Aus diesem Grund wird die in Bild 1 dargestellte Anordnung gewählt. Insgesamt werden vier Spiegel für die Strahlkombination und ein weiterer für die Positionierung des kombinierten Strahls auf dem Mikrospiegel verwendet, so dass das Gesamtsystem über zehn Freiheitsgrade verfügt.

Besondere Beachtung muss dem Thema Augensicherheit gewidmet werden, da das Scannermodul Laserstrahlung direkt in den Verkehrsraum emittiert. Durch den definierten Divergenzwinkel des abgestrahlten Lichts nimmt die erzeugte Bestrahlungsstärke quadratisch mit der Entfernung ab. Demzufolge ist das System ab einer von der emittierten Leistung abhängigen Entfernung augensicher. Dadurch, dass sich der Laserstrahl in dem scannenden System permanent bewegt, ist der zeitgemittelte Energieeintrag sehr gering. Zur Sicherstellung der Augensicherheit müssen jedoch weitere Konzepte eingesetzt werden. So sollte das System erst ab einer gewissen Fahrzeuggeschwindigkeit aktiviert werden können. Hier ist eine Kopplung mit der automatischen Türverriegelung denkbar. In Verbindung mit der Fahrzeugkamera und deren Personen- und Situationserkennung lassen sich Notauskriterien definieren, so dass der Scanner automatisch deaktiviert wird, wenn sich Lebewesen im gefährdeten Bereich befinden oder die Situation unvorhersehbare Risiken birgt, beispielsweise Reflektionen an Pfützen. Da Nickbewegungen des Fahrzeugs den Abstrahlwinkel des Scanners verändern, sollte das System so hoch wie möglich am Fahrzeug montiert werden [9].

4. Ergebnisse

Die Emission von Laserdioden ist stark von deren Betriebstemperatur abhängig. Einerseits ändert sich die abgestrahlte Wellenlänge, andererseits auch die optische Ausgangsleistung. Für den Einsatz im Kraftfahrzeug kann die Umgebungstemperatur der Dioden nicht als

konstant angenommen werden, da sich die Dioden sowohl durch ihre Verlustleistung selbst erwärmen als auch starken klimatischen Umgebungseinflüssen ausgesetzt sind.

In Bild 2 ist der mit den Dioden darstellbare Farbraum als Dreieck in eine CIE-Normfarbtafel eingetragen, ebenso der von der ECE als weiß zugelassene Bereich für Fahrzeugscheinwerfer. Die drei dargestellten Kurven, auf denen sich der emittierte Farbort verschiebt, basieren auf den Annahmen dass die Temperatur aller Dioden gleich ist und der Wirkungsgrad des optischen Systems 50 % für die blaue Diode, 52 % für die grüne und 35 % für die rote beträgt, unabhängig von der emittierten Leistung der Dioden und deren Temperatur. In der Praxis ändert sich das Strahlprofil der Laserdioden in Abhängigkeit von Betriebsstrom und Temperatur, was hier vernachlässigt wird. Außerdem wird angenommen, dass sich die Emissionswellenlänge im betrachteten Temperaturbereich von 20 °C bis 30 °C kaum ändert. Die ausgefüllten Punkte in Bild 2 markieren den bei 20 °C abgestrahlten Farbort und die Kreise den bei 30 °C. Der Wirkungsgrad aller drei Dioden sinkt mit steigender Temperatur (vergleiche Bild 3). Die Emission der grünen Diode ist bei allen betrachteten Betriebsströmen nur geringfügig von der Temperatur des Diodengehäuses abhängig.

Gleiches gilt für die blaue Diode, wenn sie deutlich oberhalb der Laserschwelle betrieben wird. Bei einem Strom von 180 mA hingegen ist eine starke Abhängigkeit der abgestrahlten Leistung von der Betriebstemperatur zu erkennen. Die rote Diode ist stärker von der Temperatur abhängig als die beiden anderen, vor allem bei niedrigen Betriebsströmen. Ein Betrieb der roten Diode oberhalb vom 30 °C Gehäusetemperatur soll vermieden werden [7].

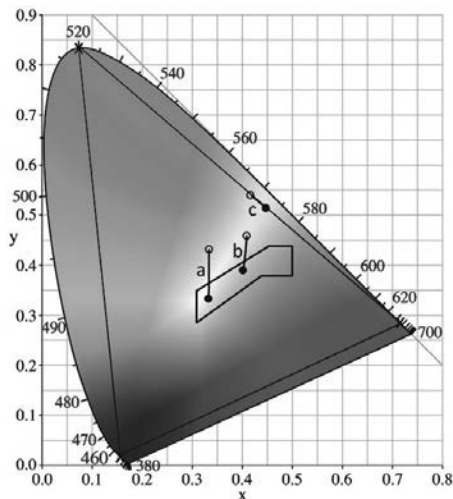


Bild 2: Temperaturabhängige Änderung des Farborts des emittierten Lichts

Folgende drei Zustände sind in Bild 2 dargestellt, wobei der zu erzeugende Farbort bei 20 °C Diodentemperatur ermittelt wird:

- a) ECE-konformes Weiß mit hoher Farbtemperatur (5485 K) und reduzierter Ausgangsleistung des Systems (rot 365 mA, grün 183 mA, blau 180 mA). Die Werte der blauen Diode entsprechen den Messwerten aus Bild 3, die Werte der anderen werden linear interpoliert. Die blaue Diode wird nahe ihrer Laserschwelle betrieben, so dass ihre Ausgangsleistung stark temperaturabhängig ist. Auch die Emission der roten Diode nimmt mit steigender Temperatur deutlich ab. Da die grüne Diode eine geringere Temperaturabhängigkeit zeigt, verschiebt sich der Farbort mit steigender Temperatur in Richtung steigender y-Werte und liegt bei 30 °C deutlich außerhalb des ECE-Weißraums. Eine Erhöhung der Ausgangsleistung würde den emittierten Farbort stabilisieren, da die Temperaturabhängigkeit der blauen Diode bei höheren Betriebsströmen zurückgeht.
- b) ECE-konformes Weiß mit niedrigerer Farbtemperatur (3575 K). Die rote Diode wird mit 600 mA betrieben, was dem maximal sinnvollen Strom bei einer Temperatur von 30 °C entspricht. Wie in Fall a) wird die blaue Diode mit 180 mA bestromt und die temperaturabhängige Leistung der grünen Diode bei 270 mA durch Interpolation bestimmt. Dieser Betriebszustand ist, ähnlich wie der Zustand a), stark durch den Rückgang der Emission der blauen Diode bei steigender Temperatur geprägt. Auch hier bewirkt eine Temperaturänderung um wenige Kelvin die Erzeugung einer nicht ECE-konformen Lichtfarbe.

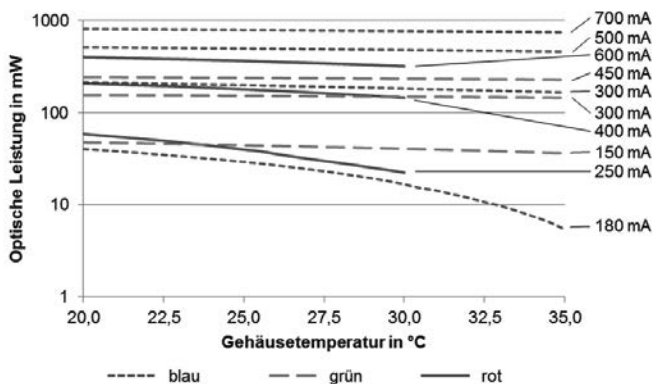


Bild 3: Optische Ausgangsleistung der Dioden in Abhängigkeit von der Gehäusetemperatur

- c) Gelb, bei maximal sinnvollem Strom der roten Diode von 600 mA. Die blaue Diode ist ausgeschaltet, die grüne wird mit 300 mA betrieben. Bei diesem Zustand ist die Abhängigkeit des Farborts von der Betriebstemperatur deutlich geringer als in den beiden zuvor betrachteten Fällen, da die Ausgangsleistung der roten und der grünen Diode weniger temperaturabhängig ist als die der blauen bei kleinen Strömen. Allerdings nimmt die Emission der roten Diode mit steigender Temperatur stärker ab als die der grünen, so dass sich die Lichtfarbe von einem satten gelb zu einem leichten gelbgrün verschiebt.

Bedingt durch die eingebrachte Laserenergie muss neben den Laserdioden selbst auch die in den verwendeten Mikrospiegel eingebrachte Temperatur beim Bildaufbau berücksichtigt werden. Dabei besitzt insbesondere die resonante Achse eine starke Abhängigkeit von der Temperatur. Weiterhin ist die Spiegelplatte des Mikrosanners mit einer Aluminiumbeschichtung appliziert, die etwa 10 bis 15% der auftreffenden Laserleistung in Form von Wärme absorbiert. Die Aufnahme der Wärmeenergie hat zur Folge, dass die Aufhängung weicher wird und sich die Federsteifigkeit verringert. Wenn die Phasenlage nicht bekannt ist, kann der Laserimpuls mit der örtlichen Lage in der Projektion nicht synchronisiert werden, wodurch es zu Bildverschiebungen kommt. In Bild 4 ist die Verschiebung des Amplitudengangs durch eine Temperaturerhöhung bzw. Erhöhung der Laserleistung qualitativ dargestellt. Beim Betrieb der resonanten Achse mit fester Frequenz und ohne Regelung würde eine Temperaturerhöhung zu einer Amplitudenverringering von 1 zu 2 führen. Wird hingegen eine Resonanzregelung, etwa durch eine „Phase Locked Loop“ verwendet, dann folgt bei einer Temperaturänderung lediglich eine Verschiebung der Frequenz von 1 zu 2. Das System bleibt folglich im Resonanzbetrieb.

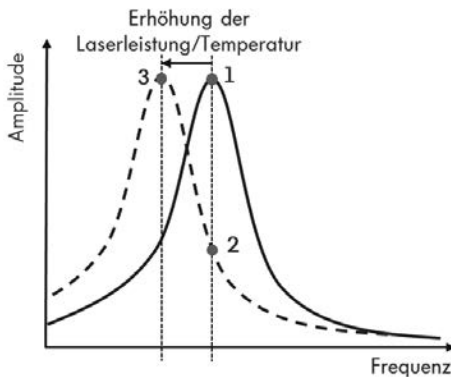


Bild 4: Amplitudengang in Abhängigkeit von der Laserleistung/ Temperatur am Mikrospiegel

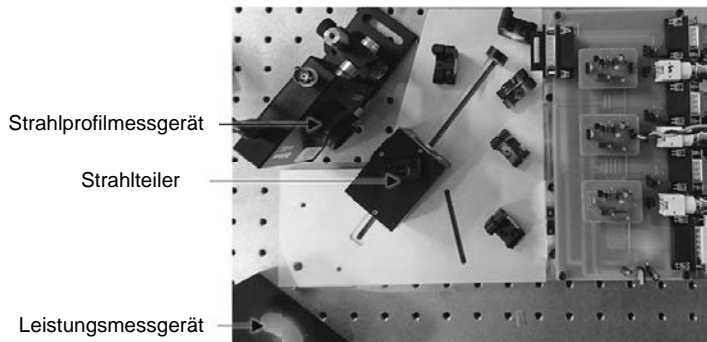


Bild 5: Versuchsaufbau zur Vermessung des Strahlprofils

Aufgrund der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Temperatur bzw. Laserleistung ist insbesondere bei Verwendung von höheren Laserleistungen die Implementierung einer Resonanzregelung erforderlich. Weitere Zusammenhänge werden in [10] erläutert.

Die drei von den Laserdioden emittierten Strahlenbündel müssen weiterhin so überlagert werden, dass sie einerseits möglichst nur den Mikrospiegel ($900\text{ }\mu\text{m} \times 1000\text{ }\mu\text{m}$) treffen und andererseits der im Fernfeld erzeugte Bildpunkt homogen in Farbe und Intensität erscheint. Zur Charakterisierung der Strahlprofile an der Position des Scannerspiegels wird der in Bild 5 dargestellte Versuchsaufbau genutzt. Im optischen Pfad wird ein 95/5-Strahlteiler eingesetzt, wobei der 95%-Anteil der Strahlung auf ein Leistungsmessgerät geleitet wird.

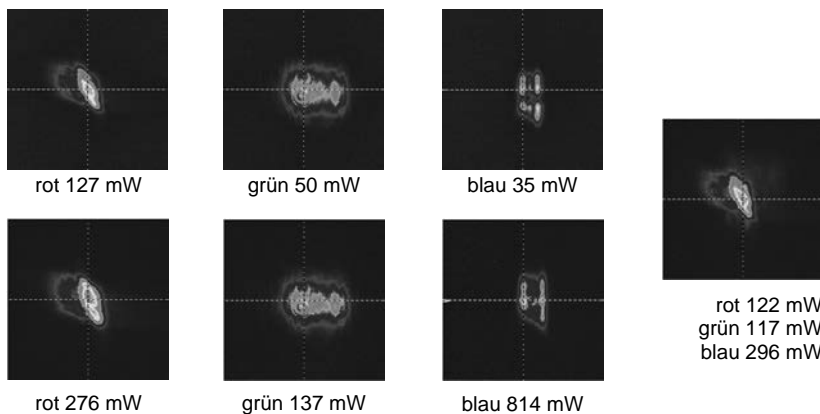


Bild 6: Strahlprofile der Laserdioden am Mikrospiegel

Um die Strahlgeometrien an der Position des Mikrospiegels erfassen zu können, ist der optische Pfad im Messaufbau zwischen den einzelnen Laserdioden und dem Strahlprofilmessgerät näherungsweise genau so lang wie im realen Setup zwischen Dioden und Mikrospiegel. In Bild 6 sind die Strahlprofile der einzelnen fokussierten Laserdioden dargestellt und jeweils der Punkt höchster Bestrahlungsstärke markiert. Die Bestrahlungsstärke wird in Falschfarben wiedergegeben, wobei jedes Bild auf die höchste lokale Bestrahlungsstärke normiert ist. Die dargestellte Fläche beträgt jeweils $2000\text{ }\mu\text{m} \times 2000\text{ }\mu\text{m}$. Die angegebene Leistung entspricht der optischen Leistung, die auf dem MEMS-Spiegel ankommen würde. Die grüne und die blaue Diode beleuchten eine annähernd rechteckige Fläche auf dem Sensor, wie es für Kantenemitter zu erwarten ist. Bei jedem untersuchten Betriebsstrom ist die von diesen Dioden beleuchtete Fläche kleiner als der Mikrospiegel (Bewertungskriterium der Strahlbreite: $D4\sigma$). Das Strahlprofil der roten Diode hingegen ist deutlich asymmetrisch. Bild 7 zeigt das von dem aufgebauten Prototyp erzeugte Bild auf eine Abblendllichtverteilung projiziert. Um die notwendige Beleuchtungsstärke für die Sichtbarkeit von scannend erzeugten Symbolen bestimmen zu können, muss auch immer die Umgebungsbeleuchtung berücksichtigt werden. Khanh und Huhn [11] geben einen Zusammenhang zwischen benötigter Leuchtdichte einer Projektion und der Umgebung an, der sich in eine Beleuchtungsstärke überführen lässt. Bei Umgebungsbeleuchtungen von bis zu 50 lx (Dämmerung) ergeben sich so erforderliche Beleuchtungsstärken von etwa 3 lx und bei Sonnenaufgang-/untergang (ca. 700 lx) etwa 30 lx. Für die Erzeugung der Symbole in Bild 7 wurden Laserleistungen von 110 mW für blau, 67 mW für grün und 112 mW für rot am Scannerausgang eingestellt. Daraus ergibt sich ein Lichtstrom von 52 lm. Um diesen in eine Beleuchtungsstärke umzurechnen, wird die Annahme getroffen, dass der Lichtstrom gleichmäßig über der abgescannten Fläche verteilt wird. Dadurch ergibt sich bei einer ansteuerbaren Fläche von 9 m^2 für den eingestellten weißen Farbort eine mögliche Beleuchtungsstärke von 5,8 lx, was bereits jetzt eine Erkennbarkeit in verhältnismäßig dunklen Umgebungen gewährleistet.

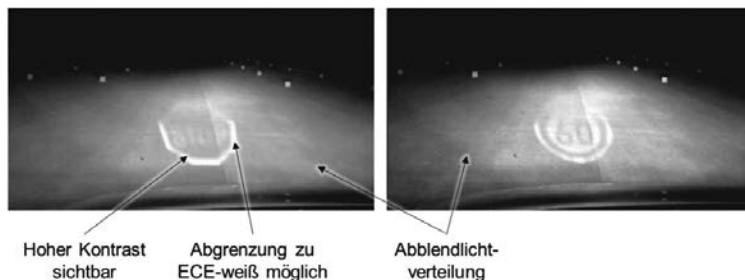


Bild 7: Scannend erzeugtes Bild auf eine Abblendllichtverteilung projiziert [8]

Bei jeder nahezu monochromatischen Lichtquelle treten Interferenzeffekte auf, so auch bei dem hier vorgestellten Laserscanner. Typischerweise entstehen stochastische Specklemuster, sowohl auf entsprechend beleuchteten, nicht idealglatten Oberflächen als auch im menschlichen Auge.

Damit sich ein intensives Specklemuster herausbilden kann, darf der Weglängenunterschied der Lichtstrahlen, die einen Punkt auf der Netzhaut beleuchten, nicht größer sein als die Kohärenzlänge des Lichts. Diese liegt bei der eingesetzten blauen Diode bei etwa 90 μm . Bedingt durch die Rauheit der Straße, welche die 90 μm bei weitem übersteigt, erzeugt der Scanneraufbau unter realen Betriebsbedingungen keine störend ausgeprägten Speckles.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Anhand eines Demonstratoraufbaus wurde das System eines scannenden RGB-Lasermoduls erläutert und untersucht. Dabei konnte die prinzipielle Eignung der verwendeten Technologie für die Informationsprojektion gezeigt werden. Es können hohe Kontraste in einem großen Farbraum erzeugt werden und somit kann eine gute Sichtbarkeit der projizierten Daten gewährleistet werden. Mit Laserleistungen im Milliwatt-Bereich konnte bereits eine Abblendlichtverteilung mit ausreichend großen und kontrastreichen Symbolen überlagert werden (Bild 7). Herausforderungen für die Weiterentwicklung der Technologie liegen zum einen auf der optischen Seite in der Erhöhung der Laserleistung, um die Sichtbarkeit der dargestellten Informationen auch bei Tageslicht zu ermöglichen, sowie in der Vergrößerung der Ansteuer-geschwindigkeit um eine höhere Auflösung zu erreichen. Zum anderen müssen aber auch Aspekte wie Augensicherheit und allgemeine Auswirkungen derartiger Systeme auf die Verkehrssicherheit näher betrachtet werden, um eine Zulassungsfähigkeit anstreben zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Werkstetter, Mario; Weber, Stefan; Hirth, Florian; Amann, Christian: *Laserlicht im BMW I8 - Ansteuerung und E/E-Integration*. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (2014), Nr. 04/2014, S. 26-30.
- [2] Weber, Stefan; Buck, Alexander; Amann, Christian: *Laserlicht im BMW I8 - Design, Systemintegration und Test*. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (2014), Nr. 09/2014, S. 60-65.
- [3] Lehner-Ilsanker, Tanja: *Der Audi R8 LMX - erstes Serienmodell der Welt mit Laser-Fernlicht*. Pressemitteilung, 2014.
- [4] Fries, Benedikt; Gut, Carsten; Laudénbach, Thomas; Mühlmeier, Martin: *Laserlicht für den Rennwagen Audi R18 E-Tron Quattro*. In: Automobiltechnische Zeitschrift 116 (2014), Nr. 6, S. 38-42.
- [5] OSRAM OS, *Data sheet PL-TB450B preliminary*, June 12, 2013.
- [6] OSRAM OS, *Data sheet PLP 520 preliminary*, September 30, 2013.
- [7] ARIMA Lasers, *Data sheet ADL63V0-BTP*, September, 2014.
- [8] Roth, Joscha; Wallaschek, Jörg; Kloppenburg, Gerolf; Lachmayer, Roland; Meyer, Benjamin; Thomschke, Sebastian: *RGB-Laser Scanning Module for Onroad Projection*. In: Khanh, Tran Quoc (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting*. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015. - ISBN 978-3-8316-4482-7, S. 385-394.
- [9] Kloppenburg, Gerolf; Wolf, Alexander; Lachmayer, Roland: *High-resolution vehicle headlamps: technologies and scanning prototype*. Adv. Opt. Techn. 2016.
- [10] Roth, Joscha; Meyer, Benjamin; Thomschke, Sebastian: *Laser Scanning Unit for Light Symbol Projection*. In: *Vision 2014 -Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving*; Versailles, France; SIA Proceedings
- [11] Khanh, Tran Quoc; Huhn, Wolfgang: *Sichtverbesserungssysteme*. In Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer Vieweg, 2015. - ISBN 978-3-658-05734-3.

Laserbasiertes scannendes Pixellicht: Rotatorischer Spiegelansatz

Dr. rer. nat. **Eugen Tatartschuk, Tobias Kreuzer,**
Bertrandt Köln GmbH, Köln

Kurzfassung

Der vorgestellte Ansatz basiert auf einer Phosphor-Aktivierung durch einen blauen Laser und der Abbildung der resultierenden leuchtenden Fläche durch ein Linsensystem. Es wird dargestellt, wie eine stellenweise Phosphor-Aktivierung durch Abscannen mittels eines modifizierten Polygonspiegels und Laser-Modulierung realisiert werden kann. Systemparameter und Simulationsergebnisse werden diskutiert.

1. Einleitung

Seit der Einführung des ersten blendfreien Fernlichts ist das Interesse an derartigen Systemen, insbesondere im mittleren und unteren Preissegment, stetig gestiegen [1]. Einfache Systeme blenden vertikale Streifen in der Fernlichtverteilung aus. Eine feinere horizontale und zusätzliche vertikale Segmentierung erlauben eine präzisere Anpassung an die jeweilige Verkehrssituation. Aufgrund ihres Étendues eignen sich Laser besonders gut für hochauflösende ADB-Systeme (Adaptive Driving Beam). Eine Umsetzungsmöglichkeit besteht darin, einen blauen Laserstrahl durch vibrierende Mikrospiegel gezielt abzulenken und die gewünschte Lichtverteilung, die durch eine sekundäre Optik auf die Fahrbahn abgebildet wird, auf einen Phosphor zu „schreiben“ [2]. Das hat den Vorteil einer komplett anpassbaren Lichtverteilung, jedoch den Nachteil der hohen Systemkomplexität und -kosten [3].

Diese Arbeit beschreibt eine scannende Lösung auf Basis einer rotatorischen Spiegelbewegung, die eine hochauflösende Phosphor-Aktivierung erlaubt. Die Grundlichtverteilung weist ein Maximum in Richtung der Bezugsachse auf, wobei ihr Profil durch die Spiegelform kontrollierbar ist. Durch Lasermodulation können Bereiche ausgeblendet oder gedimmt werden. Die Vorteile des Ansatzes sind makroskopische Spiegelgröße, kostengünstige Realisierbarkeit und Nutzung etablierter Großserientechnologien. Die Leistungsaufnahme ist gegenüber Systemen, die zum Ausblenden von Teilen der Lichtverteilung auf Absorption setzen (z. B. Mikrospiegel-Arrays), verbessert.

Im Folgenden werden Anforderungen an ein laserbasiertes Pixellicht definiert und einzelne Systemparameter untersucht, um die Zusammenhänge des Bauraums, der Auflösung, der Effizienz etc. aufzuzeigen. Anschließend werden Ergebnisse an Beispielen erläutert.

2. Zielsetzung und Anforderungen

Die maßgeblichen Parameter eines ADB sind der Lichtstrom, die maximal erzielbare Lichtstärke und die Auflösung/Abbildungsschärfe. Diese Parameter sind dem jeweiligen Anwendungsfall anzupassen. Der einfachste Anwendungsfall ist ein System, in dem das Laser-ADB mit einem zusätzlichen LED-Abblend- und ggf. Fernlicht gekoppelt ist. Falls vorhanden, wird die dynamische horizontale und vertikale Verstellung mechanisch vollzogen. In diesem Fall kann das Laser-ADB eine Grundlichtverteilung aufweisen, welche ein ausgeprägtes Maximum besitzt. Die maximale Lichtstärke würde ca. 60 kCd und der Lichtstrom etwa 400 lm betragen (s. Bild 1(a)). Horizontal könnte das System ein Dutzend Segmente aufweisen und vertikal zwei bis fünf, wobei in der Nähe der Bezugsachse eine höhere Auflösung gefordert wäre als in äußeren Bereichen. Die Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) könnte hauptsächlich nach dem Fahrereindruck definiert werden.

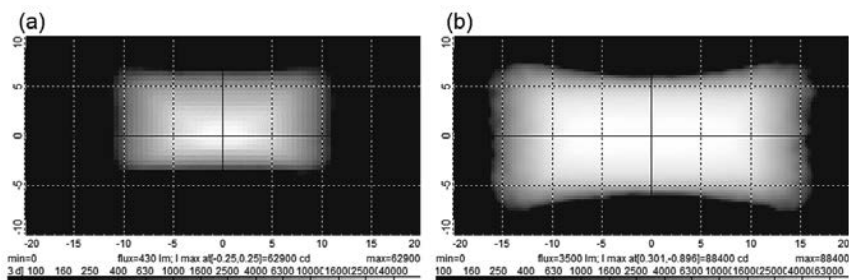


Bild 1: Exemplarische Grundlichtverteilungen von ADB-Systemen mit mechanischer (a) und elektronischer (b) Umsetzung der AFS-Funktion.

Ein fortgeschrittenes System könnte auf eine dynamische Mechanik verzichten. Hier wäre der gesamte Kern der Lichtverteilung (Abblend- und Fernlicht) durch ein Laser-ADB realisiert und nur die seitlichen Bereiche und das Vorfeld wären durch ein statisches breites Abblendlicht ergänzt. Das Maximum der Grundlichtverteilung muss sich hierbei in einem Bereich von etwa $\pm 10^\circ$ horizontal erstrecken und auch vertikal einen breiten Winkelbereich abdecken (z. B. 5°), um durch stellenweises Dimmen eine rein elektronische Verstellung zu realisieren (Bild 1(b)). Die HDG sollte im zentralen Bereich mit hoher Lichtstärke eine abblendlichtgerechte Schärfe aufweisen und sich in Schritten von weniger als $0,5^\circ$ einstellen lassen. Zum Rand der Lichtverteilung können Auflösung und Schärfe der HDG abnehmen. Insgesamt wäre die Auflösung etwa 50×15 Pixel. In so einem System läge der erforderliche Lichtstrom der Grundlichtverteilung über 3500 lm. Allerdings sollte an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die komplette Lichtverteilung niemals zum Einsatz kommt. Die real abgerufe-

nen Leistungen betragen durch Dimmen etwa ein Drittel der maximalen Leistung, was für die Kühlung und den Energieverbrauch von Vorteil ist.

3. Aufbau und Funktionsweise

Der Systemansatz orientiert sich an bereits existierenden Systemen, in welchen ein Lichtstrahl durch einen rotierenden Polygonspiegel abgelenkt wird. Bereits 1907 wurde das Patent Nr. 18076 angemeldet, welches eine scannende Abbildung durch zwei rotierende Polygonspiegel beschreibt. Auch in modernen Laserdruckern und Laborsystemen werden rotierende Walzenspiegel zur Laserstrahlablenkung angewendet. In [4] wird vorgeschlagen, einen Polygonspiegel in Verbindung mit einer LED-Reihe für ein Pixellicht zu nutzen.

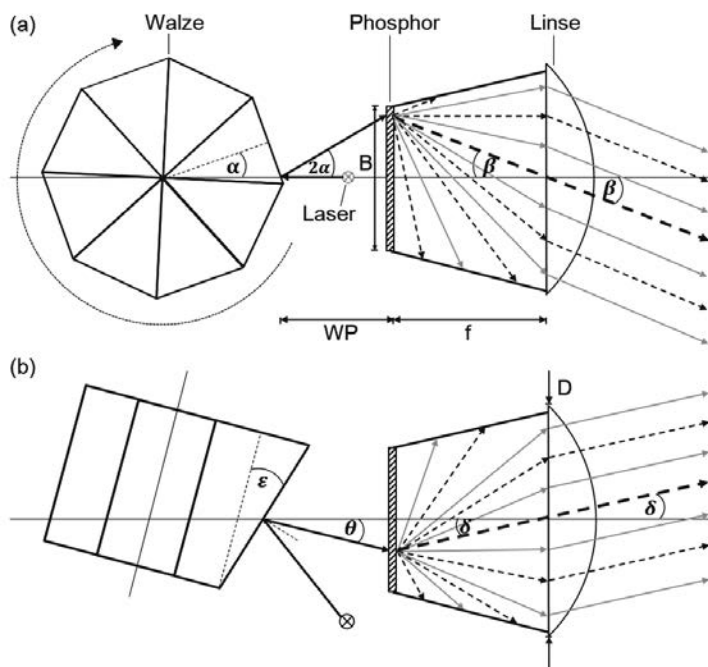


Bild 2: Systemaufbau, Sicht von oben (a) und von der Seite (b).

In dem hier vorgestellten ADB-System trifft ein blauer Laserstrahl auf einen Walzenspiegel. Die Walzenrotation verursacht dabei eine periodische Änderung des Reflexionswinkels (Bild 2(a)). Dadurch wird vom Laserstrahl eine kontinuierliche Zeile pro Walzensseite auf einem Phosphor-Element abgescannt, welches dadurch angeregt wird. Der Phosphor wandelt am Ort der Anregung das blaue Licht in weißes um. Um das weiße Licht anschließend auf die

Fahrbahn abzubilden, liegt der Phosphor in der objektseitigen Brennebene einer Sammellinse, welche sich am Systemende befindet. Mit diesem Aufbau können durch gezieltes Ein- und Ausschalten des Lasers vertikale Segmente in der Lichtverteilung ausgeblendet werden. Sollten jedoch einzelne Pixel in der Lichtverteilung ausgeblendet werden, ist es nötig, mehrere Zeilen auf dem Phosphor zu aktivieren. Um dies zu erreichen, können die Walzenseiten jeweils in Bezug auf die Drehachse gekippt werden. Somit wird mit jeder Walzenseite eine Zeile auf dem Phosphor abgescannt (Bild 2(b)). Durch gezieltes Ein- und Ausschalten des Lasers können folglich einzelne Pixel aus der Lichtverteilung ausgeblendet werden. Dazu muss zu jedem Zeitpunkt die Laserspot-Position auf dem Phosphor (horizontal und vertikal) bekannt sein. Sind mehrere Laser auf unterschiedliche Höhen ausgerichtet, kann mit jedem Laser ein separater Zeilensatz gescannt werden. Möglich sind auch Variationen in der erzielten Spotgröße der unterschiedlichen Laser, unterschiedliche Leistungsklassen oder Farben (bei einem RGB-Lasersystem sind natürlich weder Phosphor noch Linse notwendig).

4. Systemdimensionierung

Im Folgenden wird die Dimensionierung des Systems durchgeführt: Die Parameter der Linse, des Phosphors und der Walze werden zueinander in Bezug gesetzt.

Die Auswahl der Linse ist durch folgende Parameter maßgeblich bestimmt:

1. Größe der resultierenden Lichtverteilung
2. Durchmesser der sichtbaren Lichtaustrittsfläche (Design)
3. Erforderliche Effizienz
4. Auflösung.

Für die Bestimmung der Phosphorgröße und der Segmentierung wird davon ausgegangen, dass die leuchtende Fläche des Phosphors sich in der Fokusebene der Linse befindet. Bild 2 veranschaulicht die Konstruktion des Mittelpunktstrahls. Dabei ergibt sich aus der Breite der Grundlichtverteilung β_{max} die maximale Breite der leuchtenden Fläche B

$$B = 2 \cdot f \cdot \tan(\beta_{max}). \quad (1)$$

Aus der minimalen Laserspotgröße s , die auf dem Phosphor generierbar ist, ergibt sich die minimale Größe eines beleuchteten Segments (idealisierte Abbildung und Lasersteuerung) als

$$d\beta = \frac{\beta_{max} \cdot s}{2 \cdot B}. \quad (2)$$

Daraus folgt, dass eine größere Linsenbrennweite bei gleicher Spotgröße zu einer feineren Segmentierung führt. Jedoch nimmt dabei auch der benötigte Bauraum zu. Die minimale kontrollierbare horizontale Verschiebung der HDG und das kleinste ausgeblendete Segment

hängen dagegen maßgeblich von der Lasersteuerung ab und können weit unter den Werten liegen, die sich aus (2) ergeben. Die HDG-Schärfe hängt von der Spotschärfe, von der Ein- und Ausschaltgeschwindigkeit des Lasers sowie von der Abbildungsgüte ab.

In Bild 3(a) wird die Effizienz einer Sammellinse vor einer sich im Brennpunkt befindenden Lambertschen Punktlichtquelle als Funktion der einheitslosen Größe d/f (Durchmesser durch Brennweite) dargestellt. Darunter befinden sich Abbildungen der entsprechenden Linsengeometrien: Eine Effizienz über 30 % resultiert schnell in Linsenformen, die für einen Serien-einsatz ungeeignet sind. Die Verwendung eines Zweilinsensystems hat zwar den Nachteil des erhöhten Justage-Aufwandes, reduziert aber die Dicke der einzelnen Linsen. Auch die Abbildungsgenauigkeit kann bei einem Zweilinsensystem gezielter optimiert werden. Bild 3(e) zeigt ein Doppellinsensystem mit einer Brennweite von 40 mm, einem Durchmesser der großen Linse von 76 mm und einer Effizienz von 45 %. Um mit einer Linse diese Effizienz bei gleicher Brennweite zu erzielen, ist ein Durchmesser von 84 mm erforderlich (Bild 3(d)).

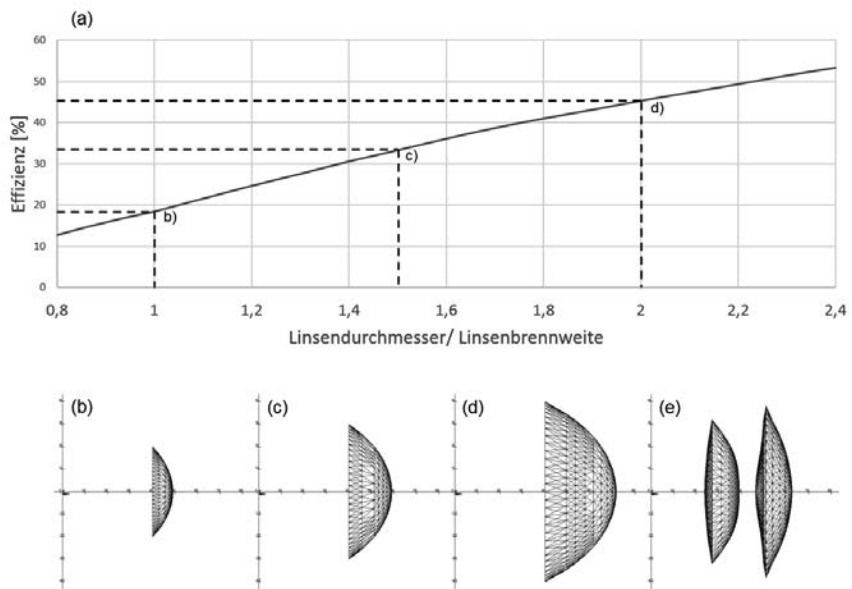


Bild 3: Linseneffizienz abhängig von Formfaktoren unterschiedlicher PMMA-Linsen.

Eine weit verbreitete Methode, aus Festkörperlichtquellen weißes Licht zu erzeugen, ist, blaue Dioden mit Phosphor zu kombinieren. Ein Teil der kurzwelligen blauen Photonen kann dabei in langwelligere, energieärmere, gelbe Photonen umgewandelt werden. Vorteile der Remote-Phosphor-basierten Systeme sind, dass das blaue Licht sich vor dem Phosphor in

geeigneter Weise manipulieren lässt und die Verlustwärme auf eine größere Fläche verteilt werden kann. In dieser Untersuchung wurde ein Remote-Phosphor aus der Produktserie „ChromaLit™XT“ der Firma Intematix® vorausgesetzt. Seine Eigenschaften sind in [5] nachzulesen: Die Konversionseffizienz eines blauen Laserstrahls mit der Wellenlänge 447 nm beträgt ca. 240 lm/W_{rad} und die Abstrahlcharakteristik wird in erster Näherung als Lambertsch für alle Wellenlängen angenommen. Sollte es davon Abweichungen geben, kann die Linse für die entsprechende Abstrahlcharakteristik und das entsprechende Lichtspektrum in einem speziell dafür entwickelten Verfahren optimiert werden. Da die Strahl-Aufweitung im Phosphor auf Streuprozessen beruht, hängt sie mit der Phosphorschichtdicke (im ausgesuchten Produkt wenige Zehntelmillimeter) zusammen. Da die in dieser Untersuchung betrachteten Strahldurchmesser größer sind, wird in erster Näherung von einer infinitesimalen Phosphorschicht ausgegangen und die Strahl-Aufweitung wird vernachlässigt.

Bei mehreren Watt Laserleistung sollte die Strahlung nicht unkontrolliert aus dem Scheinwerfer austreten. Zudem basiert das System auf der Annahme, dass die Laserspot-Position auf dem Phosphor jederzeit bekannt ist. Durch Detektion von Streulicht können beide Aspekte berücksichtigt werden. Da der Phosphor sich auf einer Glasunterlage befindet, wird ein Teil des erzeugten Lichtes durch die Unterlage mittels totaler inneren Reflexion geleitet (Bild 4). Werden am Phosphorrand Photodetektoren angebracht, kann die ordnungsgemäße Funktionsweise des Systems kontrolliert werden.

Ein wichtiger Bestandteil des Aufbaus ist die Walze. Nachdem die Größe der Linse und der zu beleuchtenden Fläche auf dem Phosphor bestimmt wurde, kann die Walze dimensioniert werden. Folgende Parameter sind zu bestimmen:

1. Abstand Walze zu Phosphor
2. Walzendurchmesser
3. Anzahl der Walzenseiten
4. Kippung der Walzenseiten
5. Form der Walzenseiten

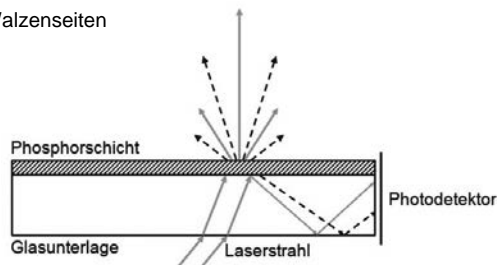


Bild 4: Remote-Phosphor von Intematix®: Aufbau und Lichtpfade.

Bild 2(a) zeigt den Zusammenhang des Abstandes der Walze zum Phosphor WP und der Walzengeometrie. Aus dem maximalen Ablenkungswinkel 2α ergibt sich:

$$\tan(\alpha) = \frac{B}{2 \cdot WP}. \quad (3)$$

Für den Winkel α gilt auch

$$\alpha = \frac{180^\circ}{N}, \quad (4)$$

wobei N die Anzahl der Walzenseiten ist. Es ergibt sich folgende Gesetzmäßigkeit: Je weiter sich die Walze vom Phosphor befindet, desto mehr Seiten kann sie aufweisen, desto höher die vertikale Auflösung. Bei konstantem Walzendurchmesser bedeutet eine höhere Anzahl von Seiten eine kleinere Seitenlänge. Bei konstanten absoluten Fertigungstoleranzen fallen dabei die relativen Fehler größer aus und die Effizienz sinkt. Leuchtet der Laser nämlich eine unscharfe Kante zwischen zwei Seiten an, wird die gesamte Phosphorbreite bzw. das komplette Fernfeld illuminiert. Um eine saubere Ausblendung der Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten, muss der Anteil der Fertigungsradien an der Gesamtwalzenfläche minimiert werden und der Laser beim Auftreffen auf die Seitenzwischenradien abgeschaltet werden. Die Effizienz der Walze beträgt unter Berücksichtigung der minimalen Fertigungsradien r und der Laserstrahlbreite an der Walze lb :

$$\eta = 1 - \frac{r \cdot \tan(\alpha) + lb}{W \cdot \tan\left(\frac{180^\circ}{N}\right)}, \quad (5)$$

wobei W der Walzenradius ist (Bild 5(a)). An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass trotz verringelter Walzeneffizienz keine Energie verloren geht, sondern die Laserdiode einen festen PWM-Zyklus erhält, was für die thermische Bilanz von Vorteil sein kann.

Die vertikale Kippung der Seiten ergibt sich aus der erforderlichen Höhe der Lichtverteilung ähnlich zu Gleichung (3). Der vertikale Reflexionswinkel ändert sich pro Walzenseite um das Doppelte des jeweiligen Kippwinkels (Bild 2(b)):

$$\theta = 2 \cdot \varepsilon. \quad (6)$$

Es wird vorgeschlagen, die Kippung möglichst in kleinen Schritten von Seite zu Seite zu verändern. Bild 5(b) zeigt eine mögliche Lösung für eine achtseitige Walze.

Die maximale vertikale Auflösung des Systems ergibt sich aus der Anzahl der ungleichen Kippungswinkel der Walze. Sind mehrere Laser im Einsatz und befinden sich alle Spots in unterschiedlichen Höhen auf dem Phosphor, vervielfacht sich die Auflösung mit deren Anzahl. Überlappen sich die Zeilen vertikal auf dem Phosphor (wie in Bild 6 skizziert), so wird jeder Punkt in der Grundlichtverteilung zweimal pro Walzenumdrehung erzeugt, was den Perlshnureffekt minimiert. Ist die Anzahl der Zeilen so groß, dass die Überlappung mehr als

eine halbe Zeilenhöhe ergibt, können sich die Kippungswinkel der Walzenseiten im Laufe einer Walzenumdrehung wiederholen. Damit sinkt die minimale Drehgeschwindigkeit der Walze, die ein flimmerfreies Fahrerlebnis ergibt. Wird eine komplette Lichtverteilung mit einer Walzenumdrehung erzeugt, empfiehlt sich eine Drehgeschwindigkeit von 24.000 U/min ([6],[4]). Unter Berücksichtigung der Zeilenüberlappung kann sie auf 12.000 U/min oder weniger sinken.

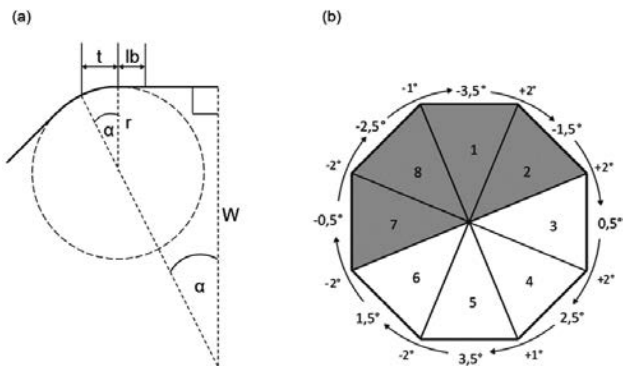


Bild 5: Reduktion der nutzbaren Walzenfläche durch Fertigungsradii (a) und eine achtseitige Walze mit dazugehörigen Kippungswinkeln (b).

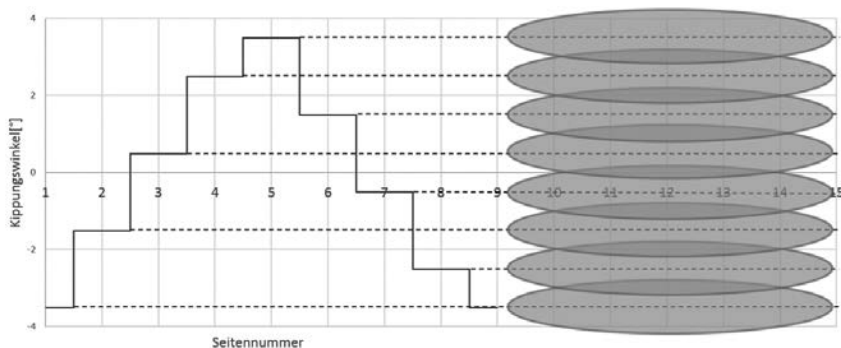


Bild 6: Empfohlene Seitenkipplung und Zeilenüberlappung bei einer achtseitigen Walze.

Bisherige Herleitungen basieren auf der Annahme von geraden Walzenseiten. Dabei stellt sich eine in horizontaler Richtung fast gleichmäßige Beleuchtung des Phosphors mit einem schwach ausgeprägten Maximum in der Nähe der optischen Achse ein. Es lässt sich durch die geringste Geschwindigkeit des Laserspots in diesem Bereich und die geringsten Fresnel-Reflexionen an der Glasunterlage bei senkrechtem Lichteinfall erklären. Für Pixel, die weiter

von der optischen Achse entfernt sind, sinkt die Effizienz der Linse und die Abbildungsfehler nehmen zu, was zu einer weiteren Verstärkung des zentralen Maximums beiträgt. Sollte das Maximum scharf gestaltet werden, z. B. wie in Bild 1(a), wäre eine weitere Absenkung der Scangeschwindigkeit in der Nähe der optischen Achse nötig. Bild 7 veranschaulicht, wie eine gekrümmte Walzensseite die Strahlablenkung definiert. Die Scangeschwindigkeit auf dem Phosphor kann durch die Krümmung in einigen Bereichen kontrolliert erhöht oder abgesenkt werden, der Strahl kann zeitweise zum Stillstand gebracht werden oder sogar seine Bewegungsrichtung umkehren.

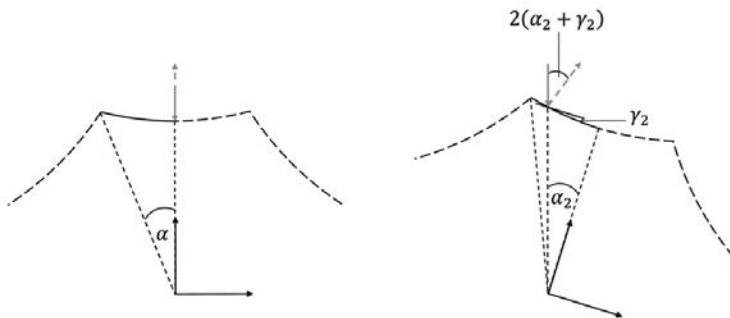


Bild 7: Reflexionswinkel an gekrümmten Walzensseiten.

5. Auslegung von Beispielsystemen

Es wurde gezeigt, welche Systemparameter bei der Auslegung eines walzenbasierten Laser-Pixellichts wichtig sind und wie sie die Performance bestimmen. In diesem Kapitel werden beispielhaft zwei Systeme ausgelegt und unter Berücksichtigung der chromatischen Effekte simuliert. Ein Doppellinsensystem mit einem Durchmesser von 76 mm und einer Brennweite von 40 mm (Bild 3(e), ein möglichst effizientes System mit 45 % Linsenwirkungsgrad) wird mit einer Einzellinse mit der Brennweite von 49 mm und dem Durchmesser von 60 mm verglichen (ein System, bei dem eher die Abbildungsgüte im Vordergrund steht, Linsenwirkungsgrad

24 %). Beide Linsensysteme sind in einem Optimierungsverfahren entstanden, welches das Spektrum und die Abstrahl-Charakteristik des Phosphors berücksichtigt, um Abbildungsfehler zu minimieren und eine gewünschte Lichtfarbe im Fernfeld zu erzeugen. Um eine angemessene Systemperformance (ca. 90 kCd Maximum und 3.500 lm Lichtstrom in der Grundlichtverteilung gemäß Bild 1(b)) zu erzielen, wären Laser mit einer optischen Gesamtleistung von etwa 40 Watt (75 Watt beim Einlinsensystem) notwendig. Um das System überschaubar

zu halten, wurden nur drei Laserdioden verwendet. Diese wurden in unterschiedlichen Höhen auf dem Phosphor fokussiert. Die Abstrahlcharakteristiken der Laserdioden entstammen dem Rayfile der „PL TB450“ von Osram [7]. Primäroptiken zur Kollimation der Laserstrahlen wurden entwickelt. Sie befinden sich 10 mm vor den Laserdioden und haben die Abmessungen 10 mm × 4 mm pro Laser. Die verwendete Walze besitzt 24 gerade Seiten und hat einen Durchmesser von 75 mm. Bei den Systemabmessungen wurden die Größe eines gängigen Mittelklassefahrzeugscheinwerfers und eine rein elektronisch realisierte dynamische Funktion berücksichtigt. Fertigungsradien wurden vernachlässigt und die Grundlichtverteilung wird zweimal pro Walzenumdrehung erzeugt (jeder Kippwinkel ε wiederholt sich zweimal pro Walzenumdrehung), sodass die maximale vertikale Auflösung 12 Seiten × 3 Laser = 36 Pixel beträgt. Unter der Annahme, dass die Lichtverteilung 400-mal pro Sekunde erzeugt wird, wird alle 0,2 ms eine Zeile abgescannt.

Die erzielte Systemeffizienz beträgt ohne Lichtscheibenverluste 84 bzw. 45 Lumen pro Watt optischer Leistung. Wird diese Effizienz zugrunde gelegt, um die in Bild 1(a) gezeigte Lichtverteilung zu erzielen, so würde zwischen 5 Watt beim Zweilinsensystem und 9 Watt bei einer Linse benötigt werden. Da ein solches System auch geringere Anforderungen an die Abbildungsqualität besitzt, besteht noch Optimierungspotenzial bei der Linseneffizienz.

Bild 8 zeigt die sukzessive Ausblendung und die nachfolgende Einblendung der resultierenden Lichtverteilungen. Wie erwartet, bildet das weniger effiziente Einlinsensystem präziser ab,

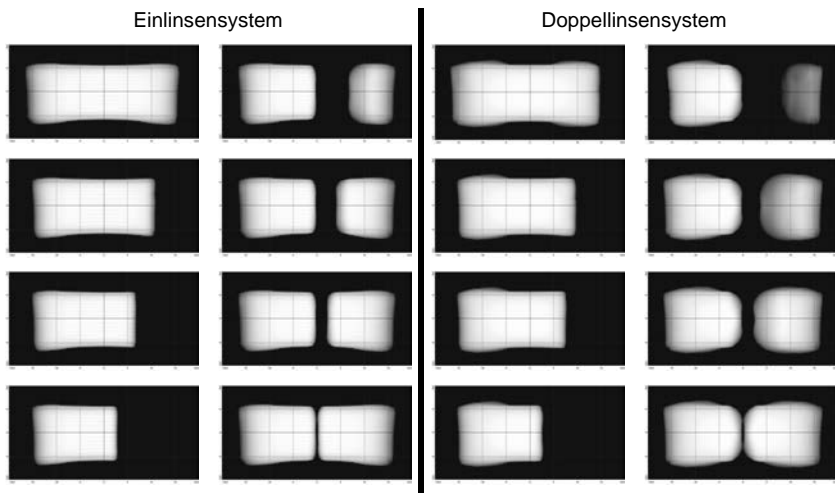


Bild 8: Ausblendung von horizontalen Winkelbereichen im Vergleich der zwei Systeme.

wobei die schärfste HDG bei beiden Systemen im Zentrum der Lichtverteilung zu beobachten ist. Die rechte HDG in der ersten und dritten Spalte bleibt dabei in einem breiten Winkelbereich scharf, die den größeren Winkeln zugewandte HDG eines ausgeblendeten Bereichs (zweite und vierte Spalte) bleibt beim Einlinsensystem bis ca. 5° scharf und wird beim Zweilinsensystem bereits bei 2° aufgeweicht. Da die auszublendenden Objekte im äußeren Bereich der Lichtverteilung auch größer werden (z. B. langsamere Fahrzeuge), sind hier eine gröbere Segmentierung und eine weichere Hell-Dunkel-Grenze auch akzeptabler. Sollte die Schärfe der HDG nicht ausreichend sein, können unter Verschlechterung der Effizienz mittels Blenden die Abbildungseigenschaften der Systeme verbessert werden.

Auch die horizontale HDG bleibt bei einem Einlinsensystem in einem breiteren Winkelbereich scharf (Bild 9). Ein kontrolliertes Aufweichen in Randbereichen ist für die Performance im Abblendlichtmodus sogar erwünscht.

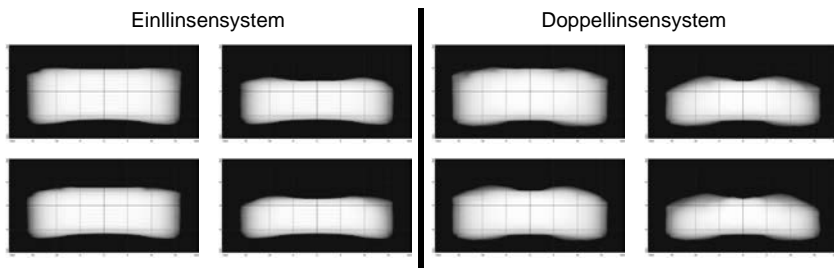


Bild 9: Ausblendung von vertikalen Winkelbereichen im Vergleich der zwei Systeme.

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein walzenbasiertes scannendes Laser-Pixellichtsystem untersucht. Es wurde gezeigt, wie die Lichtverteilung und die Systemeffizienz den anwendungsspezifischen Vorgaben angepasst werden kann. Bei entsprechend schneller Lasersteuerung und einem angemessenen Bauraum sind Auflösungen von mehreren Tausend Pixel realisierbar. Beim Ausblenden von Teilen der Lichtverteilung geht kein Licht durch Absorption verloren, was die Anforderungen an die Kühlung und die Stromversorgung positiv beeinflusst. Durch die Rotation der Walze wird die Luftbewegung im Scheinwerfer angeregt, was zu einer Verbesserung der Kühlung beitragen kann. Die Laserdioden können kühlungsbegünstigend im unteren Teil eines Scheinwerfers platziert werden. Aufgrund der guten Skalierbarkeit des Systems lassen sich viele Gleichteile in unterschiedlichen Baureihen verwenden. Die Systemperformance und -größe kann allein durch die Walzenform und die Anzahl

der Laserdioden an die jeweilige Fahrzeugklasse angepasst werden. Dies eröffnet das Potenzial für eine breite Marktdurchdringung.

Für den Serieneinsatz der vorgestellten walzenbasierten Systeme ist eine Weiterentwicklung der Laserlichtquellen sehr wichtig, wobei Mehrlasersysteme mit streng tolerierten Dioden-Positionen die Scheinwerfer-Justage vereinfachen können. Die Bildfeldwölbung kann durch Remote-Phosphor-Systeme auf gekrümmten Trägern kompensiert werden. Auch die Konversionseigenschaften des Phosphors können die Systemeffizienz durch eine gerichtete Abstrahlung des konvertierten Lichtes verbessern. Kommt ein RGB-Lasersystem zum Einsatz, so kann auf Linsen und auf den Phosphor verzichtet werden, wodurch die Systemperformance steigt. Eine Projektion von Informationen auf die Fahrbahn ist bei entsprechender Auslegung möglich.

Literaturverzeichnis

- [1] Neumann, R.: Opti-Matrix-LED Headlamp - Future Light for Everybody. 11th International Symposium on Automotive Lighting (2015) S. 171-176.
- [2] Wilhelmy, J., Gut, C.: Laser Headlamps. Key factors and improvements. 11th International Symposium on Automotive Lighting (2015) S. 405-416.
- [3] Roth, J., et al.: RGB-Laser Scanning Module for Onroad Projection. 11th International Symposium on Automotive Lighting (2015) S. 385-394.
- [4] Strauß, D. I. S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn Diss. 2007.
- [5] Basu, C., et al.: A High Power Blue Diode Laser Pumped White Light Source Using Remote Phosphors. 10th International Symposium on Automotive Lighting (2013) S. 126-136.
- [6] Yamamura, S., et al.: Glare-free High Beam with Beam-scanning. 10th International Symposium on Automotive Lighting (2013) S. 340-347.
- [7] http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/laser-diodes/visible-laser/blue-laser/index.jsp.

Verfahren zur dynamischen Lichtverteilungs-Steuerung in Scheinwerfern basierend auf resonanten MEMS-Laser-Scannern

Dr.-Ing. **U. Hofmann**, Dipl.-Ing. **T. von Wantoch**,
Dr.-Ing. **S. Gu-Stoppel**, M.Sc. **F. Senger**, Dipl.-Ing. **C. Mallas**,
Fraunhofer ISIT, Itzehoe

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein neuartiges Laser-Scan-Konzept basierend auf robusten, in zwei Achsen hochfrequent resonant schwingenden zweiachsigen MEMS-Scannern vorgeschlagen, um eine vorteilhafte dynamisch steuerbare Intensitätsverteilung einer Weißlichtquelle in einem adaptiven Pixel-Scheinwerfer zu erzielen.

Abstract

This article reports on a new laser scanning concept that uses robust resonant high frequency biaxial MEMS scanning mirrors to provide an advantageous dynamically controllable intensity distribution of a white light source to build the basis of an adaptive pixel-headlight.

1. Einleitung

Während durch Einführung der Laser-Phosphor-Konversions-Technologie in Scheinwerfern von BMW und Audi ein deutlicher Gewinn an Reichweite demonstriert werden konnte, erlauben Matrix-LED-Scheinwerfer die Realisierung einer situationsabhängigen adaptiven Ausleuchtung. Der durch diese Systeme ermöglichte Gewinn an Sicherheit ließe sich weiter steigern, wenn sich die hohen erzielbaren Leuchtdichten eines Laser-Scheinwerfers und die Anpassungsfähigkeit des Matrix-LED-Scheinwerfers kombinieren und umsetzen ließen in Form eines blendfreien adaptiven Laser-Scheinwerfers. Diese Funktionalität kann erzielt werden, durch Verwendung eines zweiachsigen MEMS-Scanners (MEMS = micro electro mechanical system), der den kombinierten Strahl mehrerer blauer Laserquellen sequentiell über einen Phosphor-Konverter ablenkt. Durch Intensitätsmodulation der Laserquellen synchronisiert zur horizontalen und vertikalen Strahlablenkung durch den MEMS-Scanner erhält man eine kontrollierbare Anregung einer räumlich strukturierten Weißlichtquelle, die zur Bilderzeugung und zur Realisierung eines hochauflösenden Pixel-Matrix-Scheinwerfers verwendet werden kann. Die Umsetzung dieses Prinzips ist in Bild 1 wiedergegeben. Es zeigt

einen am Fraunhofer ISIT realisierten Laser basierten Projektor, der durch einen zweiachsigen MEMS-Scanner in der Lage ist, den transmittierenden Phosphor-Konverter hochaufgelöst mit bis zu 1024 x 512 Bildpunkten zum Leuchten anzuregen.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit wesentlichen Anforderungen, die an den MEMS-Scanner in einem adaptiven Laser-Phosphor-Scheinwerfer gestellt werden. Als Konsequenz dieser Herausforderungen wird in diesem Beitrag u.a. ein neues Projektions-Verfahren vorgeschlagen, welches dazu geeignet ist, die Nachteile herkömmlicher Raster-Scanner und herkömmlicher Lissajous-Scanner zu überwinden.

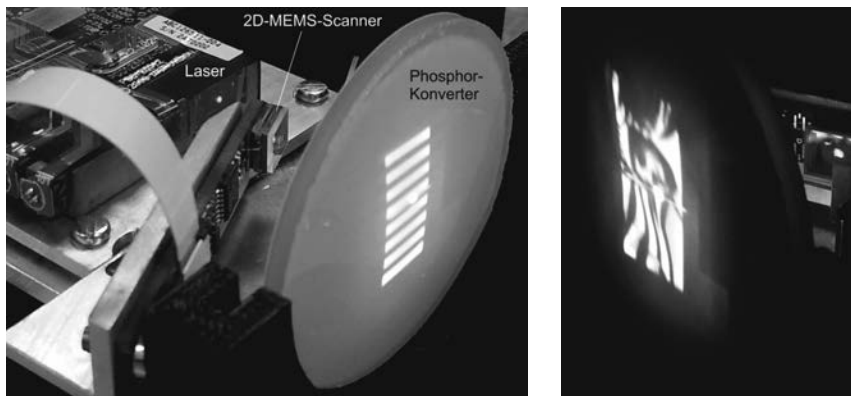


Bild 1: Strukturierte Weißlichtquelle basierend auf einem zweiachsigen von Fraunhofer ISIT gefertigten hermetisch vakuum-gekapselten Resonanz-Scanner, der den Strahl eines blauen Lasers über einen Phosphor-Schirm scannt und dabei 1024 x 512 Bildpunkte erzeugt.

2. Anforderungen an den MEMS-Scanner

Der MEMS-Scanner muss in der Lage sein, den Laserstrahl mit hoher Geschwindigkeit horizontal und vertikal über den Phosphor abzulenken. Die erforderliche Mindestfrequenz ergibt sich aus der Anzahl der zu projizierenden Zeilen mit der Anzahl der pro Sekunde wiederzugebenden Vollbilder. Bei einer angenommenen Bildwiederholrate von 200 Hz und einer angenommenen Zeilenauflösung von 100 Zeilen resultiert eine Zeilenschreibfrequenz von 20 kHz. Da der MEMS-Scanner die Bildinformation bidirektional schreibt, ergibt sich die Mindest-Anforderung für die Schwingungs-Frequenz des MEMS-Scanners von 10 kHz - für die hier nur beispielhaft angenommene Auflösung. In Bild 2 ist ein solcher zweiachsiger MEMS-

Scanner mit einer schnellen Horizontal-Achse und einer langsameren Vertikal-Achse wiedergegeben.

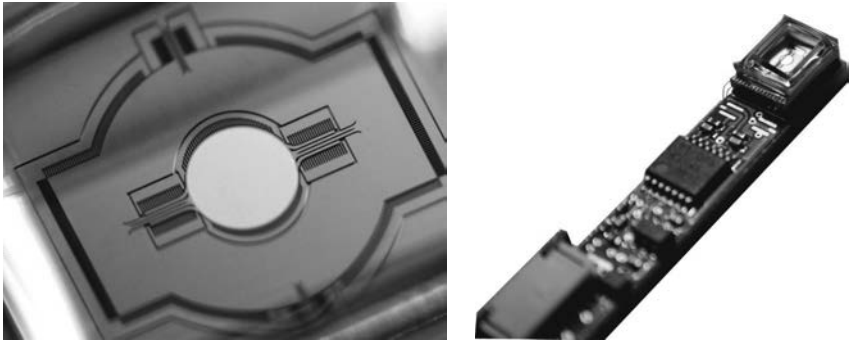


Bild 2: Hermetisch vakuum-gekapselter zweiachsiger MEMS-Scanner mit schräg gestelltem optischem Fenster. Die Spiegelplatte ist an seitlichen Torsionsfedern aufgehängt und wird durch elektrostatische Kräfte zu Schwingungen um die Ruhelage angeregt. Die Spiegelposition wird in beiden Achsen kapazitiv erfasst und erlaubt dadurch die exakte Synchronisation der Laseransteuerung.

Bedingt durch das Strahlprofil geeigneter blauer Laserquellen und bedingt durch die hohe erforderliche Laserleistung von bis zu 30 Watt kommen für die Realisierung adaptiver Laser-Phosphor-Scheinwerfer MEMS-Scanner mit einem Spiegeldurchmesser größer 3 mm in Frage. Eine hochreflektierende dielektrische Verspiegelung wäre grundsätzlich einer metallischen Beschichtung vorzuziehen, um den thermischen Eintrag gering zu halten. Es kann sonst bei zu hoher Absorption der metallischen Verspiegelung oder bei zu klein gewähltem Spiegeldurchmesser schon bei Laserleistungen von wenigen Watt zum Verdampfen der Reflektions-Schicht kommen. Dielektrische Vielschichten haben jedoch ihrerseits den Nachteil, dass sie durch den intrinsischen Stress die Spiegelplatte verbiegen und damit die Strahlaufweitung erhöhen, was letztlich einen Verlust an optischer Auflösung bedeutet. Der durch die dielektrische Beschichtung induzierten Spiegelverbiegung kann entgegengewirkt werden, indem man die typischen Standard-Dicken von MEMS-Scannern zwischen 30 μm und 80 μm verlässt und den Spiegel in der vollen Waferdicke von beispielsweise 725 μm realisiert [1]. Der resultierende Krümmungsradius derartiger Spiegel liegt trotz dielektrischer HR-Beschichtung ($R > 99,9\%$) zwischen 30 m und 1000 m. Dies hat jedoch zugleich eine erhebliche Erhöhung des Massenträgheitsmoments zur Folge. Um weiterhin hohe Scanfrequenzen

erzielen zu können, ist es dann erforderlich, auch die Federaufhängungen in voller Substratdicke zu realisieren. Während sich dies zwar einerseits günstig auf die thermische Anbindung der Spiegelplatte an den Chiprahmen auswirkt, hat es gleichzeitig eine hohe Steifigkeit der Federaufhängung zur Folge, was wiederum entsprechend hohe Antriebskräfte voraussetzt. Am Fraunhofer ISIT hat man diese Problematik lösen können, indem man eine hermetische Vakuum-Verkapselung der MEMS-Scanner eingeführt hat, mit der es erstmalig möglich wurde, bis zu 20 mm große Spiegel bei hohen Scangeschwindigkeiten anzutreiben (siehe Bild 3). Derart große MEMS-Scanner kommen inzwischen in der Laser-Material-Bearbeitung beim Schneiden von Stahlblechen zum Einsatz, wo mittlere Laserleistungen von bis zu 4,5 kWatt mit Scanfrequenzen im Kilohertz-Bereich abgelenkt werden müssen.

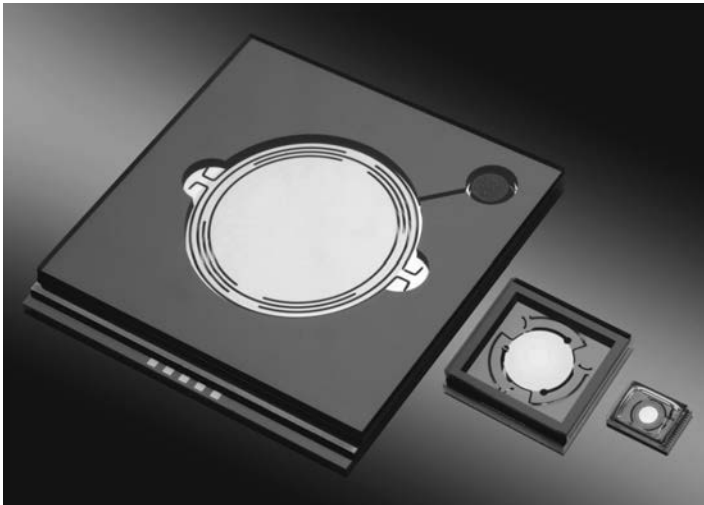


Bild 3: Hermetisch vakuum-gekapselte zweiachsige MEMS-Scanner mit Spiegeldurchmessern zwischen 2 mm und 20 mm.

MEMS-Scanner lassen sich in zwei Kategorien unterscheiden: Rasterscanner und Lissajous-Scanner. Beim Raster-Scanner wird eine schnelle, resonant betriebene Achse für die Zeilenablenkung kombiniert mit einer langsamen, nicht-resonant betriebenen Vertikal-Ablenkung, welche die Bildwiederholrate definiert. Während der Resonanzbetrieb der schnellen Achse eine sehr robuste Konstruktion darstellt, erfordert die nicht-resonant betriebene langsame Achse eine sehr weiche und daher in Bezug auf Schock und Vibration empfindli-

chere Konstruktion. Dies lässt sich unmittelbar folgendermaßen einsehen: Die resonant betriebene Achse stellt einen Energie-Speicher dar, der über viele Hundert oder gar über viele Tausend Schwingungen Energie akkumulieren kann und dabei seine Schwingungsamplitude so lange vergrößert, bis die Dämpfung einen weiteren Amplituden-Zuwachs verhindert. Die durch Dämpfung während jeder Schwingung verbrauchte Energie ist dabei sehr viel geringer als die im schwingenden Resonator gespeicherte Energie. Das Schwingungs-System kann daher mit vergleichsweise geringen Kräften betrieben werden. Anders sieht es in Hinsicht auf die langsame, nicht-resonant betriebene Achse des Raster-Scanners aus. Da diese nicht in Resonanz betrieben wird, ist sie nicht in der Lage, über viele Schwingungen hinweg Energie zu akkumulieren. Sie verbraucht in jedem Bewegungs-Zyklus exakt die volle von außen zugeführte Energie. Damit dennoch ausreichend große Auslenkungen und Scanwinkel erreicht werden können, ist es erforderlich, eine bedeutend weichere Federaufhängung zu wählen, als es im Fall der schnellen Achse möglich ist. Durch die weiche Federaufhängung nimmt zugleich aber auch die Empfindlichkeit der langsamen Achse gegenüber Schock und Vibration zu. Die Resonanzfrequenz der langsamen Achse eines Raster-Scanners liegt daher in der Regel innerhalb des sich bis mindestens 2 kHz erstreckenden Vibrationsspektrums eines Automobils. Daher ist es bei diesem Ansatz als Nachteil anzusehen, dass Fahrbahn-Unebenheiten zur Anregung der Eigenresonanz führen und dadurch mehr oder weniger ausgeprägte Störungen der Scheinwerfer-Projektion verursachen können.

Die zuvor geschilderte Problematik der Raster-Scanner lässt sich mit Lissajous-Scannern auf einfachste Weise umgehen. Bei Lissajous-Scannern werden beide Achsen in Resonanz betrieben. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass beide Achsen als Energiespeicher dienen, deshalb mühelos große Scanwinkel erreichen und mit kompromisslos robusten Federaufhängungen versehen werden können, dergestalt, dass die Resonanzfrequenzen jeweils deutlich oberhalb des Vibrationsspektrums liegen. Beispielsweise können beide Scanfrequenzen oberhalb von 10 kHz angesetzt werden. Das korreliert mit einer extrem belastbaren MEMS-Scanner-Struktur, deren Betrieb und Funktion durch Schock und Vibration nicht zu stören ist. Eine robuste MEMS-Scanner-Struktur, die zwei annähernd gleich schnelle Achsen bereitstellt, ist in Bild 4 dargestellt.

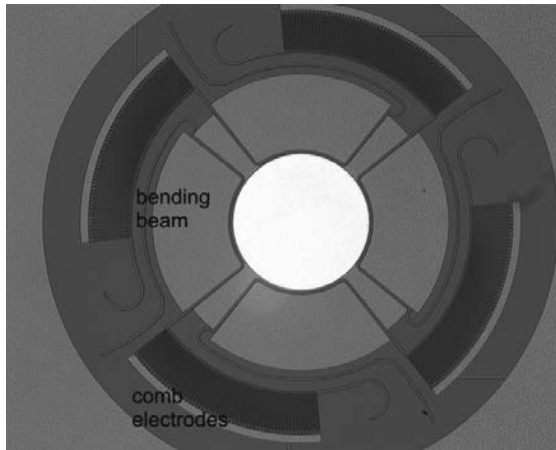


Bild 4: MEMS-Scanner-Design mit zwei annähernd gleich schnellen resonanten Achsen, mit Scanfrequenzen oberhalb von 10 kHz, ausgelegt für Lissajous-Projektion [2].

Besonders vorteilhaft ist eine Wahl der Scanfrequenzen der beiden Achsen derart, dass sie sich nur um wenige Hundert Hertz unterscheiden. Die daraus resultierende Lissajous-Figur erfasst in diesem Fall die gesamte Fläche nahezu simultan - der Struktur eines Maschen-drahtzaunes ähnelnd. In Bild 5 ist die Abtastung einer rund 10.000 Bildpunkte umfassenden Fläche basierend auf dem simulierten Scanvorgang eines MEMS-Scanners mit Scanfrequenzen von 10.801 Hz und 11.206 Hz wiedergegeben. Die zunächst noch verbliebenen Zwischenräume sind nach 8 Millisekunden vollständig abgetastet.

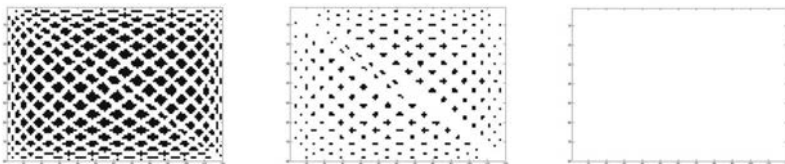


Bild 5: Abtastung einer 10.000 Bildpunkte umfassenden Fläche bei einem simulierten Scanvorgang mit einem Lissajous-MEMS-Scanner dessen Scanfrequenzen 10.801 Hz und 11.206 Hz betragen. Dargestellt ist die sequentielle Abtastung (weiße Linien) nach 1/400 Sekunde, 2/400 Sekunde und 3/400 Sekunde.

Neben vielen Vorteilen des Lissajous-Scanners bringt der Resonanz-Betrieb in beiden Achsen jedoch auch einen speziell für die Scheinwerfer-Anwendung bedeutenden Nachteil mit sich. In Folge der höheren Verweildauer des MEMS-Scanners in den Umkehrpunkten der beiden Achsen, ergibt sich eine deutliche Intensitäts-Überhöhung jeweils an den Rändern der gescannten Fläche. Beim Rasterscanner resultiert eine derartige Intensitäts-Überhöhung nur an den Rändern links und rechts, weil nur die Horizontal-Achse resonant betrieben wird. Bei Lissajous-Scannern hingegen existiert diese Intensitäts-Überhöhung umlaufend an den Rändern, während das Zentrum der gescannten Fläche die geringste Lichtintensität aufweist. Für die Scheinwerfer-Anwendung ist jedoch genau der inverse Fall gewünscht. Das Intensitätsmaximum sollte im Zentrum liegen, während die Intensität zu den Rändern hin abnehmen sollte. Dies wurde in der Vergangenheit als Grund dafür angeführt, dass man das Lissajous-Scan-Verfahren für die Scheinwerfer-Applikation nicht sinnvoll anwenden könne. In diesem Beitrag wird die Auffassung vertreten, dass der Lissajous-Scanner-Ansatz dem Raster-Scan-Ansatz deutlich überlegen ist. Wie die zuvor geschilderte Problematik der Intensitäts-Überhöhung am Rand trotz des in beiden Achsen resonanten Betriebs des MEMS-Scanners überwunden werden kann, soll im folgenden Abschnitt detailliert erläutert werden.

3. Lissajous-Scan-Verfahren mit dynamischer Lichtumverteilung

Das hier vorgeschlagene Scan-Verfahren beruht auf einem neuartigen Betriebs-Modus des resonanten Lissajous-Scanners. Ziel des Verfahrens ist es, die unerwünschte Intensitäts-Erhöhung an den Rändern speziell oben und unten zu beseitigen, und mehr Licht in das Zentrum der gescannten Fläche zu "transportieren" bzw. umzuverteilen.

Die zugrunde liegende Idee zur Bewerkstelligung dieser dynamischen Lichtumverteilung besteht nun darin, mit dem blauen Laser in rascher Abfolge nacheinander Flächen unterschiedlicher Größe auf dem Phosphor abzuscanen und dadurch eine gewünschte Veränderung der ortsabhängigen mittleren Verweildauer des Scanners bzw. Lasers zu erzielen. Dieser Vorgang muss zeitlich schnell genug erfolgen, so dass für den Fahrer und andere Verkehrsteilnehmer keine Flacker-Artefakte wahrnehmbar sind. Die schematische Darstellung des Verfahrens ist in Bild 6 wiedergegeben. Ausgehend von einer zunächst maximal ausgeleuchteten Fläche mit hellen Rändern werden durch Modulation der Schwingungsamplitude des MEMS-Scanners in den darauffolgenden Intervallen sukzessiv kleinere Flächen ausgeleuchtet, ehe die Modulation die Flächen anschließend wieder größer werden lässt.

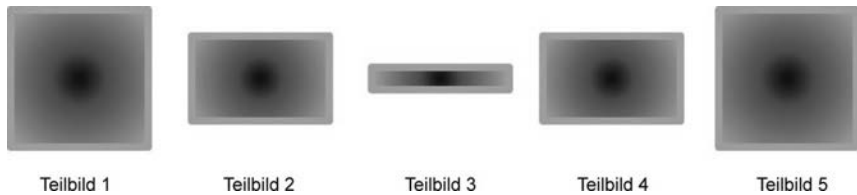


Bild 6: Schematisch vereinfachte Darstellung der Lichtumverteilung durch rasche sequentielle Variation der gescannten Fläche. Indem die vertikale Ausdehnung der gescannten Fläche rasch verändert wird, ergibt sich eine räumlich-zeitlich integrierte Ausleuchtung, die zentral höhere Intensität besitzt als am oberen und unteren Rand der maximal ausgeleuchteten Fläche. Um diese Amplituden-Modulation zu erzielen, muss der MEMS-Scanner so angesteuert werden, dass der resonanten Schwingung innerhalb kurzer Zeit Energie entzogen und anschließend wieder zugeführt wird.

Dass sich diese zunächst nur erdachte theoretische Lösung tatsächlich umsetzen lässt und zu dem gewünschten Ergebnis führt, zeigen die in Bild 7 und Bild 8 wiedergegebenen Resultate des ersten experimentellen Versuches unter Verwendung eines vakuum-gekapselten elektrostatisch betriebenen zweiachsig resonanten MEMS-Scanners. Beide Achsen besitzen eine Resonanz-Frequenz (Scanfrequenz) von rund 15 kHz. Bild 7 zeigt die übliche störende Intensitäts-Überhöhung am Rand der gescannten Fläche bei Resonanzbetrieb in beiden Achsen ohne Anwendung einer Amplituden-Modulation. Der helle Fleck im Zentrum ist ein Reflex, der durch den Glasdeckel des vakuum-gekapselten MEMS-Scanners erzeugt wird und hier nicht weiter von Bedeutung ist. Man kann diesen mühelos durch Verwendung eines schräg gestellten Fensters aus dem Projektions-Bereich entfernen [3]. Wie Bild 8 zeigt, führt die gezielte Modulation der Schwingungs-Amplitude der Vertikal-Achse des MEMS-Scanners zu der gewünschten Lichtumverteilung, dergestalt, dass das Intensitätsmaximum im Zentrum liegt und zu den Rändern hin ein gradueller Übergang zu einem Intensitätsminimum resultiert. Der verwendete grüne Laser wurde dabei mit konstanter Ausgangsleistung betrieben. Die Intensitäts-Variation wird allein durch die gezielt beeinflusste Dynamik des MEMS-Scanners erzielt. Um die rasche Variation der Schwingungs-Amplitude des resonant betriebenen MEMS-Scanners zu erzielen, wird das Ansteuerungs-Signal so gewählt, dass es die Spiegelschwingung innerhalb eines bestimmten Intervalls dämpft und damit Energie entzieht, während der Spiegelschwingung im darauffolgenden Intervall wieder Energie zugeführt wird, so dass sich die Amplitude wieder vergrößert. Diese Amplituden-Modulation kann umso

schneller durchgeführt werden, je höher die Resonanzfrequenz des Spiegels ist und um so mehr Drehmoment pro Schwingung übertragen werden kann. Da sich die resultierende Intensitäts-Verteilung innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde einstellt, lässt sich diese Umschaltung des Scanvorgangs zur dynamischen Lichtverteilungs-Steuerung nutzen. Die vertikale Breite des in Bild 8 zu erkennenden hellen Bandes lässt sich durch die Tiefe der Amplituden-Modulation gezielt verschmälern oder verbreitern.

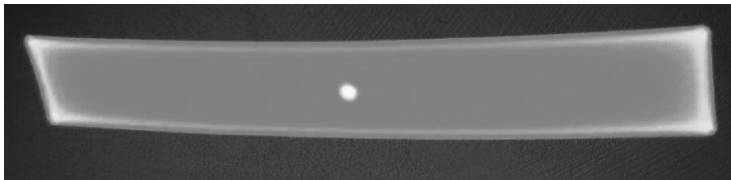


Bild 7: Typische unvorteilhafte Intensitäts-Überhöhung bei am Rand bei Standard-Lissajous-Betrieb. Der helle Fleck im Zentrum ist zu ignorieren, da es sich um einen Reflex am Glasdeckel des verwendeten Scanners handelt.

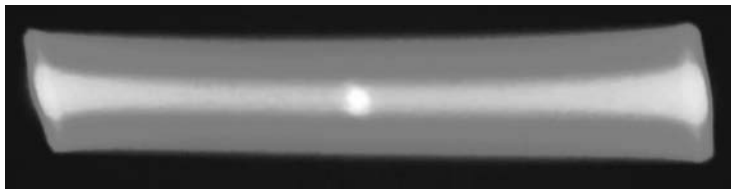


Bild 8: Umverteilung der Ausleuchtung durch schnelle Modulation der Amplitude des vertikalen MEMS-Scanner-Auslenkung.

Im Folgenden wird die dynamische Lichtumverteilung auch durch eine Simulation belegt. In Bild 9 ist die Amplituden-Modulation der resonanten Schwingung der Vertikal-Achse des MEMS-Scanners dargestellt. Die Amplitude der mit rund 15 kHz schwingenden Scanner-Oszillation wird durch ein geeignetes Antriebssignal, das abwechselnd bremst und beschleunigt, mit 200 Hz moduliert.

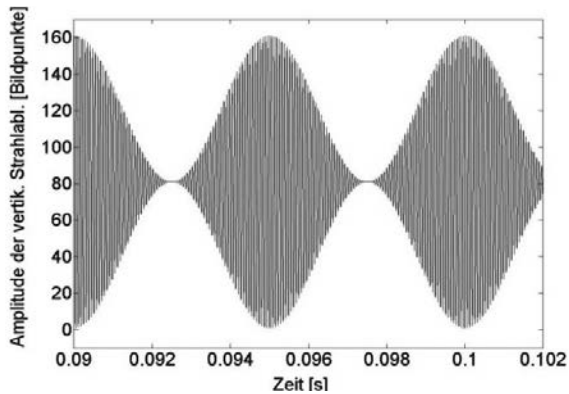


Bild 9: Modulation der Schwingungs-Amplitude des resonanten MEMS-Scanners, um die Lichtumverteilung zu erzielen.

Beträgt die Modulationstiefe der Amplituden-Modulation 0 %, so kommt es zur ursprünglichen störenden Intensitäts-Überhöhung an den Rändern (Bild 10). Bei einer Modulations-Tiefe von 20 % (bezogen auf den verwendeten Parameter) wandern die Intensitäts-Maxima vom oberen und unteren Rand in Richtung Zentrum (Bild 11). Bei einer Modulations-Tiefe von 50 % (bezogen auf den verwendeten Parameter) ist die Intensität im Zentrum maximal und am oberen und unteren Bildrand minimal (Bild 12).

Da sich die Amplituden-Modulation umso schneller durchführen lässt, je höher die Scan-Frequenz des Scanners ist, lässt sich dieses Lichtumverteilungs-Verfahren nur mit Lissajous-Scannern sinnvoll ausnutzen. Die Scan-Frequenzen können speziell in der vertikalen Richtung bis zu 60 kHz oder gar darüber hinaus betragen [4], um die Dynamik und die Vielseitigkeit der erzielbaren Ausleuchtungen zu optimieren. Grundsätzlich kann das Verfahren auch in beiden Achsen angewandt werden, um einen entsprechenden Intensitäts-Gradienten auch in horizontaler Richtung zu erzeugen. Wegen des in dieser Richtung größeren erforderlichen Gesamtscanwinkels erfordert diese Amplitudenmodulation jedoch einen stärkeren Aktuator als in der dazu orthogonalen Ausrichtung.

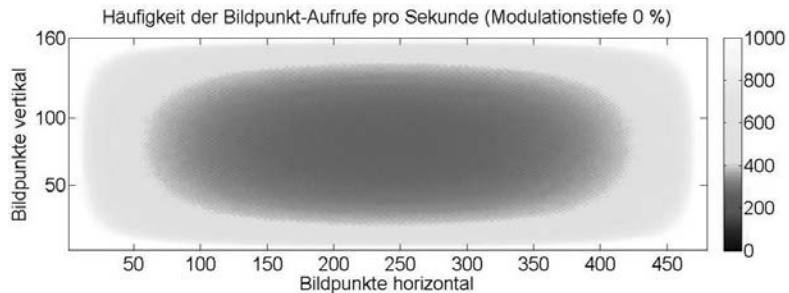


Bild 10: Simulierte Intensitäts-Verteilung des über den Phosphor gescannten Lasers ohne Amplituden-Modulation mit der typischen resultierenden Überhöhung am Rand. Die Intensität wird nur indirekt in Form von Zugriffen pro Zeiteinheit auf das jeweilige Pixel angegeben.

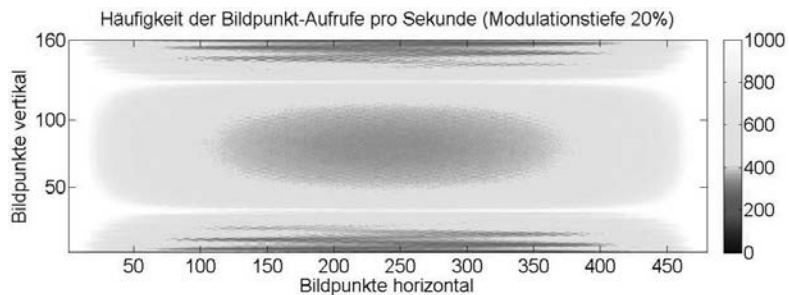


Bild 11: Simulierte Intensitäts-Verteilung bei einer Modulations-Tiefe von 20 %.

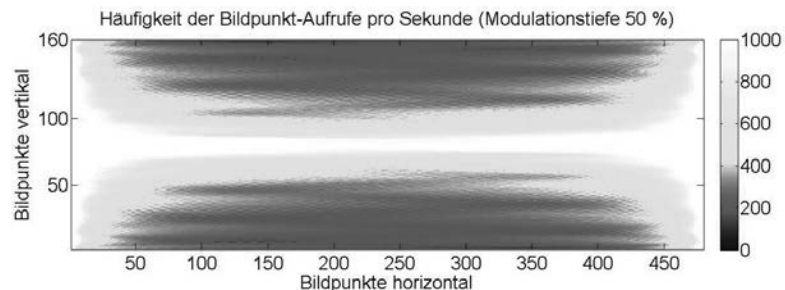


Bild 12: Simulierte Intensitäts-Verteilung bei einer Modulations-Tiefe von 50 %.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein neuartiges Verfahren basierend auf resonanten MEMS-Scannern vorgestellt, das bei Einsatz in einem Laser-Phosphor-Scheinwerfer dazu dienen soll, die Lichtverteilung effizient, dynamisch und situationsabhängig zu verändern. Gegenüber subtraktiven Verfahren bietet es den Vorteil, die zur Verfügung stehende Laserleistung vollständig (zu 100 %) zur Bestrahlung des Phosphor-Konverters zu nutzen. Die Intensitätsverteilungen können innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde verändert werden. Die Vielseitigkeit des Verfahrens steigt mit zunehmender Resonanzfrequenz des resonant betriebenen Lissajous-Scanners. Das stellt zugleich einen weiteren Vorteil dar, weil mit der Erhöhung der Resonanzfrequenzen zugleich auch die Robustheit des Scanners zunimmt. Die situationsabhängige Adaptation des resultierenden Laser-Scheinwerfers kann durch dieses Verfahren vielseitiger werden, denn zunächst wird die räumliche Basisverteilung effizient ohne Lichteinbuße verändert, ehe eine zusätzlich überlagerte Intensitäts-Modulation der Laserquelle auch noch hochaufgelöste Bildinformation zu übertragen erlaubt, die am Phosphor in weißes Licht übersetzt wird.

- [1] Senger, Frank; Hofmann, Ulrich G.; Wantoch, T. von; Mallas, Christian; Janes, Joachim; Benecke, Wolfgang; Herwig, Patrick; Gawlitza, Peter; Ortega Delgado, Moises Alberto; Gruhne, Christoph; Hannweber, Jan; Wetzig, Andreas, *Centimeter-scale MEMS scanning mirrors for high power laser application*, Proceedings of SPIE 9375, 2015
- [2] Hofmann, U.; Senger, F.; Janes, J.; Mallas, C.; Stenchly, V.; Wantoch, T. von; Quenzer, H.-J.; Weiss, M., *Wafer-level vacuum-packaged two-axis MEMS scanning mirror for pico-projector application*, Proceedings of SPIE 8977, 2014
- [3] Hofmann, U.; Janes, J.; Quenzer, H.-J.; *High-Q MEMS Resonators for Laser Beam Scanning Displays*, Micromachines 3(2), 2012
- [4] Gu-Stoppel, S.; Janes, J.; Quenzer, H.-J.; Hofmann, U.; Benecke, W., *Hocheffizienter piezoelektrischer Mikrospiegel mit hohen Frequenzen und Amplituden*, Mikrosystemtechnik-Kongress Aachen, 2013



VDE

Mess- und
Automatisierungstechnik
Optische Technologien

ISBN 978-3-18-092278-2

<https://doi.org/10.51202/9783180922782> - Generiert durch IP 218.73.218.36, am 20.01.2025, 12:45:52. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede unerlaubte Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts in Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.