



8. VDI-Fachtagung

Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik

Karlsruhe, 05. und 06. Juni 2018

Bildquelle: © HELLA KGaA Hueck & Co

VDI-BERICHTE
Herausgeber:
VDI Wissensforum GmbH

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

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

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

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

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

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

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

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092323-9

Inhalt

Vorwort	1
-------------------	---

► Lichtquellen

Benefits of Electronics Integration into LED Components	3
S. Grötsch, U. Hiller, J. Reill, R. Huber, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg	
Evolution und Anwendung von Automotive-LASERLichtquellen im Kraftfahrzeug-Scheinwerfer	15
M. Licht, Automotive Lighting, Reutlingen	

► Hochauflösende Scheinwerfertechnologien

Technologische und physiologische Bewertung eines hochauflösten Laserscanner-Scheinwerfersystems	23
P. Ansorg, AUDI AG, Ingolstadt; Lichttechnisches Institut KIT, Karlsruhe; M. Fischer, AUDI AG, Ingolstadt; Zentrum für Optische Technologien, Aalen University; C. Möckel, LurexX optical GmbH, Ingolstadt; C. Neumann, Lichttechnisches Institut KIT, Karlsruhe	
Fusion zwischen Sensor- und Scheinwerfersystem – Abstandsmessung durch aktive Triangulation mit Laserlicht	35
S. Mates, J. Stoll, W. Stork, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach Forschungszentrum Informatik am Karlsruher Institut für Technologie Karlsruher Institut für Technologie, ITIV	
Hochauflösender LCoS Scheinwerfer	49
J. Roth, I. Petermann-Stock, Volkswagen AG, Wolfsburg	
Aktiver Scheinwerfer mit DMD-Technologie zur Erzeugung vollständiger Lichtverteilungen	61
M. Knöchelmann, A. Wolf, G. Kloppenburg, R. Lachmayer, Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau	
Digitalisierung des Lichts – Unterstützung des Fahrers in unfallträchtigen Situationen	79
C. Wilks, B. Kubitz, HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt	

Bewertungskriterien für die Zulassung lichtbasierter Fahrerassistenz	87
P. Jahn, C. Neumann, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI), Karlsruhe	
Symbolische Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion	95
J. Reschke, P. Rabenau, M. Hamm, AUDI AG, Ingolstadt; C. Neumann, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe	
Tiefenwahrnehmung basierend auf aktuellen Scheinwerferentwicklungen	107
C. Schneider, C. Haas, M. Akmal, S. Söhner, T. Schaal, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach; W. Stork, KIT, Karlsruhe	
Akzeptanz von Registrierungsfehlern in einem Augmented Reality Head-up-Display	129
V. Sadovitch, M. Wittkämper, Volkswagen AG, Wolfsburg	
Langnachleuchtende Luminophore zur Anwendung im Bereich des hochautomatisierten Fahrens	145
J. Arras, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe	

► Visualisierung und Simulation

Messmethoden zur Bewertung dynamischer Blendsituationen	147
M. Helmer, C. Neumann, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)	
Durchgängige simulative Evaluierung von Lichtfunktionen	159
S. Strebel, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach; C. Neumann, KIT – Lichttechnisches Institut, Karlsruhe	
Systemverifikation hochkomplexer Lichtquellen – Ein notwendiger Schritt auf dem Weg zu hochauflösenden Scheinwerfersystemen	173
B. Kleinert, M. Marutzky, T. Uekermann, S. Bogdanow, IAV GmbH, Gifhorn; T. Liebetrau, S. Stögner, Infineon Technologies AG, Neubiberg	

► Kommunikation und Wirkung von Licht

Animierte Leuchten-Funktionen: "Spielereien" als Vorreiter visueller Car-to-X Kommunikation 183
M. Ritter, C. Adikari, M. Richter, Automotive Lighting, Reutlingen

Realisierungsmöglichkeiten für hochauflöste Umfeldprojektionen im Automobil – Bewertung unterschiedlicher Technologien 193
C. Bremer, BMW AG, München, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe;
C. Neumann, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe;
B. Lewerich, BMW AG, München

Erster Ansatz zur abbildenden Umsetzung einer hochauflösenden Signalleuchte für automatisiertes Fahren 207
J.-H. Willrodt, Institut für Automobile Lichttechnik und Mechatronik (L-LAB), Lippstadt
A. Klarius, HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt;
J. Wallaschek, Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS) der Leibniz Universität Hannover

Auswirkungen von Mesostrukturen im Fahrzeuginnenraum auf die Reflexionseigenschaften 219
M. Schöneich, Daimler AG, Sindelfingen;
C. Neumann, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut Karlsruhe;
R. Lachmayer, Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

► Signalfunktion

Progressive LED-Blade-Technologie für eindrucksvolle Fahrzeugleuchten – Eindrucksvoll, robust und kostengünstig 233
T. Hornung, A. Ebenbichler, M. Vollmer, odelo GmbH, Stuttgart

Diffraktive Diffusoroptiken als Ersatz für Volumenstreuer 245
M. Mügge, HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt

Innovationspotenzial in der automobilen Lichttechnik – Vergleich Exterior vs. Interior 265
D. Decker, Senior Consultant, PGUB Management Consultants GmbH, Bickenbach

Vorwort

In der automobilen Lichttechnik findet seit einigen Jahren eine Revolution statt. So sollen Fahrzeuge nicht nur besonders emissionsarm fahren, sondern auch den Fahrer bestmöglich unterstützen. Fahrerassistenzsysteme z.B. sind daher heute fester Bestandteil neuer Fahrzeuge. Kunden können hier aus einer Vielzahl von Systemen wählen, die zu großen Teilen auf neuen Entwicklungen aus dem Bereich der optischen Technologien basieren.

Diese und weitere Technologien steigern den Komfort sowie die Sicherheit für den Fahrer. Aber sie werden auch immer wichtiger im Zusammenhang mit dem Trendthema „Autonomes Fahren“. Trotz ihrer Einbindung in die Entwicklung neuer Technologien beschäftigt sich die Branche natürlich auch weiterhin leidenschaftlich mit den ‚klassischen‘ Themen wie z.B. Fahrzeuginnen- und Außenbeleuchtung, Lichterzeugung und neue -quellen sowie Scheinwerfertechnologien. Auch auf diesem Feld gibt es immer neue Anforderungen und Wünsche von Herstellern und Endkunden.

Unter der fachlichen Trägerschaft der VDI/VDE-Gesellschaft GMA greifen Experten im Juni 2018 diese Entwicklung zum achten 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 und Kameratechnik sowie Forschungsinstitute.

Der Programmausschuss unter der fachlichen Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann vom Lichttechnischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie freut sich über Ihre 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, Stuttgart

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

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

Dipl.-Ing. (TU) Peter Löbigs, 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

Dr. Ina Petermann-Stock, Volkswagen AG, Wolfsburg

Dipl.-Wirtsch.-Ing Jörg Michael Zimmermann, Continental Automotive GmbH,

Regensburg

Ideeelle Träger



Benefits of Electronics Integration into LED Components

Vorteile der Elektronikintegration in LED-Komponenten

Stefan Grötsch, Uli Hiller, Joachim Reill, Rainer Huber,
OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg

Abstract

Integration of electronics into LED components allows to incorporate new functions. The amount of individual LEDs can substantially increase through reduced system complexity. Simplification in control can go along with thermal benefits. This is true for automotive exterior as well as for interior illumination, where addressable RGB-LEDs enable simplified adjustable colours.

1. Introduction

Up to now LED components hardly show any integrated electronics. The combination of light generation and intelligent control was only seen in modules of the next level in the value chain. In this paper we show how a change in this setup will give advantages and open new possibilities.

2. Adaptive Driving Beams (ADB) / Adaptive front-lighting Systems (AFS)

For many years we know that driving at night goes along with an accident risk about twice as high than driving during daytime. About one third of fatal car passenger accidents happen in the night. The rate of fatal accidents for passengers per driven distance is about four times higher than during daytime. [1] Adaptive front lighting therefore improves the night time safety.

2.1 Illumination vs. Visualization

Looking at a complex night time road situation as shown in Fig. 1 left, driving with low beam to avoid glare for other traffic participants (Fig. 1 right), goes along with discomfort by the lack of viewing range.



Fig. 1: Complex night time traffic situation, illuminated with low beam pattern

In the past adaptive front lighting was done with mechanical shutters. The modifications of the light distribution are covered in the UN ECE regulation number 123 [2]. There we find beam modifications like motor way light, a low beam lifted up by roughly a quarter of a degree. Modified beam pattern widths of the low beam e. g. to cover different scenarios for inner city or for country roads were also implemented. In the first half of this decade also LED pixel systems were introduced. Fig. 2 shows how addressable LED segments form an adaptive driving beam.



Fig. 2: Situation illuminated with fixed low beam and adaptive driving beam by addressable LEDs

To better differentiate the pixelated forward lighting developments we introduce the term illumination and visualisation to differentiate the functional beam patterns from displaying information in the beam pattern. Fig. 3 illustrates the current vision to improve the illumination scenario by switching to a high resolution two-dimensional (2D) pixel array.

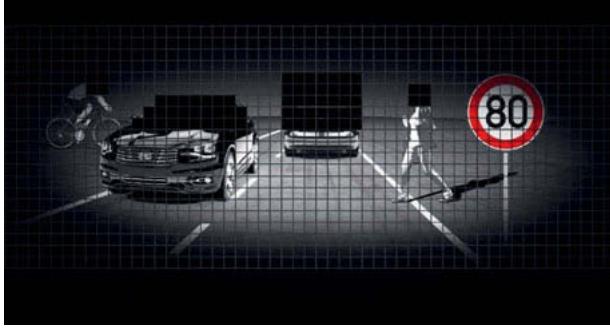


Fig. 3: Scenario illuminated with a high resolution pixel array light source

The conventional AFS /ADB light distribution patterns in the context of the UN ECE regulation 123 can be summarized in the category illumination.

On the other hand further ideas beyond the pure light distribution and glare aspects are proposed. These features are mainly active in the foreground of the lamp beam pattern, way below the cut-off line at the horizon. Fig. 4 shows an example of additional guiding track patterns on the road in a work zone. Giving an example of communication towards the driver for active safety support. Also pedestrians can be addressed with such visualization scenarios. In Fig. 5 the lamp projects a pedestrian crossing on the street. This is just an example for one of the most critical communication needs in the night drive situation. Pedestrians cannot see the driver to find out whether or not they are perceived. In general this spans lighting applications with the focus on visualization of information rather than the pure illumination of the scenery.

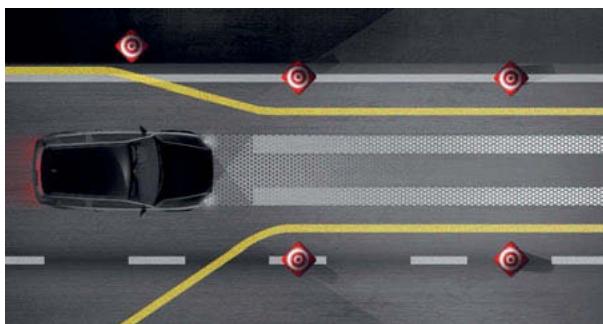


Fig. 4: Track assistant in work zone

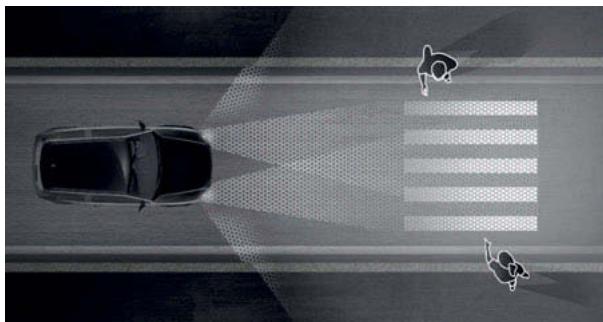


Fig. 5: Visualization of a pedestrian crossing projected by the lamp

Fig. 6 illustrates the different field of view for the two different applications. Illumination covers a rather large angular range where we see visualization to be focused on a rather small area below the cut off line on the road.

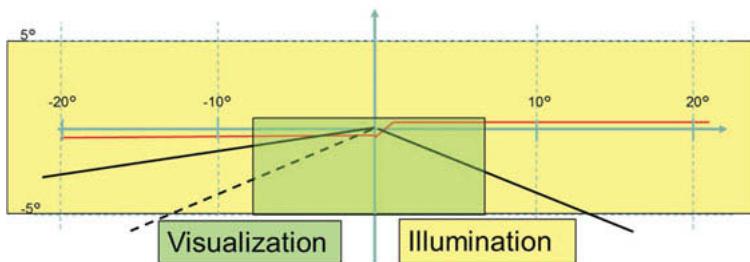


Fig. 6: Field of view for illumination and visualisation

2.2 Pixel light systems

When it comes to the pixelated sources for front lighting systems, there are two fundamental concepts. On the one hand we see subtractive light modulators on the other there are additive pixel arrays. The first ones use spatial modulators known from projection technology like liquid crystal displays [3] (Fig. 7 left) or Digital Mirror Devices [4] (Fig. 7 right). They need light sources operating at a high luminance to minimize the size and cost of the micro displays. In the case of LEDs this causes low efficiency at the light source. Furthermore if you switch individual pixels from on to off, the illuminating light source will remain powered up keeping the power consumption high without contributing to the road illumination. Solutions with several light sources for the illumination of the micro display can support local dimming and cut the energy consumption slightly whenever large areas of the image content e. g. the high beam part become black.

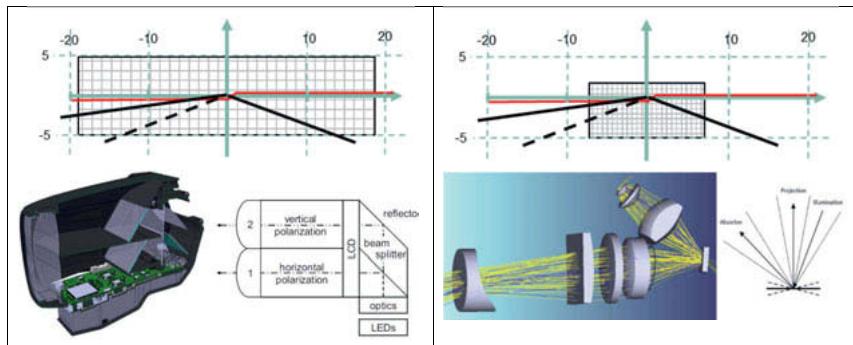


Fig. 7: Left: LCD Lamp concept [3] upper part illustrating the illuminated field of view
Right: Digital Mirror Device concept [4] with field of view being smaller

Their big advantage is the high marketable pixel number. The modulators applied for video with up to HD resolution bring more pixels than we need in a lamp application.

On the other hand active LED pixel arrays represent the energy optimized approach. Fig. 8 left shows the current state of the art approach to realize an adaptive illumination based on discrete LEDs. A sophisticated primary optics is stretching the top and bottom pixel row to cover several degrees vertically but maintaining an overall horizontal resolution of $\sim 1.2^\circ$ [5]. This reduces the required number of LEDs and enables the use of conventional integration methods. A substantial increase of active pixels requires the integration of the driver electronics and the active LED part on semiconductor levels. Fig. 8 right illustrates the approach of the EVIYOS LED. Here a large pixel array chip is directly connected to the active silicon addressing the individual sources. This allows to cut the need of 2 terminals per diode to the supply of power and a digital serial interface for a plurality of in this case 1024 LEDs [6]. The Field of view is covered by 4 units stitched side by side leading to a horizontal and vertical resolution of roughly 0.25° . [7].

The two concepts so far intend to cover the full field of view. Power consumption is according to the illumination scenario. This can also be seen in Fig. 9 where we see 2 arbitrary beam intensity distributions illuminated with four times a 1024 Pixel EVIYOS LED light source. The beam intensity directly modelled into the pixel brightness. The high beam has an average PWM value of $\sim 32\%$ leading to approx. 4500 lm out of the hypothetical 14000 lm with all LED pixels operating at full power. At an optics efficiency of 40% we end up with ~ 1800 lm on the road and a LED power consumption of ~ 46 W.

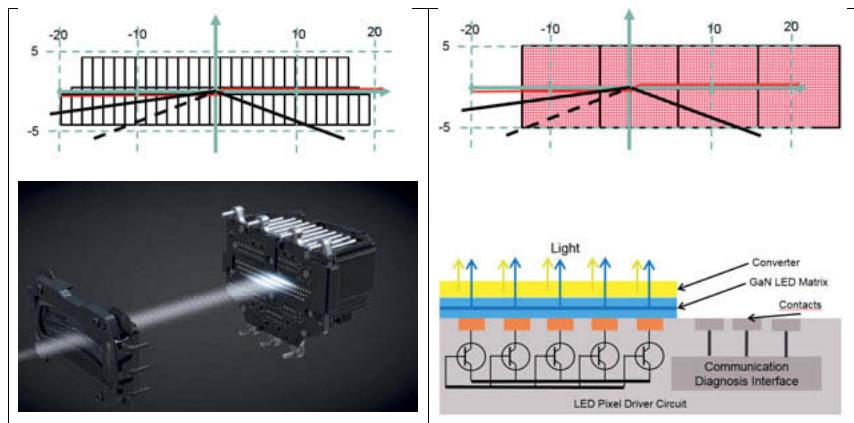


Fig. 8: Left: 84 LED pixel lamp unit with primary optics stretching the bottom and top LED row in the field of view. [5] [8] Right: Field of view covered by four units of an active integrated LED array [6] [7].

When the pixels above the cut off line go out for a low beam the average PWM of the array drops to only 18% at just 26 W consumed in the LEDs. The same optics would now put about 1000 lm out of the now 2500 lm on the road.

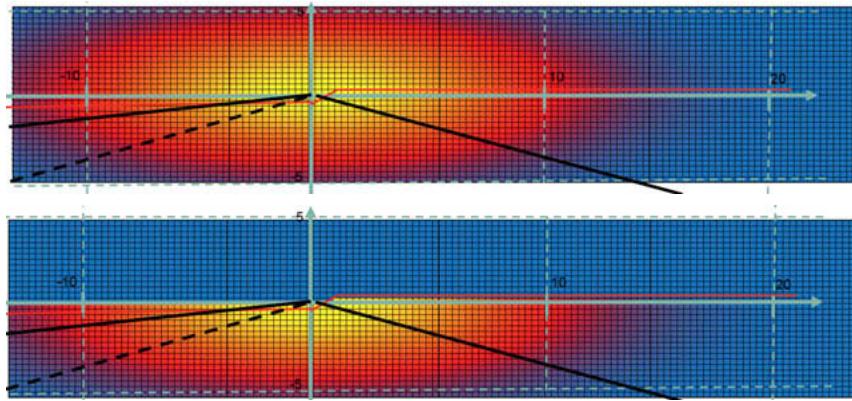


Fig. 9: Arbitrary full beam (top) and low beam (bottom) pattern based on four times 1024 pixels from Eviyos.

To estimate the power consumption of a lamp using 84 LED pixels we assume an average PWM value of approx. 33,3% and running the LEDs at 0,5 A and 3.2 V. This correlates to ~ 45 Watt. One potential light source technology for a DMD $\sim 0.55''$ in size are three OSLON BOOST having a 2 mm^2 emission area. These three LEDs operate between 4.5 and 6 A and ~ 3.5 V requiring 46 to 65 W. Fig. 10 shows the Power draw comparison of four approaches, 84 LED pixels, 4 Eviyos Units a plain DMD solution and a DMD solution combined with an 84 Pixel solution. In this comparison only the EVIYOS contains the power draw to regulate the LED current. The EVIYOS approaches increases the resolution in the full FOV without increasing the power consumption.

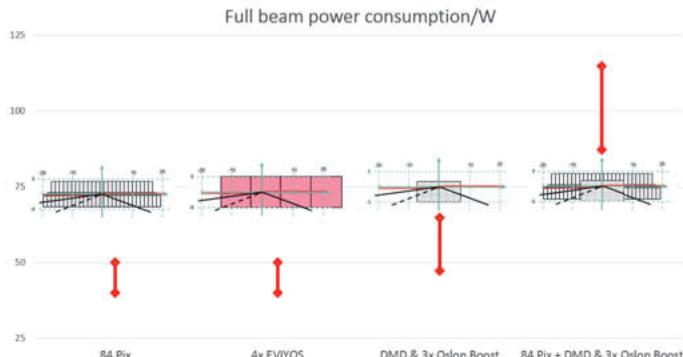


Fig. 10: Power consumption of a full beam pattern using various approaches

3. RGB Automotive Interior Applications

Over the last couple of years the application of RGB LEDs on the automotive interior has become increasingly popular. This trend is mainly driven by the fact that individualization of the automotive interior is a necessity in the future especially driven by autonomous driving and car sharing. In the first step a small number of RGB LEDs was used in different locations in order to realize ambient lighting functions that allow color tuning in dedicated areas (spots). RGB LEDs are also used to couple into suitable light guides in order to realize illuminated lines that are used to highlight contours within the interior design. All these applications required static light changes. So these systems typically use modules based on discrete components (LED, Microcontroller...). Communication for this static lighting functions is done via the LIN bus. Typical system requirements demand color stability within 0.01 in u'v' Color Space. These requirements have to be met under all operating conditions (full temperature range, all color points within the pre-defined color gamut, during the whole lifetime of the car). These requirements are not so easy to match without any additional effort. Therefore it is necessary that each module is calibrated "end of line" in order to reach that target even if the RGB LEDs are coming from the same bin. Due to the fact that the LED chips within an RGB LED are based on two different semiconductor materials (AlInGaP for Red, InGaN for Blue and Green) and their physical behavior differs in terms of temperature behavior and forward current behavior, it is necessary to adapt the individual driving of each LED chip based on the temperature and calibration of the device in order to stabilize the color over temperature. In

currently used RGB modules the LEDs are driven with battery voltage and therefore a lot of power is dissipated within the linear regulator of the IC. Fig. 11 shows a typical module setup and also summarizes the relevant parameters. A two sided FR4 PCB (size: 15mm x 11mm) with a thickness of 1.5mm and a Cu layer thicknesses of 35 μ m is used. The RGB LED is soldered to the top side of the board whereas the IC is soldered on the opposite side of the board. The LED driving conditions were chosen so that the red chip is run @ 25mA and 100% duty cycle (necessary for color stabilization over temperature) and the blue and the green @ 20mA with a maximum duty cycle of 50%.

Operating Mode: R 25 mA – G, B 20 mA duty cycle 50%

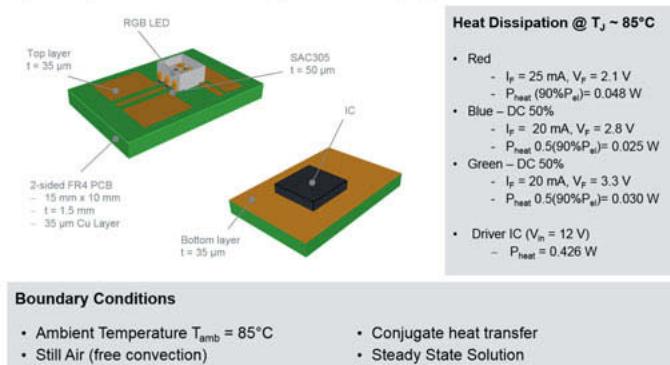


Fig. 11: Typical Module setup for an interior RGB LED application

Operating Mode: R 25 mA – G, B 20 mA duty cycle 50%

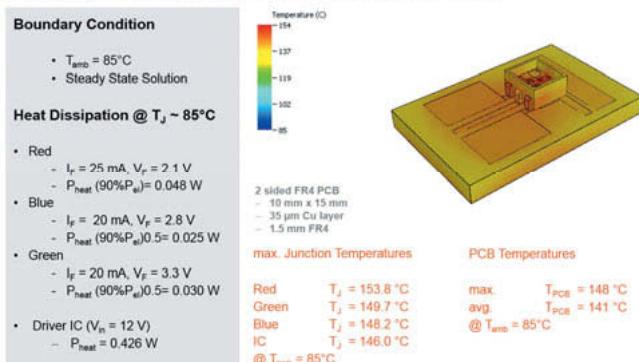


Fig. 12: Thermal simulation Results at ambient 85 °C

Fig. 12 shows the thermal simulation results for such a module at the maximum ambient operating temperature of 85°C. The results show that the junction temperatures of the semiconductors (LED Chips and IC) will reach about 150°C. The allowed junction temperature for the RGB LED is limited to 125°C.

From this analysis it can be clearly seen that the current RGB modules will be limited in the maximum LED driving conditions due to thermal restrictions. Therefore the achievable brightness levels of these RGB modules will also be limited.

3.1 Change from Static to Dynamic Lighting Functions

With the introduction of additional RGB LEDs it becomes feasible to realize RGB applications that don't only allow static functions but also allow to realize dynamic RGB effects within the automotive interior. Replacing an RGB light guide with a string of RGB LEDs that can be individually addressed, a lot of new lighting functions become feasible. It is possible to go from an RGB ambient mood light to functional lighting applications relevant in the context of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). Possible applications include collision alert functionalities as well as peripheral displays for reduction of motion sickness in autonomous driving modes.

Going from static RGB applications to dynamic applications requires significant changes in the overall system architecture for the applications. Dynamic scenarios require to transfer a significant amount of data. The bandwidth of the LIN bus is too small for dynamic scenarios and therefore alternative communication approaches will be required. In addition the supply voltage of the string needs to be decreased in order to reduce the thermal losses in the system. A local supply voltage of around 5V seems to be a good compromise between reduction of the thermal losses and enough headroom for driving the ASIC and LED chips. The lower voltage should also lead to significant advantages in terms of electromagnetic interference. Fig. 13 shows the general setup of such a system. A string of LEDs in daisy chain mode is connected to a gateway. The gateway is providing the local supply voltage for the LED chain and is also doing all the necessary communication to the other components of the car (light management modules via LIN or CAN) and the local communication within the daisy-chain of the RGB LEDs. The LED driving scenarios require a communication speed of the order 2Mb/s. The communication can be done bidirectional (data & module feedback). Communication with a differential signal within the chain will give significant benefits in terms of EMI.

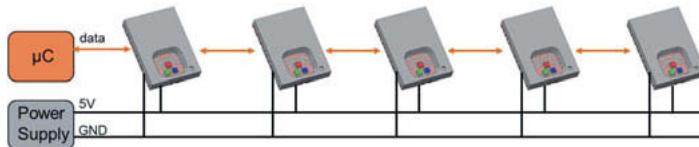


Fig. 13: LED setup with components in Daisy Chain mode connected to a gateway.

In general such a system can be built with discrete components where a single ASIC controls one or more RGB LEDs in the string. The drawback of such a system is the larger number of components required on the board resulting in higher assembly cost and larger size. In addition a calibration of each individual RGB LED is required after the board assembly in order to achieve the required color accuracy. The color accuracy also requires an algorithm that adapts the LED driving based on the junction temperature of each RGB LED. For a system based on discrete components the determination of the local LED Junction temperature for feeding the algorithm will be rather challenging. This adds significant complexity to the system.

Two principle system architectures are possible. Variant 1 is that the PWM driving scheme and therefore the adjustment of the color control as well as the temperature control is determined within the LED ASIC. Variant 2 is, that the PWM driving scheme is centrally handled by the master controller. With both versions advantages as well as disadvantages come along.

Variant 1 has its main advantages in the ease of use by the system integrator. The driving systematic is defined by the ASIC within the IC, which guarantees the same systematic even if the system integration is done by different system integrators into the car. Drawback is that the overall systematic needs to be within each ASIC of the LED component, which causes complexity necessary within each component.

Variant 2 brings its main benefits with the higher flexibility of the system and the freedom for the system integrator to generate a perfectly adopted system to each required scenario. In addition the ASIC complexity is lower in comparison to Variant 1 and the "intelligence" is only required within the master controller. Adjustments for different platform only requires software adjustments within the master controller. Those advantages come along with the necessary alignment of different system integration schemes, if this is used within one car platform. The two variants show, that it becomes a principle decision, which kind of system architecture is going to be used.

The Integration of the ASIC directly into each RGB LED results in a variety of benefits for the overall system. First of all the number of components required on the board will be significantly reduced resulting in decreased assembly cost, smaller size and reduced failure rates. Due to

the fact that the ASIC is part of the LED, the calibration data will be stored directly in the LED at the End of Line measurement of the LED supplier, and therefore no calibration is required on the customer side any more (auto-calibration). The ASIC on board will improve the accuracy in determination of the junction temperature significantly. So the temperature correction algorithm will result in better color accuracy. This topics were investigated in more detail with thermal simulation results. Fig. 14 shows the results for an RGB LED with an on board ASIC. The boundary conditions in terms of board material, LED driving conditions and ambient temperature are similar to the ones of the discrete module discussed earlier. The supply voltage for this dynamic RGB LED is reduced from 12V to 5V as previously mentioned. There is a very good correlation between the junction temperatures of the LED chips and the ASIC. The values are within 5°C and therefore the ASIC temperature which can be determined internally will be a very accurate input for the algorithm for color stability. The overall junction temperatures are reduced by about 25°C compared to the discrete modules due to the reduction of the voltage from 12V to 5V. Therefore the driving conditions can be maintained all the way up to 85°C ambient temperature resulting in brighter LEDs.

Operating Mode: R 25 mA – G, B 20 mA duty cycle 50%

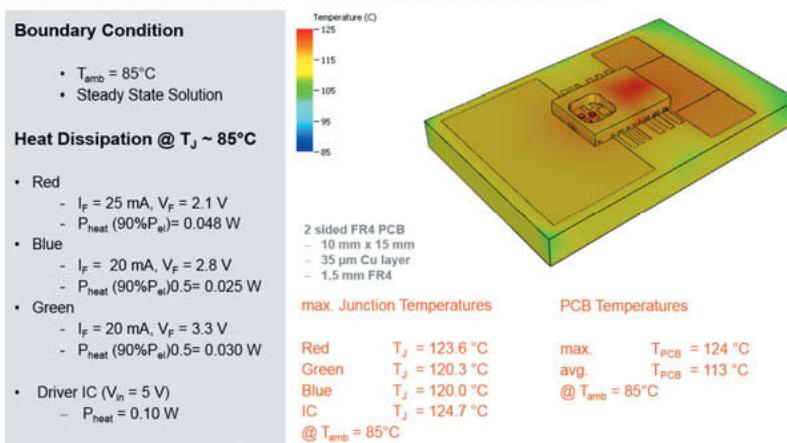


Fig. 14: Thermal simulation result of a RGB LED containing a controller ASIC.

4 Summary

The Integration of an ASIC directly into a RGB LED results in a variety of benefits for the upcoming dynamic RGB systems. The advantages comprise reduction of system cost, smaller module size, improved reliability, better color accuracy and improved thermal performance.

The passive light modulators in forward lighting applications provide high resolution. Potentially higher than we can make use of in the real world scenario with different road conditions and varying distances. The active pixel arrays keep power consumption low or even have the potential to even lower it while resolution can increase.

Literature

- [1] „Unfälle in der Dunkelheit,“ Deutscher Verkehrssicherheitsrat, Schriftenreihe Verkehrssicherheit, 2003.
- [2] „UN United Nations Economic Commission for Europe - Vehicle Regulations,“ [Online]. Available: <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs121-140.html>.
- [3] D. Duhme und B. Fischer, „Next Generation LCD Module,“ in *12th International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2017.
- [4] V. R. Bhakta und B. Ballard, „High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP® technology,“ in *11th International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2015.
- [5] B. Böke, M. Maier, J. Moisel und F. Herold, „The Mercedes-Benz Headlamp of the Future: Higher Resolution with Greater Intelligence for Enhanced Safety,“ in *11th International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2015.
- [6] S. Grötsch, A. Pfeuffer, T. Liebetrau, H. Oppermann, M. Brink, R. Fiederling, I. Möllers und J. Moisel, „Integrated High Resolution LED Light Sources in an AFS/ADB Headlamp,“ in *Proceedings International Symposium on Automotive Lighting*, p. 241-250, Darmstadt, 29.-30.9.2015.
- [7] C. Gut, M. Fiege und B. Böke, „DIGITAL LIGHT – Experiences with the development of high resolution headlights at Daimler,“ in *International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2017.
- [8] Mercedes-Benz, „www.youtube.com/,“ 08 03 2016. [Online]. Available: <https://youtu.be/oOJjvYPV3oc>.

Evolution und Anwendung von Automotive-LASER-Lichtquellen im Kraftfahrzeug-Scheinwerfer

Evolution and application of automotive LASER light sources in vehicle headlamps

Dipl.-Phys. **Martin Licht**, Automotive Lighting, Reutlingen

Kurzfassung

LASER bereichern schon seit über 50 Jahren viele Bereiche in Wissenschaft und Technik. So sind LASER heute aus vielen Anwendungen des täglichen Lebens nicht mehr wegzudenken. Daher ist es naheliegend, die Vorteile von Lasern als Lichtquelle im Scheinwerfer gewinnbringend nutzbar zu machen, wie zum Beispiel eine nahezu punktförmige Lichtquellenausdehnung oder hohe erreichbare Leuchtdichten, die sich u.a. in sehr hohe Ausleuchtungsreichweiten umsetzen lassen.

Das Debüt in einem Serienscheinwerfer von Automotive Lighting hatte der LASER im Jahre 2014 im AUDI R8. Zwischenzeitlich ist die Entwicklung fortgeschritten und eine Laserlichtfunktion gehört bereits bei mehreren Fahrzeugmodellen zur Optionsausstattung. In der so genannten 2. Generation von Laser-Scheinwerfern ist es das Ziel, diese Lichtquelle nicht nur als Fernlichtunterstützung, sondern auch zur Unterstützung von anderen Lichtfunktionen einzusetzen, damit die Gesamteinschaltzeit dieses komplexen Lichtquellen-Systems zum Nutzen des Fahrers deutlich erhöht wird. Hierzu ist die Erzeugung von Lichtverteilungen mit Hell-Dunkel-Grenzen notwendig, was zusätzliche Anforderungen an die Lichtquelleneigenschaften stellt. Damit würden dann adaptive kameragesteuerte Teilfernlichtfunktionen oder sogar das Abblendlicht durch den LASER unterstützt werden können.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die verschiedenen aktuellen Laserlichtquellen und beschreibt die Unterschiede bzgl. deren photometrischen Eigenschaften. Dabei werden die Möglichkeiten und Herausforderungen dargestellt, die diese Lichtquellen im Vergleich mit LED-Lichtquellen aufweisen, insbesondere bei der Erzeugung von anspruchsvollen Lichtverteilungen mit Hell-Dunkel-Grenze. Die Vor- und Nachteile von Laserlichtquellen im Vergleich zu LED-Lichtquellen werden dabei für unterschiedliche Lichtfunktionen differenziert betrachtet. In diesem Beitrag wird in besonderem Maße auf die lichttechnischen Eigenschaften des Lasers eingegangen, weitere wichtige Systemeigenschaften wie Lebensdauer, Thermomanagement oder Augensicherheit sind ebenso von Bedeutung, werden aber in diesem Beitrag nicht diskutiert.

Abstract

For more than 50 years, LASERs found their way into many different fields of Science and technology. Today, in many application of everyday use LASERs are incorporated. Therefore it is natural to try to use the advantages of LASERs as light sources also in modern vehicle headlamps, such as the nearly point-like size of the light emitting area, or high luminance which can be used to boost the range of highbeam light distributions.

The first introduction of a LASER light source in a series production headlamp from Automotive Lighting was in 2014 for the AUDI R8 LMX. Meanwhile, the development progress continued and up to now, several car models offer the option of headlamps with LASER.

In second generation LASER headlamps the goal is to expand the LASER light source field of use from auxiliary high beam function to support also other light functions. The ON- time of these complex LASER light source systems will be increased as well as the value for the driver. This requires the generation of light distributions with cutoff line with LASER light sources and as a result of this, additional requirements for the LASER light source arise.

This will provide the possibility to support adaptive camera controlled partial highbeam function or even lowbeam functions with LASER.

This contribution gives an overview of various existing automotive LASER light sources and shows up their photometric properties and differences between these. The different possibilities and challenges of these light sources will be discussed in relation to LED light sources, especially in the case of generation of light distribution with cutoff lines. The advantages and disadvantages of LASER light sources in comparison with LED will be evaluated.

This contribution will keep focus on the photometric properties of laser light sources. Other important system properties such as lifetime, thermal management or eye safety are also important, but will not be considered herein.

1. Einleitung

Das Thema Laser ist im Allgemeinen eher positiv besetzt. Laser werden als Hightech wahrgenommen und sind aus Lasershows, Medizintechnikanwendungen, Materialbearbeitung und insbesondere auch Science-Fiction bekannt. Charakteristisches Merkmal eines Lasers ist hierbei meist ein einfarbiger sichtbarer Strahl.

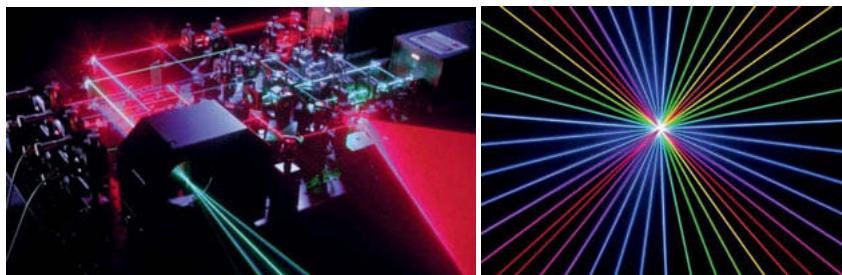


Bild 1: Zwei Ergebnisse der Google-Bildersuche zum Stichwort „LASER“ [1]

Diese Charakteristik gibt daher auch die Richtung für die Lichtfunktion eines Lasers vor, die ein potentieller Fahrer von einem Laserscheinwerfer erwartet.

Für die Laserlichtfunktion bedeutet dies auf der einen Seite, den Erwartungen des Fahrers möglichst gut zu entsprechen, auf der anderen Seite soll die Lichtfunktion dem Fahrer auch einen erkennbaren Mehrwert liefern, z.B. eine höhere Reichweite des Fernlichts oder eine insgesamt bessere Ausleuchtung zur Erhöhung von Sicherheit und Komfort.

Die Laserlichtfunktion ist jedoch den gleichen gesetzlichen Anforderungen unterworfen wie konventionelle LED-Lichtfunktionen, z.B. bezüglich maximaler Lichtstärke, Farbe der Lichtfunktion, Blendewerte u.ä. wodurch der Gestaltungsspielraum eingeschränkt ist.

Die Herausforderung für einen Laserscheinwerfer besteht darin, die oben genannten Anforderungen mit den zur Verfügung stehenden Laserlichtquellen zu bedienen. Die Möglichkeiten, die zur Gestaltung einer Laserlichtfunktion zur Verfügung stehen, hängen dabei stark von den Eigenschaften der Lichtquelle ab.

2. Automotive Laserlichtquellen und deren Eigenschaften

Der Ersteinsatz einer Laserlichtquelle, die mittels Phosphorkonversion weißes Licht erzeugt, erfolgte im Jahr 2014 mit dem Larpmodul von Osram im AUDI R8 LMX / BMW i8 als Zusatz-Fernlicht-Anwendung. Diese Scheinwerfer erreichen das gesetzliche Limit bezüglich Bestrahlungsstärke im Maximum und vergrößern die Reichweite (1 lx-Isolinie) auf über 600m.

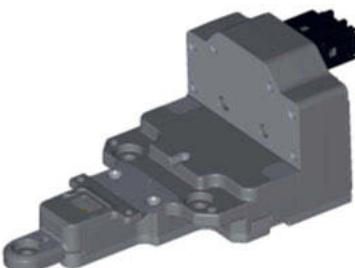


Bild 2: Lasermodul Larp 2 von Osram, eine der ersten für Automotive-Einsatz qualifizierten Laserlichtquellen mit integriertem redundantem Sicherheitssystem zur Gewährleistung der Sicherheit insbesondere im Falle eines Ausfalls oder Defekts der Konverterschicht.

Lichtstrom und Leuchtdichte der lichtemittierenden Fläche dieser Laserlichtquellen liegen deutlich über den Werten einer entsprechenden LED mit vergleichbarer Leuchtfläche:

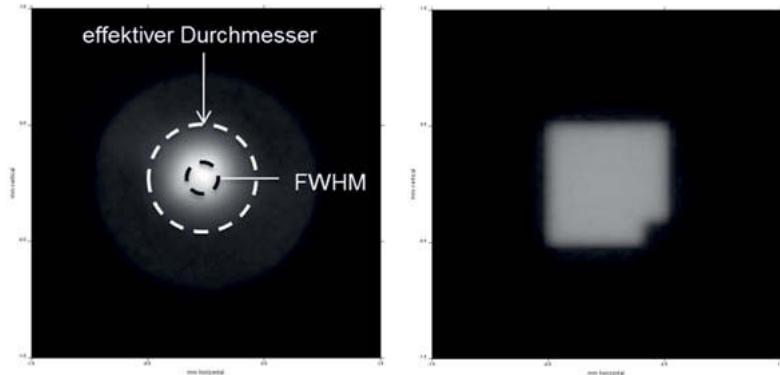


Bild 3: Leuchtdichtebilder der Leuchtfläche einer Laserlichtquelle (Osram Larp2) links und einer LED rechts. Im linken Bild sind der entsprechend dem folgenden Vorgehen ermittelte effektive Durchmesser sowie der FWHM-Durchmesser der Lichtquelle eingezeichnet.

Die Peak-Leuchtdichte und die mittlere Leuchtdichte (FWHM) sind bei Laserlichtquellen ca. 5-10 x höher als die einer Standard-LED. Aufgrund der kleineren Gesamtfläche (FWHM) von nur ca. $\frac{1}{4}$ der Leuchtfläche einer LED, ist der insgesamt abgestrahlte Lichtstrom allerdings vergleichsweise gering. Zur Erzeugung einer vollwertigen eigenständigen Fern-

licht/Abblendlicht-Laserlichtverteilung ist der Lichtstrom einer einzelnen Laserlichtquelle derzeit nicht ausreichend.

Daher werden Scheinwerfer mit Laserlichtquellen bisher als Laser-LED-Hybrid-System ausgeführt, und die Laserlichtquelle zur Reichweiteverbesserung eines Basis-LED-Fernlichtes eingesetzt.

Betrachtet man den Schnitt durch eine LeuchtdichteVerteilung, wird ein weiterer Unterschied zwischen LED und Laser deutlich:

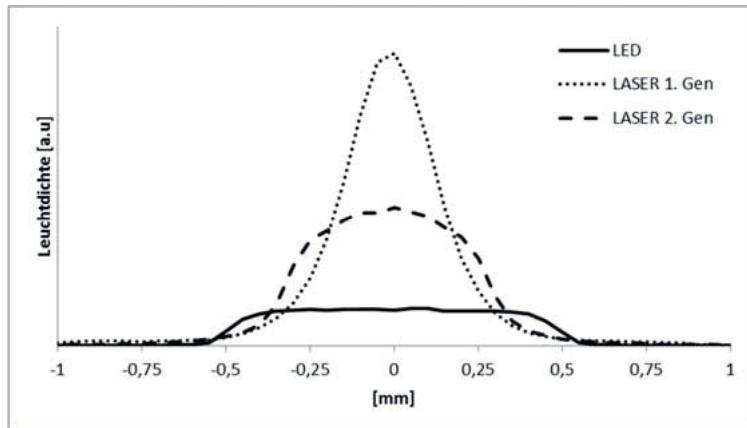


Bild 4: Dargestellt sind Schnitte durch die LeuchtdichteVerteilung einer LED (durchgezogene Linie) und Laserlichtquellen der 1. (gepunktete Linie) und 2. Generation (gestrichelte Linie)

Während bei einer LED die Leuchtdichte über die gesamte leuchtende Fläche relativ konstant ist, entspricht der Leuchtdichteschnitt einer Laserlichtquelle einer Glockenkurve mit einem Auslauf und gegebenenfalls einem etwas abgeflachten Plateau.

Darüber hinaus zeigen Laserlichtquellen den Effekt einer gelben Halo um die eigentliche Leuchtfäche deutlich ausgeprägter als LED-Lichtquellen, was auch in der Lichtverteilung zu einem deutlichen gelblichen Randauslauf um die eigentliche Lichtverteilung herum führt. Damit dieser gelbliche Randauslauf nicht störend wirkt, kann eine Überdeckung mit Lichtverteilungen anderer Lichtquellen hilfreich sein.

Der Randauslauf der Lichtquelle, insbesondere die gelbliche Halo, erschwert die Erzeugung von Hell-Dunkelgrenzen aus reinen Reflektor-Systemen. Maßnahmen zur Verbesserung des Kantengradienten sind notwendig, z.B. zusätzliche abschattende Elemente. Alternativ wäre auch die Nutzung in Projektionssystemen möglich.

Um eine Lichtverteilung mit Hell-Dunkel-Grenze mit einer Laserlichtquelle mittels Reflektor zu erzeugen, kann für die Laserlichtquelle eine effektive Größe der leuchtenden Fläche bestimmt werden. Das Vorgehen bezieht sich hierbei auf die Erzeugung von Hell-Dunkel-Grenzen mittels Reflektoren im Allgemeinen, ohne weitere abschattende Elemente und kann sinngemäß für Teilfernlicht-Lichtverteilungen, wie auch für Abblendlichtverteilungen angewandt werden. Als Kriterium des im Folgenden dargestellten effektiven Durchmessers der Laserlichtquellen dient hierbei die 1-lx Isolinie, die auf der zu erzeugenden Hell-Dunkel-Grenze liegen soll. Für unterschiedliche Anwendungen kann es sinnvoll sein an dieser Stelle ein anderes Kriterium zu wählen.

Der ermittelte effektive Durchmesser der Laserlichtquelle liegt dabei meist beträchtlich über dem FWHM-Durchmesser:

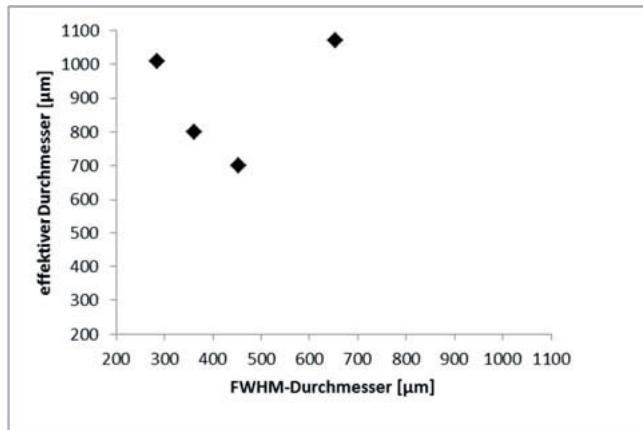


Bild 5: Relation des effektiven Lichtquellendurchmessers zur FWHM-Durchmesser verschiedener Laserlichtquellen. Der effektive Durchmesser kann mehr als doppelt so groß sein wie der FWHM-Durchmesser.

Auch wenn der effektive Durchmesser der Laserlichtquelle deutlich über dem FWHM-Durchmesser liegt, ist der effektive Durchmesser jedoch vergleichbar mit dem Durchmesser einer LED mit vergleichbarem Lichtstrom.

Die erzeugten Hell-Dunkel-Grenzen der Lichtverteilung sind mit Laserlichtquellen weniger scharf als die mittels LEDs. Der Abstand des Maximums der Lichtverteilung von der Hell-Dunkel-Grenze hängt jedoch nur vom effektiven Durchmesser der Lichtquelle ab. Somit liegt mit Laserlichtquellen das Maximum der Lichtverteilung genauso nahe, oft sogar näher an der Hell-Dunkel-Grenze als mit LED-Lichtquellen.

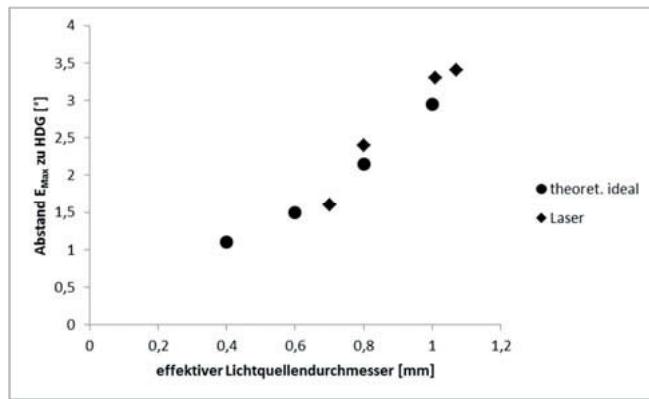


Bild 6: Abstand des Maximums von der Hell-Dunkel-Grenze in Abhängigkeit des effektiven Lichtquellendurchmessers, Reflektorbrennweite: 12mm

Zwar kann mit Laserlichtquellen ein Maximum zumeist näher an der Hell-Dunkel-Grenze realisiert werden, jedoch ist aufgrund des besseren Kontrastes von LED's der Lichtstrom in der Nähe der Kante höher:

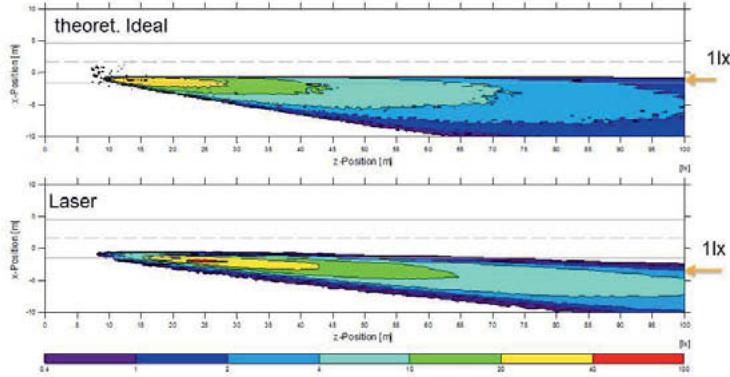


Bild 7: Vergleichsdarstellung in Vogelperspektive zweier Teilfernlichtverteilungen mit vertikaler Hell-Dunkel-Grenze mit theoretisch idealer Lichtquelle oben und Laserlichtquelle unten.

Bei der idealen Lichtquelle liegt die 1lx-Isolinie in 100m Abstand noch auf der Fahrbahn, im Vergleich dazu liegt mit einer Laserlichtquelle die 1lx-Isolinie bereits ca. 3m neben der Fahrbahn.

3. Ausblick

Betrachtet man die Entwicklung der Automotive Laserlichtquellen wird deutlich, dass sich neben anderen Entwicklungsschritten bei Zuverlässigkeit, Thermomanagement, Sicherheitskonzept, hauptsächlich leichte Steigerung des Lichtstrom und die mittlere Leuchtdichte verbessert haben.

Eine höhere Leuchtdichte der Lichtquelle erzeugt zumeist den Wunsch, die höhere Leuchtdichte in Systemen mit kleineren Optiken/kürzeren Brennweiten bei gleicher Leistung umzusetzen. Kürzere Brennweiten wirken sich im gleichzeitig jedoch nachteilig für die Erzeugung von Hell-Dunkel-Grenzen aus, da aufgrund des schlechteren Abbildungsmaßstabes die ohnehin schon unscharfen Kanten vergrößert und unschärfer abgebildet werden.

Um dynamische Lichtfunktionen in Zukunft auch mit Laserlichtquellen realisieren zu können, oder das Anwendungsspektrum allgemein zu erweitern, sind daher weitere Entwicklungsschritte wünschenswert, hauptsächlich:

1. Lichtstrom
2. Kantengradient
3. Annäherung von Peak-Leuchtdichte und mittlerer Leuchtdichte

Verbesserungen dieser Parameter würden auch insbesondere für Scanning-Lasersysteme mit Phosphorkonversion den Weg bereiten, die Systemeffizienz und Auflösung zu erreichen.

4. Zusammenfassung

Aktuell verfügbare Laserlichtquellen haben einen Vorteil gegenüber LED's in Bezug auf Leuchtdichte und Lichtquellengröße. Nachteilig sind der geringe Gesamtlichtstrom und der unscharfe Leuchtdichteauslauf am Rand des Leuchtfleckes. Dennoch lässt sich mit Laserlichtquellen das Maximum der Lichtverteilung näher an die Hell-Dunkel-Grenze bringen als mit LED, da der effektive Lichtquellendurchmesser, der den Abstand des Maximums von der Hell-Dunkel-Grenze bestimmt, zumeist kleiner als bei LED's ist. Um die Laserlichtquelle weiter attraktiv zu machen für Anwendungen im Scheinwerfer sind deshalb weitere Entwicklungsschritte notwendig, die die diskutierten Eigenschaften verbessern und die Komplexität der Lichtquelle reduzieren.

- [1] Google Bildersuche mit Suchwort LASER, <https://www.google.de/imghp?hl=de&tab=wi>, abgerufen am 12.03.2018
- [2] E.-O. Rosenhahn, M. Lampen, K. F. Albrecht: Laser based headlamp range extender, hype or useful feature for the driver? Vision Congress, Paris 2014.

Technologische und physiologische Bewertung eines hochauflösten Laserscanner-Scheinwerfersystems

Philipp Ansorg, AUDI AG, Ingolstadt; Lichttechnisches Institut KIT, Karlsruhe;

Marina Fischer, AUDI AG, Ingolstadt; Zentrum für Optische Technologien, Aalen University;

Cornelius Möckel, LurexX optical GmbH, Ingolstadt;

Cornelius Neumann, Lichttechnisches Institut KIT, Karlsruhe

Abstract

Besides established light sources for headlamp illumination, laser based light functions present the next step for innovations in automotive lighting. Precise illumination and intelligent light functionalities are generated by discrete light sources, which superimpose in the far field of the road. Thus, the new challenge of homogeneity emerges for such systems. Using the example of a laser scanning headlamp module with mono directional quantized resolution, different approaches for numerical evaluation of homogeneity are presented.

Kurzfassung

Laserbasierte Scheinwerferlichtquellen stellen den nächsten Innovationsschritt in der automobilen Beleuchtung dar. Präzise Straßenausleuchtung und intelligente Lichtfunktionen werden dabei vorrangig von separaten Lichtquellen realisiert, welche sich auf der Fahrbahn überlagern. Hierbei spielt die Homogenität solcher überlagernden Systeme eine wachsende Rolle. Am Beispiel eines Laserscannersystems mit diskreten Laserquellen entlang einer Auflösungsrichtung werden verschiedene Ansätze zur numerischen Bewertung von Homogenität vorgestellt.

1. Einleitung

Nach den technologischen Umbrüchen in der Lichttechnik von Fahrzeugen, von Halogen über Xenon-, LED- und Laser-Lichtquellen, spielen heutzutage dynamische und variable Lichtsysteme eine große Rolle, welche die wachsende Vielfalt und Präzision von Lichtfunktionen fördern [1],[2].

Eine dieser neuartigen Technologien ist das dynamische Laserscannersystem, welches die Vorteile der Laserlichtquelle mit der Dynamik und Anpassungsfähigkeit moderner Lichtfunktionen vereint. Dieses System wurde in einem BMBF-geförderten Forschungsprojekt durch Industrie- und Forschungspartner untersucht und die Umsetzungsfähigkeit nachgewiesen [3],[4]. Voraussetzung für adaptive Lichtfunktionen sind variable Lichtverteilungen, welche durch Superposition einzelner Lichtquellen umgesetzt werden. Diese Überlagerung führt zu Inhomogenitäten aufgrund der individuellen optischen Pfade der separaten Lichtquellen. Im entwickelten Laserscannersystem sind die separierten Lichtquellen, welche in der scannenden Bild auf die Straße Inhomogenitäten erzeugen können, Laserdioden. Um diese Intensitätsgradienten in der Lichtverteilung nicht nur subjektiv, sondern auch numerisch zu bewerten und diese als akzeptabel oder störend inhomogen zu klassifizieren, wurden verschiedene Ansätze entwickelt und auf das System des Laserscanners angewandt. In diesem Paper werden diese Bewertungskriterien sowie die Ergebnisse bezüglich des zunächst vorgestellten Laserscannersystems und dessen einzigartigen Lichtfunktionen vorgestellt.

2. Laserscannermodul für Scheinwerfer

Das Ziel eines Laserscannersystems ist es, die hohe Intensität von laserbasiertem Scheinwerferlicht nutzen, aber den Ausleuchtungsbereich zu erhöhen und zusätzliche Funktionen umzusetzen.

Ein möglicher Ansatz ist in Bild 1 dargestellt. Das von der Laserdiode emittierte monochromatische Licht wird von einem MOEMS-Mikrospiegel scannend auf einen Weißlichtkonverter gelenkt. Das durch Konvertierung und Streuung des blauen Laserlichts entstehende weiße Licht wird anschließend durch eine Optik auf die Fahrbahn projiziert. Findet die scannende Bewegung mit ausreichend hoher Winkelgeschwindigkeit statt, so nimmt das Auge den Scanbereich nach dem Talbot'schen Gesetz als gesamte Lichtverteilung wahr. Die Intensitätsverteilung ist dabei abhängig von der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Mikrospegs innerhalb des abgerasterten Winkelbereichs.

Im BMBF-geförderten Forschungsprojekt iLaS (intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer) wurde von den Partnern Audi, BMW, Bosch, Osram und KIT sowie dem assoziierten Partner ZKW der Ansatz eines Laserscannersystems untersucht und aufgebaut. Hierbei wurde sich für die Umsetzung mit einem eindimensional scannenden Mikrospiegel entschieden, da dieser unter Automotive-Bedingungen die Robustheitsanforderungen erfüllt und im Gegensatz zu bekannten zweidimensionalen Mikrospeichern auch quasistatisch statt harmonisch betrieben werden kann. Dies ermöglicht die adaptive Einstellung der Intensitätsverteilung durch eine veränderte Ansteuerung der Spiegelbewegungskurve. Da die

Scanrichtung somit auf eine Dimension (horizontal) begrenzt ist, wurde für eine Auflösung sowie ausreichender Ausdehnung in vertikale Richtung mehrere Laserdioden übereinander auf den Mikrospiegel gerichtet. Abhängig von den Konvertereigenschaften ist die vertikale Diskretisierung im projizierten Lichtbild erkennbar und als deutliche Inhomogenität wahrzunehmen.

Durch Anpassung der Konverterzusammensetzung und -geometrie sowie Justage und Fokussierung der Laserstrahlen kann das Lichtbild optimiert werden. Somit entsteht die Fragestellung nach dem Grad der Homogenisierung dieses Lichtbildes bis jenes als akzeptabel zu bewerten ist. Für detaillierte Ergebnisse des iLaS-Förderprojekts sowie Informationen zum System und den mit einem Laserscanner darstellbaren Lichtfunktionen sei auf die gemeinsamen Veröffentlichungen des iLaS-Konsortiums verwiesen [3-6].

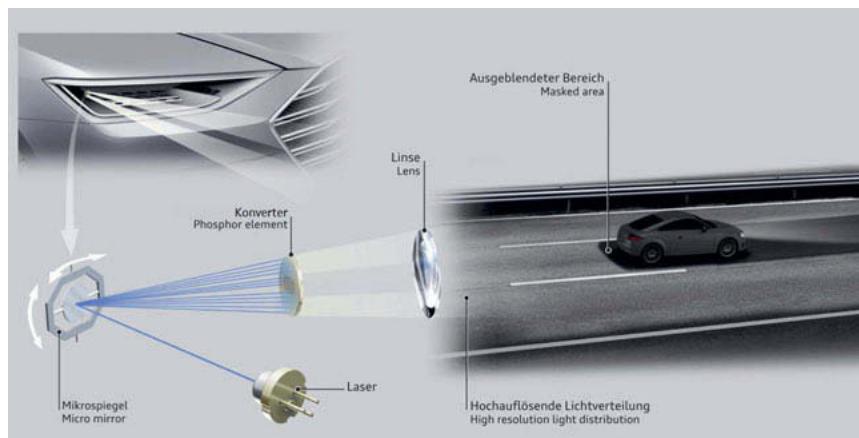


Bild 1: Prinzipdarstellung Laserscanning. Das monochromatische Laserlicht wird über einen MOESM-Mikrospiegel dynamisch scannend auf einen Weißlichtkonverter gelenkt und die resultierende Lichtverteilung per Optik auf die Fahrbahn projiziert.

3. Homogenitätsbewertung durch Fourier-Analyse

Mit Entwicklung der ersten MatrixBeam (MxB)-Systeme mit diskreten Segmenten zur Erzeugung einer Fernlichtverteilung wurde erstmals die Notwendigkeit der Homogenitätsanalyse deutlich. MxB-Fernlichter bestehen aus mehreren diskreten Segmenten, welche bei falscher Auslegung ein periodisches Streifenmuster aus ungewollt hellen oder ungewollt dunklen Re-

gionen, den Inhomogenitäten, erzeugen. Diese Periodizität ist unter Anwendung einer zweidimensionalen Fast Fourier Transformation (FFT) detektierbar und kann in ihrer Ausprägung mit einer Grenzfunktion verglichen werden.

Als Ausgangsdatensatz dient eine Intensitätsverteilung eines Scheinwerferlichtbildes. Dabei kann es sich um eine Leuchtdichte- oder Lichtstärkeverteilung handeln. Da typische Leuchtdichteaufnahmen, wie in den hier gezeigten Daten verwendet, mit einer Kamera aufgenommen werden, die einen größeren Detektionsbereich hat als die zu untersuchende Lichtverteilung, wird der relevante Teil ausgeschnitten. Dabei sollen alle Daten innerhalb des Untersuchungsbereichs über dem $\frac{1}{e^2}$ -fachen der maximalen Leuchtdichte des Datensatzes liegen. Hintergrund dieser Auswahl ist die gaußförmige Intensitätsverteilung eines Laserstrahlquerschnitts. Durch diese entspricht auch der Rand des konvertierten Weißlichts einer Gaußkurve, bei welcher der Radius als Abstand zum Maximum definiert wird, an dem die Intensität auf den $\frac{1}{e^2}$ -fachen Wert abgefallen ist.

Anschließend wird eine Gewichtung der Daten mit einer Fensterfunktion durchgeführt, um dem sogenannten Leakage-Effekt bei der diskreten Signalverarbeitung durch eine Fouriertransformation entgegenzuwirken. Dieser Schritt ist notwendig, weil mit der vermessenen Intensitätsverteilung eine endliche Signalmatrix verarbeitet wird, welche nicht garantiert an allen Rändern auf identische Werte abfällt, um Unstetigkeiten während der FFT zu verhindern. Es werden für Scheinwerferlichtverteilungen zwei Fensterfunktionen in Betracht gezogen, das Blackman-Fenster und das Tukey-Fenster (vgl. Bild 2).

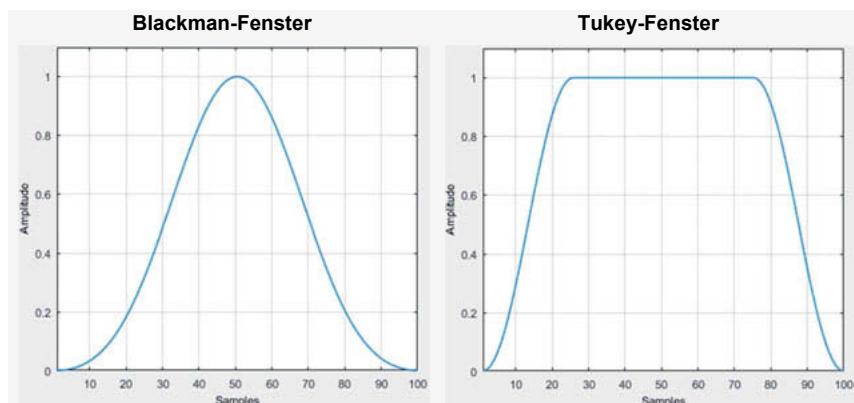


Bild 2: Fensterfunktionen zur Gewichtung der endlichen Lichtverteilungsdaten als Vorbereitung der Rohdaten für die Fouriertransformation. Links: Blackman-Fenster. Rechts: Tukey-Fenster mit $\alpha=0.5$.

Beide Gewichtungsfunktionen haben Vor- und Nachteile, die folgend diskutiert werden sollen. Die Blackman-Fensterfunktion schwächt einen relativ großflächigen Anteil der vorliegenden Daten ab, sodass ein hoher Grad an Informationsverlust auftritt. Bezogen auf eine Laserscanner-Lichtverteilung mit 6 diskreten Laserkanälen (vgl. Bild 4) können die jeweils äußeren Kanäle in einem Maße durch das Blackman-Fenster abgeschwächt werden, dass die Fourier-Analyse nur die zwei zentralen Laserkanäle bezüglich ihrer Homogenität bewertet. Daher wird als alternative Fensterfunktion das Tukey-Fenster in Betracht gezogen. Das Tukey-Fenster hält, wie in Bild 2 rechts erkennbar, über einen größeren Bereich die Originaldaten bei und gewichtet nur die Randbereiche, welche in ihrer Breite abhängig von einem Variationsparameter α sind. Damit steigt die Aussagekraft bezüglich der Bewertung der relevanten Intensitätsinformationen.

Problematisch wird die Interpretation der Fouriertransformation bezüglich Frequenzen, welche durch einen starken Abfall der Intensität auftreten. Dieser Fall tritt auch bei der Analyse von Lichtverteilungen mit ausgeprägten Hell-Dunkel-Grenzen (HDG) auf. Beispielhaft wird dieser Sachverhalt in Bild 3 veranschaulicht. Hier sind auf der linken Seite exemplarische Intensitätsprofile einer Lichtverteilung dargeboten während in der rechten Spalte die entsprechenden Fouriertransformierten abgebildet sind. Die Amplitude in Bild 3a) entspricht der eigentlichen ungewollten Modulierung der Lichtverteilung durch ein segmentweises Zusammensetzen der Lichtverteilung bzw. Überlagerung der diskreten Laserkanäle, deren Peak im Frequenzraum (Bild 3d)) ggf. noch unterhalb der Bewertungskurve liegt. Hell-Dunkel-Grenzen zeichnen sich durch starke Gradienten innerhalb einer Lichtverteilung aus. Insbesondere bei superpositionalen Lichtfunktionen wie dem Laserscanner und dem LED-Fernlicht oder dem Übergang zwischen Abblendlicht und Fernlicht können Intensitätsverläufe wie in Bild 3b) bewusst erzeugt werden. Betrachtet man nun die Fouriertransformationen, welche sich aus der Lichtmodulation (Sinusfunktion) und der HDG (Rechteckfunktion) ergeben, können diese jeweils unterhalb der Bewertungsfunktion liegen und damit als akzeptabel bezüglich der Homogenitätsbewertung gelten.

Aufgrund der Linearität der Fouriertransformation kann bei der Überlagerung der Sinus- und Rechteckfunktion im Realraum (Bild 3c)) auch die FFTs addiert werden, sodass ein Verlauf der Kurve im Frequenzraum wie in Bild 3f) resultiert. Hier treten niederfrequente Ausschläge auf, welche allein der HDG zuzuordnen sind (Bereich 1 in Bild 3f)). Durch die Addition können Frequenzen verstärkt werden, welche nicht zu den ursprünglichen Inhomogenität-erzeugenden Störung der Lichtverteilung gehören (Bereich 2 in Bild 3f)). Die Folge ist ein Ergebnis, welches die Bewertungskurve (siehe folgenden Absatz) überschreitet und damit als nicht ausreichend

homogen bewertet wird, obwohl die systembedingte Störung / Periodizität der Lichtverteilung aus den Ausgangsdaten das Homogenitätskriterium erfüllt.

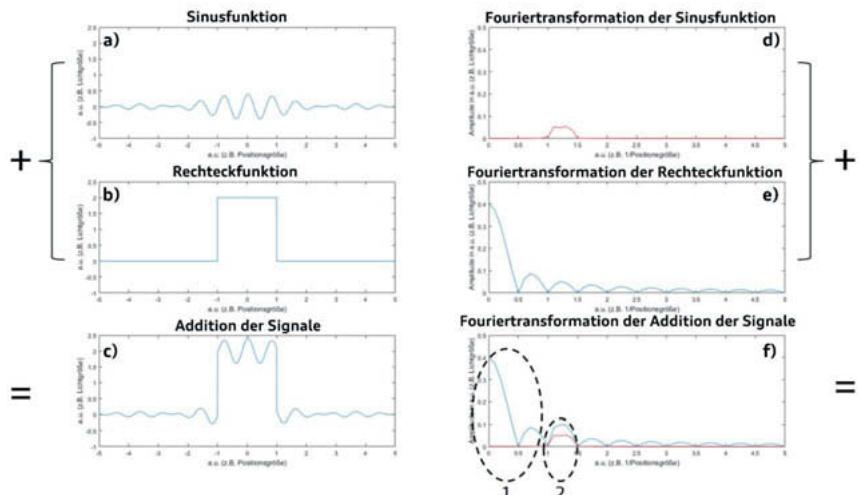


Bild 3: Beispiel für Interpretationsfehler bei der Fourier-Analyse, daher beliebige Einheiten als Achsenbeschriftung; a-c): Darstellung im Realraum, d-f): Darstellung im Frequenzraum. a) Sinusfunktion als Modulierung der Lichtverteilung durch Superposition von diskreten Scheinwerferlichtquellen; b) Rechteckfunktion als Hell-Dunkel-Grenze am Rand einer Scheinwerferlichtverteilung; c) Addition der Signale a) + b) im Realraum; d) FFT der Sinusfunktion aus a); e) FFT der Rechteckfunktion aus b); f) FFT der Summe der Signale.

Es wird deutlich, dass beide Fensterfunktionen Nachteile mit sich bringen, weshalb ein Kompromiss eingegangen werden muss und bei der Interpretation der Ergebnisse der globale Verlauf der Leuchtdichteverteilung bedacht werden muss. Für die weitere Erklärung der Fourier-Analyse wird ein Tukey-Fenster gewählt. Dieses wird für die beiden Raumdimensionen so kreiert, dass nur die Randpixel Richtung den Wert 0 gewichtet werden. Da der Abfall der Leuchtdichte auf das $\frac{1}{e^2}$ -fache innerhalb der analysierten Daten schon erfolgt ist, ist davon auszugehen, dass die Anwendung des Tukey-Fensters keine weitere ausgeprägte Rechteckfunktion wie im Bild 3 dargestellten Sachverhalt auftritt.

Nach der Vorbereitung der Daten (vgl. Bild 4) wird die 2D-FFT so durchgeführt, dass die resultierenden Daten die gleiche Anzahl von Pixeln aufweist wie die zu untersuchende Leuchtdichteverteilung und der Betrag des ersten Elements der FFT der mittleren Leuchtdichte der Ausgangsdaten entspricht. Das Resultat der 2D-FFT ist in Bild 5 gezeigt. Zur Auswertung wird die Zeile durch den Ursprung der FFT analysiert (Bild 6). Im Beispiel des Laserscanners sind

die Inhomogenitäten in vertikaler Richtung zu erwarten, weshalb der Schnitt parallel zur y-Achse der 2D-FFT gelegt wird. Die Amplitude des extrahierten, eindimensionalen Frequenzspektrums wird für die Vergleichbarkeit mit einer Bewertungskurve auf 1 normiert.

Die Bewertungsfunktion ist ein empirisch ermittelter Wertebereich unter welchem das Frequenzspektrum der zu analysierenden Leuchtdichte liegen muss. Dann gilt das Homogenitätskriterium für die Fourieranalyse als erfüllt, weil die untersuchte LD-Verteilung keine oder ausreichend schwach ausgeprägte Periodizitäten aufweist im Vergleich zu Lichtverteilungen, welche als homogen gelten.

Bei der Anwendung der Fourier-Analyse für die Daten des Laserscannerscheinwerfers zeigt sich im Ergebnis (Bild 6), dass die Fouriertransformation Ausschläge oberhalb der Bewertungsfunktion aufweist. Damit gilt die LeuchtdichteVerteilung als nicht homogen. Dieses Ergebnis erscheint plausibel bei Betrachten der Ausgangsdaten in Bild 4. Hier sind die 6 diskreten Laserkanäle deutlich zu erkennen.

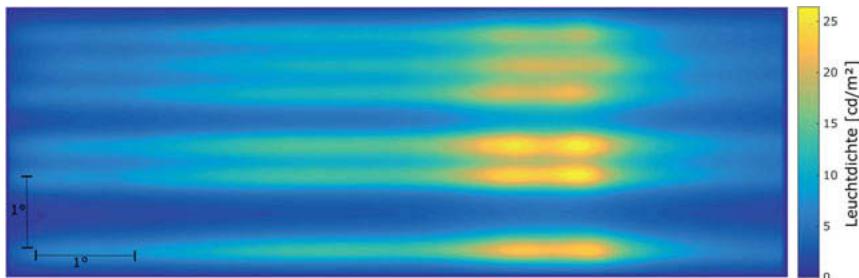


Bild 4: LeuchtdichteVerteilung eines Laserscanner-Prototypenscheinwerfer mit Tukey-Fensterfunktion (Breite: 10 Pixel) gewichtet; aufgenommen in 25m Entfernung. Winkelkala als Inset; Leuchtdichte ist per Farbcodierung aufgetragen.



Bild 5: Zweidimensionale Fouriertransformation von Bild 4. Inset: 20-fache Vergrößerung des Zentrums der 2D-FFT. Amplitude der 2D-FFT als Farbskala in bel. Einheiten. Achsen im Fourieraum [1°] besitzen die reziproke Einheit des Realraums (Raumwinkel).

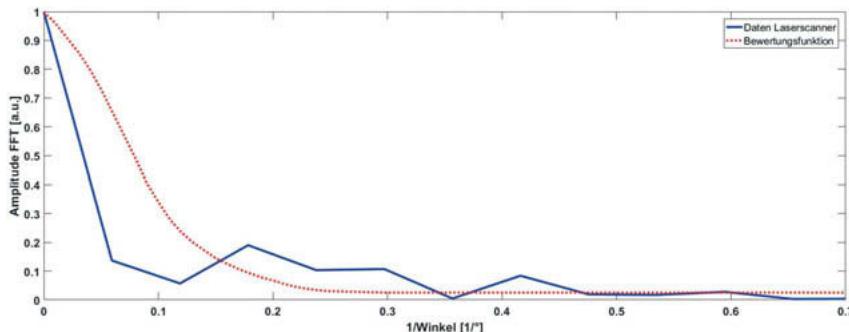


Bild 6: Schnitt durch die 2D-FFT parallel zur y-Achse aus Bild 5 (blau, durchgehend) und Bewertungsfunktion (rot, gepunktet). Amplitude der 2D-FFT als Farbskala in bel. Einheiten. x-Achse im Fourierraum [$1/\text{°}$] besitzt die reziproke Einheit des Realraums (Raumwinkel). Die Analysekurve der Laserscanner-Leuchtdichtedaten überschreitet die Bewertungsfunktion und lässt daher auf inakzeptable Inhomogenitäten schließen.

4. Homogenitätsbewertung durch Gradientenanalyse

Weber postulierte in seiner Schrift von 1834, dass das Unterscheidungsempfinden des Menschen nicht absolut sondern sich prozentual relativ verhält [7]. Jedoch ist diese Empfindlichkeit nicht über den gesamten Wahrnehmungsbereich konstant, sondern ändert sich in Abhängigkeit der Reizart und Reizstärke, wie unter anderem Webers Student Fechner feststellte [8]. Weitere verschiedene Ansätze bewiesen diesen Umstand und sind von Hecht [9] zusammengefasst worden. Für die Homogenitätsbewertung ist dieser Reiz die Leuchtdichte von Objekten, welche das Auge wahrnimmt. Die Leuchtdichteabhängige Wahrnehmungsschwelle von Leuchtdichteunterschieden, welche als Bewertungskurve für die Homogenitätsanalyse herangezogen wird, entspricht dem historisch entstandenen und in mehreren Untersuchungen bestätigten Weber-Fechner-Gesetz [9].

Für die Anwendung auf die Homogenitätsbewertung von Scheinwerferlichtverteilungen wird angenommen, dass das Weber-Fechner-Gesetz ebenso für lokale Inhomogenitäten gilt. Insbesondere wird argumentiert, dass die kleinste wahrnehmbare Inhomogenität ein lokaler Kontrast ist, der in der Größenordnung des menschlichen Auflösungsvermögens liegt. Daher sind zu untersuchende Leuchtdichtedaten in einer Auflösung zu messen, die in der Größenordnung des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges liegt.

Datengrundlage zur Bewertung ist das Leuchtdichtebild einer Lichtverteilung, aufgenommen im Lichtassistentenzentrum bei der AUDI AG Ingolstadt. Hier herrschen gleichbleibende Rahmenbedingungen für wiederholte Messungen und es gibt keine Störeinflüsse wie Reflektionen

oder andere Lichtquellen sowie Wetter, welche die Vergleichbarkeit von wiederholten Messungen erschweren. Kritisch ist die Beurteilung an einer vertikalen Fläche in definiertem Abstand zu sehen anstatt die Bewertung anhand einer realistischen Fahrszene mit Projektion der LeuchtdichteVerteilung auf die Fahrbahn und Fahrbahnumgebung.

Die resultierende Datenmatrix wird Pixelweise analysiert. Das bedeutet, dass jeder Datenpunkt inklusive seiner direkten Umgebung, wie in Bild 7 dargestellt, für die Analyse nach dem Weber-Fechner-Gesetz separiert betrachtet wird.

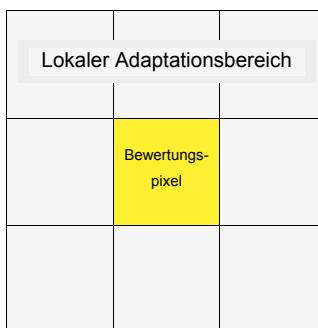


Bild 7: Schematische Darstellung der Teilmatrix der Leuchtdichtedaten zur Bewertung eines Pixels in Abhängigkeit des lokalen Adaptationsbereichs, welcher durch die umliegenden Pixel dargestellt wird. Die Pixelgröße sollte zwischen $\frac{1}{60}^\circ$ und $\frac{1}{30}^\circ$ betragen, damit detektierte Unterschiedsschwellen nach Weber-Fechner vom Auge aufzulösen sind bzw. keine Inhomogenitäten durch die Daten nicht abgebildet werden, welche das Auge in der Lage wäre wahrzunehmen.

Für den Vergleich nach dem Weber-Fechner-Gesetz, ob ein Leuchtdichtenunterschied ΔL zwischen einem zu bewertendem Pixel L_{px} und der lokalen Adaptationsleuchtdichte L_{adap} über der Wahrnehmungsschwelle liegt und daher als Inhomogenität erkannt wird, muss die lokale Adaptationsleuchtdichte bestimmt werden. Es wird angenommen, dass für die Bewertung eines einzelnen Pixels durch das Auge die Adaptation lokal stattfindet, also nur die Leuchtdichten der direkten Umgebung Einfluss nehmen. Die Adaptation des Auges läuft neben der Regulation der einfallenden Energiemenge über Pupillengröße oder Verengung der Augenlider vor allem über den photochemischen Prozess der Energierezeptoren auf der Netzhaut ab. Dieser photochemische Prozess kann nicht bewusst gesteuert werden, sodass die Adaptation des Auges auf die Intensität mit der größten Leuchtdichte stattfindet.

Werden alle 9 Pixel der Sub-Matrix aus Bild 7 zur Bestimmung der lokalen Adaptationsleuchtdichte einbezogen, so kann es zu einem unplausiblen Wert für die Differenzleuchtdichte $\Delta L = |L_{px} - L_{adap}|$ kommen. Unterscheiden sich bei einem linearen Verlauf der Leuchtdichte die 3

Pixel oberhalb des Bewertungspixels um den gleichen Betrag wie die 3 Pixel unterhalb, während die horizontalen Leuchtdichten identisch mit dem Bewertungspixel sind, so ist $L_{px} = L_{adap}$ und folglich $\Delta L = 0$ obwohl lokale Leuchtdifferenzen vorliegen. Um diesen Umstand zu beheben, wird aus der Sub-Matrix das untere Drittel abgeschnitten. Die Richtung eines möglicherweise auftretenden linearen Intensitätsverlaufs ist allerdings beliebig. Daher werden stets die 6 Pixel mit der größten Leuchtdichte für die Bestimmung der lokalen Adaptationsleuchtdichte gewählt.

Entsprechend dem Weber-Fechner-Gesetz wird dann die normierte Differenzleuchtdichte $\Delta L / L_{adap}$ mit der Wahrnehmungsschwelle für die lokalen Adaptationsleuchtdichte L_{adap} verglichen. Liegt der Wert über der Schwelle, gilt das Pixel nach dem Weber-Fechner-Gesetz als wahrnehmbare Inhomogenität für das menschliche Auge.

Diese Analyse wird für die gesamte Datenmatrix vorgenommen und anschließend visuell dargestellt wie in Bild 8 beispielhaft gezeigt. Dabei werden Pixel, welche das Homogenitätskriterium nach dem Weber-Fechner-Gesetz erfüllen grün (hellgrau) eingefärbt, während Pixel, welche vom Auge als lokale Inhomogenität wahrgenommen werden können, rot (dunkelgrau) dargestellt.

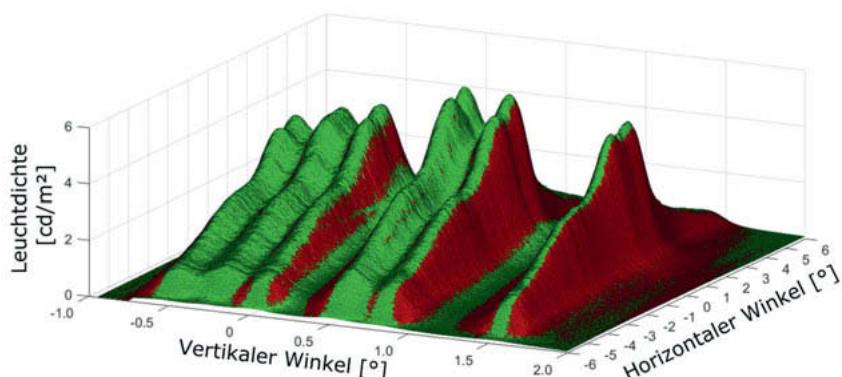


Bild 8: Homogenitätsbewertung der Leuchtdichtemessung eines Laserscannermoduls nach Weber-Fechner-Gesetz. Leuchtdichte aufgenommen in 59m Entfernung. x-y-Ebene zeigt die Winkelbereich der Lichtverteilung; in z ist die Leuchtdichte dreidimensional dargestellt. Die Färbung gibt das Ergebnis der Homogenitätsanalyse nach dem Weber-Fechner-Gesetz an: Grün (hellgrau) – Homogen, Rot (dunkelgrau) – Inhomogen

Die Leuchtdichtedaten in Bild 8 stammen vom gleichen Laserscannerscheinwerfer wie in Bild 4, allerdings in einem weiteren Abstand zur Projektionsfläche platziert und aufgenommen. Bei dieser dreidimensionalen Darstellung entspricht die z-Achse der Leuchtdichte. Dadurch können die inhomogenen Regionen mit Hilfe der durchgeföhrten Analyse lateral mit den entsprechenden Leuchtdichteverläufen verknüpft werden. Es zeigt sich, dass entlang der Scanbewegung der einzelnen Laserkanäle keine inakzeptablen Inhomogenitäten detektiert werden. Die erkannten inhomogenen Bereiche treten am Rand der einzelnen Kanäle auf, wo ein deutlicher Leuchtdichteabfall vorliegt. Laut dieser Analyse-Methodik lässt sich schlussfolgern, dass das Mindestmaß an Homogenität des Laserscannersystems erreicht werden kann, wenn die einzelnen Kanäle gleichmäßig auf einem kleineren Winkelbereich durch eine entsprechend präzise Justage verteilt werden. Eine weitere Möglichkeit stellt die Defokussierung der einzelnen Kanäle dar. Hierdurch verringert sich die Steigung der Laserkanal-Flanken, was zu einer positiven Homogenitätsbewertung nach dem Vergleich mit dem Weber-Fechner-Gesetz führt. Zu beachten ist aber die Limitierung der Untersuchung nur auf lokale Inhomogenitäten. Zur Gradientenanalyse von Gesamtlichtverteilungen bedarf es Modifikationen dieses Ansatzes.

5. Zusammenfassung

Da intelligente Lichtfunktionen innovativer Scheinwerfersysteme mit Hilfe separater Lichtquellen umgesetzt werden, spielt die Homogenität der resultierenden Lichtverteilung eine zunehmende Rolle. Insbesondere das vorgestellte Laserscannersystem mit diskreten Laserkanälen hoher Leuchtdichte tendiert zur Ausprägung von Inhomogenitäten. Daher werden zwei Ansätze zur objektiven Homogenitätsbewertung vorgestellt. Die Fouriertransformation von Leuchtdichtedaten ist dabei vor allem auf periodische Inhomogenitäten innerhalb der gesamten Lichtverteilung sensitiv, jedoch in ihrem Ergebnis anfällig für Fehlinterpretationen bei bewusst erzeugten Hell-Dunkel-Grenzen. Sie basiert auf einer empirisch bestimmten Bewertungskurve und stellt damit einen Vergleich zu Scheinwerferlichtverteilungen da, welche als homogen gelten. Ein physiologischer Ansatz ist die Gradientenanalyse, welche auf dem Weber-Fechner-Gesetz basiert. Hierbei werden lokale Leuchtdichteunterschiede untersucht, ob diese oberhalb der Wahrnehmungsschwelle des Auges liegen und damit als lokale Inhomogenität erkennbar sind. Angewandt auf das System Laserscannerscheinwerfer ergibt sich für den untersuchten Entwicklungsstand die Notwendigkeit bezüglich der Homogenität Änderungen in der optischen Auslegung vorzunehmen um die Homogenitätsanforderungen von Scheinwerferlichtverteilungen zu erfüllen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie den Partnern Bosch, Osram und ZKW für die Unterstützung und Zusammenarbeit im Rahmen des Förderprojektes iLaS (intelligentes Laserlicht für kompakte und hochauflösende adaptive Scheinwerfer). Vielen Dank auch an Lucas Weber für die Diskussionen bezüglich der Homogenitätsbewertung von Scheinwerferlichtverteilungen.

- [1] Brunne, D., et.al.: Outlook on high resolution pixel light, Proceedings of ISAL, Darmstadt, 2017
- [2] Pfullmann, N., et.al.: From mechanical ADB systems to high resolution head lamps – new opportunities of novel headlight systems, Proceedings of ISAL, Darmstadt, 2017
- [3] Ansorg, P., et.al.: Advantages of laser scanners for automotive headlamps, Proceedings of Vision, Paris, 2016
- [4] Hager, J., et.al.: Handling 17W of scanning laser power – three years of exploration in the iLaS project, Proceedings of ISAL, Darmstadt, 2017
- [5] Petersen, et.al.: "Challenges for MEMS based Scanning Laser System", ISAL 2015, (355-364)
- [6] Gut C., et.al.: Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer; VDI-Kongress ELIV (2015)
- [7] Weber, E. H., De pulsu, resorptione, auditu et tactu annotationes anatomicae et physiologicae, Leipsic, 1834. Author's summary: Ueber den Tastsinn, Arch. Anat. u. Physiol., 1835, 152.
- [8] Fechner, G. T., Ueber ein wichtiges psychophysisches Grundgesetz und dessen Beziehung zur Schätzung der Sterngrößen, Abhandl. k. sächs. Ges. Wissenschaft., Math.-Phys. Kl., 1858, iv, 31 (as published separately); 1859, iv, 455 (as published in bound volume); Elemente der Psychophysik, Leipsic, 1860.
- [9] Hecht, S.: The visual discrimination of intensity and the Weber-Fechner law, Accepted for publication, September 25, 1924

Fusion zwischen Sensor- und Scheinwerfersystem – Abstandsmessung durch aktive Triangulation mit Laserlicht

M.Sc. **Simon Mates**, M.Sc. **Jonas Stoll**, Prof. Dr. rer. nat. **Wilhelm Stork**,
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach
Forschungszentrum Informatik am Karlsruher Institut für Technologie
Karlsruher Institut für Technologie, ITIV

Kurzfassung

Hochauflösende Scheinwerfersysteme bieten die Möglichkeit gezielt Objekte vor dem Fahrzeug anzuleuchten und auszublenden. Mit steigender Pixelzahl erhöht sich gleichzeitig die Genauigkeit dieser Systeme unter der Voraussetzung, dass ein Kamerasytem die Szene dabei zunehmend detaillierter auflösen muss. Die Kopplung zwischen Kamera/Sensorik und Scheinwerfersystem spielt somit eine entscheidende Rolle und ermöglicht es mit Hilfe von Licht die vorhandenen Sensorsysteme zu erweitern. Der Einsatz von Lasersystemen in Scheinwerfern bietet die Möglichkeit sehr kleine Strahldurchmesser für Beleuchtungen zu realisieren. In diesem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, das die besonderen optischen Eigenschaften von Laserlicht ausnutzt und den Scheinwerfer zusätzlich als messende Einheit einsetzbar macht. Das verwendete Messprinzip basiert auf dem Verfahren der 3D-Tiefenrekonstruktion durch aktive Triangulation. Der Basisabstand der Scheinwerfer wird dabei genutzt um durch ein Stereosystem bestehend aus Kamera und Lasereinheit höhere Reichweiten zu erzielen als mit gängigen Kamera-Stereosystemen, die sich derzeit hauptsächlich auf den Nahbereich fokussieren. Durch Projektion eines räumlich kodierten Streifenlichtmusters, das im Kamerabild mittels bildverarbeitender Algorithmen identifiziert und dekodiert wird kann die Winkelbeziehung einzelner Laserpunkte im Kamera-Projektor-System hergestellt und so durch Triangulation die Distanz zum reflektierenden Objekt ermittelt werden. Um die Leistungsfähigkeit eines solchen Systems zu beurteilen wurde ein prototypischer Aufbau mit einem einfachen Linienmuster realisiert und unter Realbedingungen getestet. Es wird gezeigt, dass durch die Möglichkeit einer Fusion zwischen Sensorsystem und Scheinwerfer ein Mehrwert für Scheinwerfersysteme erzielt werden kann.

Abstract

High-resolution headlamp systems offer the ability to illuminate and omit objects in front of the vehicle. At the same time, the accuracy of these systems increases as the number of pixels increases, provided that a camera system is able to resolve the scene in higher detail. The coupling between the camera/sensor system and the headlight system thus plays a crucial role and makes it possible to expand the existing sensor systems with the help of light. The use of laser systems in headlamps grants the possibility of realizing very small beam diameters. This article presents a concept that exploits the special optical properties of laser light and additionally makes the headlamps usable as a measuring unit. The measuring principle used is based on the method of 3D depth reconstruction by active triangulation. The base distance between the headlights is used by a stereo system comprised of a camera and laser unit to achieve a higher measurement range compared to current camera stereo systems, which currently focus mainly on near range applications. By projection of a spatially encoded structured light pattern, which is identified and decoded in the camera image by means of image processing algorithms, the angular relationship of individual laser spots in the camera-projector system can be established and thus the distance to the reflecting object can be determined by triangulation. To assess the performance of such a system, a prototypical setup with a simple line pattern was realized and tested under real conditions. We show that the possibility of a fusion between the sensor system and the headlamp can add value to headlamp systems.

1. Motivation

Lichtsysteme erfüllen neben ihren üblichen Anforderungen möglichst gute und homogene Ausleuchtungen der Straße zu erzielen zunehmend mehr Aufgaben aus dem Bereich der fahrerassistierenden Funktionen. Um die vielfältigen Aufgaben neuartiger Fahrerassistenzsysteme umzusetzen, werden Sensorsysteme notwendig, die die Umgebung des Fahrzeugs in immer größerer Genauigkeit abbilden. Insbesondere Sensoren für die Rekonstruktion von Tiefeninformationen spielen bei steigendem Automatisierungsgrad eine wichtige Rolle. Aufgrund der beschränkten Winkelauflösung von Radarsystemen, die beispielsweise für automatische Abstandsregelassistenten zum Einsatz kommen, werden darüber hinaus auch laserbasierte Messsysteme mit höherer Winkelauflösung notwendig. Durch die Erweiterung des Sensorsets ergibt sich gleichzeitig die Schwierigkeit den für die Komponenten benötigten Bauraum bereitzustellen. Durch den Einsatz neuartiger hochauflöster LED Pixeltechnologie in Scheinwerfern und dem Wegfall von zusätzlichen Stellmotoren ergibt sich potentiell die Möglichkeit den

im Scheinwerfer vorhandenen Bauraum zu nutzen und dabei Synergien hinsichtlich Anbauposition und vorhandenen Reinigungsanlagen zu nutzen.

In dem Beitrag wird ein System vorgestellt, das sich den Basisabstand der Scheinwerfer zunutze macht und im Gegensatz zu Lidarsystemen ohne bewegliche Komponenten durch Einsatz von herkömmlichen CMOS/CCD Bildsensoren auskommt. Die Rekonstruktion von 3D-Punkten im Verkehrsraum erfolgt dabei durch aktive Triangulation mithilfe von räumlich kodiertem Streifenlicht, das durch eine zu einem Kamerasystem gekoppelte Laser-Projektionseinheit ausgesendet wird. Für den Einsatz im Fahrzeug sind dafür Laser-Wellenlängen im Infrarotbereich notwendig. Aus dem Stand der Technik sind aktive Triangulationsverfahren im Scheinwerferbereich bereits bekannt. S. Söhner stellt in [1] ein Verfahren zur Berechnung der Fehlstellung von Scheinwerfern vor auf Basis aktiver Triangulation vor. Durch die Detektion der Hell-Dunkelgrenze im Kamerabild der Fahrerassistenzkamera ist es möglich, durch Verfahren der Schrittmotoren und Triangulation an einem charakteristischen Merkmal die Scheinwerferfehlstellung zu berechnen und so die Kalibrierung der Kamera zum Scheinwerfer durchzuführen. Als Erweiterung des Systems von Söhner stellt C. Schneider in [2] ein System vor, das mehrere Merkmale in Lichtverteilungen von Matrix-Pixellicht Scheinwerfern [3] durch das Kamerasystem der vorhandenen Fahrerassistenzkamera erkennt und durch Triangulation Abstände zu den angestrahlten Flächen ermittelt. Durch die Verwendung von schwach fokussierten LED-Lichtquellen und durch die kurze Brennweite der eingesetzten Kamera bleibt die Winkel-Auflösung allerdings beschränkt und es können nur Distanzen im Nahbereich bis 20m bestimmt werden. Daher ist das System hauptsächlich für Parksituationen und als Redundanz zu bestehenden Ultraschallsensoren ausgelegt.

Distanzmessungen auf Basis der optischen Triangulation mit Streifenlicht sind bekannt aus [4][5]. Wu et. al. stellen in [6] ein System vor, das den Abstand zu einem sich vor dem Fahrzeug befindlichen Verkehrsteilnehmers durch Triangulation mit einem einzelnen ausgesendeten Laserstrahl bestimmt. Das dort vorgestellte System ist in der Lage Abstände von 5 bis 45m zu messen, erlaubt allerdings aufgrund der fehlenden Winkelauflösung keine Objektlagenschätzung.

2. Systembeschreibung

Das Messprinzip der aktiven Triangulation basiert auf der geometrischen Berechnung der Seitenlängen von Dreiecken mit bekannter Basislänge und Winkelverteilung. In dem vorgestellten System, emittiert eine Projektionseinheit kollimierte Laserstrahlen in das Fahrzeugvorfeld, die

an sich im Strahlpfad befindlichen Objekten an den Orten \vec{r}_i auftreffen und reflektiert werden, siehe Abb. 1. Dazu wird ein Laserstrahl durch ein diffraktives optisches Element (DOE) so aufgeteilt, dass ein identifizierbares Muster entsteht. Das System wird zudem um eine Kamera, die die Empfangseinheit darstellt, ergänzt, sodass die Verbindungsline zwischen Kameraposition K und Projektionsposition P die Basis der unterschiedlichen Dreiecke bilden, die die Punkte P und K mit den auf den Objekten liegenden Punkten \vec{r}_i aufspannen.

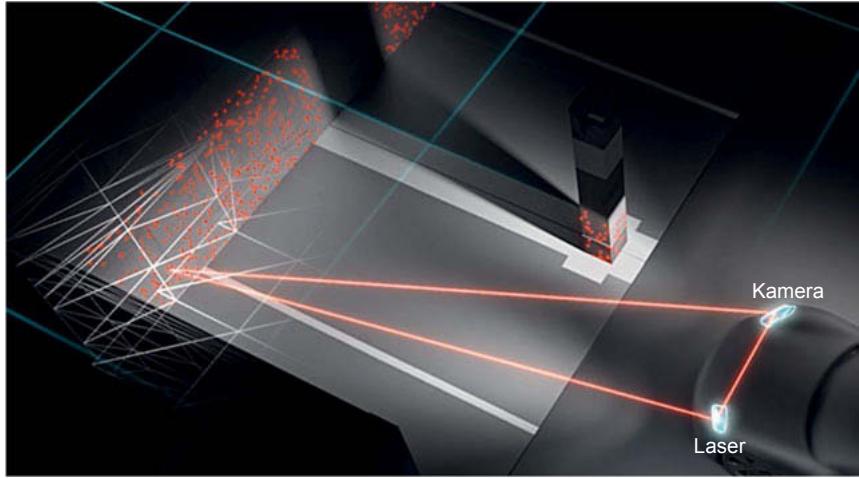


Bild 1: Visualisierung der aktiven 3D-Rekonstruktion mit strukturiertem Laserlicht durch Triangulation mit dem in den Scheinwerfern untergebrachten Lasersystems. Ein Lasersystem projiziert ein Muster in die Szene, die von einer Kamera erfasst wird.

2.1 Mathematisches Modell

Mathematisch lässt sich das Problem der 3D-Rekonstruktion wie folgt beschreiben: sei

$R := \{\vec{r}_i = \vec{r}(r_i, \varphi_i, \vartheta_i) \mid i = 1, \dots, n\}$ die Menge der Punkte, die ausgehend von einem Punkt P durch die Strahlen $\vec{r}(r_i, \varphi_i, \vartheta_i)$ unterschiedlicher Winkel φ_i und ϑ_i in Kugelkoordinaten beschrieben werden können und $S := \{\vec{s}_j = \vec{s}(s, \alpha_j, \beta_j) \mid j = 1, \dots, n\}$ die Menge der Strahlen, die ausgehend von einem zweiten Punkt K auf die Punkte R zeigen. Die Punkte P und K bilden dabei die Zentren zweier paralleler Koordinatensysteme, die um den Vektor \vec{b} in x-Richtung Zueinander verschoben sind, siehe Abb. 2.

Durch Verwendung von Kugelkoordinaten ergeben sich die jeweiligen Vektoren zu

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_P, \quad \vec{r}_i = r_i \begin{pmatrix} \cos(\varphi_i) \sin(\vartheta_i) \\ \cos(\vartheta_i) \\ \sin(\varphi_i) \sin(\vartheta_i) \end{pmatrix}_P, \quad \vec{s}_i = s_i \begin{pmatrix} \cos(\alpha_j) \sin(\beta_j) \\ \cos(\beta_j) \\ \sin(\alpha_j) \sin(\beta_j) \end{pmatrix}_K \quad (1)$$

Aus geometrischen Betrachtungen und $\forall \vec{r}_i \in R \exists \vec{s}_j \exists S: \vec{r}_i = \vec{b} + \vec{s}_j$ folgt

$$s_j = r_i \frac{\cos \vartheta_i}{\cos \beta_j} \quad \text{und} \quad r_i = \frac{b}{\cos \varphi_i \sin \vartheta_i + \frac{\cos \vartheta_j}{\cos \beta_j} \cos \alpha_j \sin \beta_j} \quad (2)$$

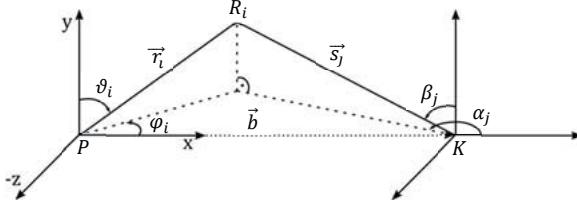


Bild 2: Darstellung der Koordinatensysteme

Durch Kenntnis der Größen $(b, \alpha_j, \beta_j, \varphi_i, \vartheta_i)$ der Teilprojektionen und Kenntnis der Korrespondenzen $i, j: \vec{r}_i = \vec{b} + \vec{s}_j$ kann durch Einsetzen von (2) in (1) auf die 3D-Koordinaten der Punkte R_i im Koordinatensystem P geschlossen werden [7].

Es gilt zu beachten, dass die Wahl der Koordinatensysteme für die analytische Berechnung der Distanzen r_i entscheidend ist. Der im vorangegangenen ausgeführte Spezialfall paralleler Koordinatensysteme in P und K ist im Allgemeinen nicht gegeben. Die Koordinatensysteme lassen sich allerdings durch Betrachtung der extrinsischen Parameter $(R_k, \vec{t}_k := K)$ der Kamera und $(R_P, \vec{t}_P := P)$ der Lasereinheit, welche die Rotation und Translation der Koordinatensysteme gegenüber dem Fahrzeugkoordinatensystem angeben, durch Koordinatentransformation zueinander parallelisieren, sodass die Gleichungen (1) und (2) anwendbar sind.

Dazu sei im Allgemeinen $L_P := \{\vec{l}_{i,P} = \vec{l}(\varphi_i', \vartheta_i') \mid i = 1, \dots, n\}$ die Menge der Einheitsvektoren, die die Richtungen der ausgesendeten Laserstrahlen im Laserkoordinatensystem angeben, siehe Abb. 3. Analog sei $C_K := \{\vec{c}_{j,K} = \vec{c}(\alpha_j', \beta_j') \mid j = 1, \dots, n\}$ die Menge der Vektoren, die im Kamerakoordinatensystem auf die Objektreflexionspunkte der auf den Objekten auftreffenden Laserstrahlen zeigen. Bei Kenntnis der extrinsischen Parameter von Kamera und Lasereinheit lässt sich die Rotationmatrix R_b bestimmen, die den Basisvektor $\hat{e}_{x,P}$ in x-Richtung des Koordinatensystems in P in Richtung des Verbindungsvektors $\vec{b} = \vec{t}_P - \vec{t}_K$ zwischen P und K rotiert, so dass $\vec{b} = b\hat{e}_{x,P}$ gilt. Um die in L_P und C_K enthaltenen Vektoren in die in Abb. 2 dargestellten parallelen Koordinatensysteme zu rotieren definieren wir die Funktionen

$$f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3: \hat{l}_i = R_b^{-1} \vec{l}_{i,P}(\varphi_i', \vartheta_i') \text{ und } g: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3: \hat{s}_j = R_b^{-1} R_p^{-1} R_K \vec{c}_{j,K}(\alpha_j', \beta_j')$$

in denen sie die Koordinatenrepräsentationen \hat{l}_i für die ausgesendeten und \hat{s}_j für die beobachteten Strahlen erhalten.



Bild 3: Darstellung der zueinander Rotierten Koordinatensysteme von Kamera und Laser im Fahrzeugkoordinatensystem. Die von den Scheinwerfern einfallenden und ausgehenden Pfeile zeigen in Richtung der Vektoren \vec{c}_j und \vec{l}_i .

Um die Triangulation nach Gleichung X auszuführen werden die Winkel der Vektoren $\hat{r}_i(x_i, y_i, z_i)$, $\hat{s}_j(x_j, y_j, z_j)$ in Kugelkoordinaten, wie folgt bestimmt:

$$\alpha_j = \text{atan}2(y_j, x_j); \beta_j = \arccos(y_j)$$

$$\varphi_i = \text{atan}2(y_i, x_i); \vartheta_i = \arccos(y_i)$$

Eingesetzt in Gl. (2) erhält man die Distanzen r_i und die zugehörigen Vektoren $\vec{r}_i = r_i \hat{r}_i$. Die Koordinaten im Fahrzeugkoordinatensystem, dessen Ursprung üblicherweise an der Hinterachse des Fahrzeugs definiert wird, ergeben sich durch Rücktransformation der Koordinaten zu $R_p R_b \vec{r}_i + \vec{t}_p$, mit der Anbauposition \vec{t}_p des Lasers im Fahrzeug.

Während die Winkel (φ_j, ϑ_j) direkt durch die gegebene Winkelverteilung $(\varphi_j', \vartheta_j')$ der ausgehenden Laserstrahlen festgelegt sind, müssen die Strahlen $\vec{c}(\alpha_j', \beta_j')$ zunächst aus den Kamerabildern anhand der ermittelten Pixelpositionen u_j, v_j der Laserpunkte im Kamerabild berechnet werden. Dazu wird das System durch ein Lochkameramodell [8] beschrieben, mit der intrinsischen Kameramatrix K , welche die Pixelpositionen auf die entsprechenden einfallenden Vektoren (x'_j, y'_j, z'_j) im Kamerakoordinatensystem abbildet. Es gilt:

$$l \cdot K^{-1} \begin{pmatrix} u_j \\ v_j \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_j \\ y'_j \\ z'_j \end{pmatrix}$$

mit der Kameramatrix

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

wobei f_x, f_y die Brennweiten des Linsensystems in der Sagital-/Meridionalebene, s den Scherfaktor und (c_x, c_y) das Bildzentrum der Kamera angeben. Der Skalierungsfaktor l kann so gewählt werden, dass für die z-Komponente $z'_j = 1$ gilt. Um Verzerrungen der Linse mit zu berücksichtigen kann ein Verzerrungsmodell k nach [9] mit den radialen Verzeichnungskoeffizienten k_1, k_2, k_3 und $r_j = x_j^2 + y_j^2$ angenommen werden, das die Verzerrung der einfallenden Stahlen modelliert:

$$\begin{pmatrix} x_j' \\ y_j' \end{pmatrix} = k(x_j, y_j, r_j) = \begin{pmatrix} x_j(1 + k_1r_j + k_2r_j^2 + k_3r_j^3) \\ y_j(1 + k_1r_j + k_2r_j^2 + k_3r_j^3) \end{pmatrix}$$

Die Funktion und $k: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ bildet dabei die unverzerrten x, y Koordinaten der einfallenden Strahlen im Kamerakoordinatensystem näherungsweise auf die von der Linse verzerrten Strahlen ab. Durch die Umkehrfunktion $k^{-1}: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2: x_j' \rightarrow x_j, y_j' \rightarrow y_j$ erhält man so die Vektoren $(x_j, y_j, 1)$ der entsprechenden unverzerrten, auf die Linse einfallenden Strahlen:

$$\vec{c}(\alpha_j', \beta_j') := \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ 1 \end{pmatrix}$$

2.2 Systemeigenschaften

Die Genauigkeit der Distanzmessung auf Basis der optischen Triangulation durch Streifenlicht hängt aufgrund der in Abschnitt 2.1 dargelegten Winkelabhängigkeit des Triangulationsalgorithmus neben der Winkelverteilung der ausgehenden Laserstrahlen auch vom Auflösungsvermögen der Kamera ab. Um Objekte in 200m Entfernung in ausreichender Genauigkeit zu erfassen gehen wir von einer Winkeländerung des horizontalen Ausstrahlwinkels der Laserquelle von $\Delta\phi < 0.25^\circ$ aus. Bei gegebener Anzahl der horizontalen und vertikalen Bildpunkte n_h, n_v des Sensors ergeben sich die horizontalen und vertikalen Sichtfelder (FOV_h, FOV_v) des Systems

$$FOV_h = 2 \arctan \left(\frac{n_h \cdot d}{2f_x} \right), \quad FOV_v = 2 \arctan \left(\frac{n_v \cdot d}{2f_y} \right) \quad (3)$$

mit der Pixelgröße d und den Brennweiten des Objektivs f_x und f_y . Die Winkelgenauigkeit mit der die Laserpunkte im Kamerabild detektiert werden können korreliert direkt mit der Winkeländerung $\Delta\alpha = n_{h,v}/FOV_{h,v}$ pro Pixel. Die Winkeländerung $\Delta\alpha$ nimmt dabei mit steigender Auflösung und Brennweite des Kamerasytems ab und resultiert so zu einer Vergrößerung der Distanzgenauigkeit. Daher muss im Allgemeinen ein Kompromiss zwischen optimaler Winkeländerung und des erforderlichen Sichtfeldes des Systems gewählt werden.

Der Distanzbereich, in dem Entferungen mit dem System gemessen werden können, wird maßgeblich von der Beleuchtungsstärke der auf den CMOS Sensor auftreffenden Bildern der

reflektierten Punkte beeinflusst. Um eine Teilprojektion erfolgreich im Kamerabild detektieren zu können muss deren Beleuchtungsstärke sich von der Hintergrundbeleuchtung und dem vorhandenen Sensorrauschen abheben. Bei vorhandener Sonneneinstrahlung verringert sich daher die maximal messbare Distanz bei gleichbleibender optischer Ausgangsleistung, da die in das Kameraobjektiv zurückgestreute Lichtleistung quadratisch mit der Entfernung zum Sensor abnimmt. Folglich haben auch die Geometrie der Reflexionsflächen sowie Materialeigenschaften, wie Reflexions- und Absorptionskoeffizienten einen wichtigen Einfluss auf die Detektierbarkeit der Laserpunkte, wie auch in den experimentellen Untersuchungen deutlich wurde. Eine Erhöhung der Laserleistung führt zwar zu einem vergrößerten Messbereich, ist aber durch die Notwendigkeit die Augensicherheit anderer Verkehrsteilnehmer nicht zu gefährden limitiert. Durch Verwendung eines optischen Bandpass-Filters am Kameraobjektiv kann das Signal-Rausch-Verhältnis hingegen im Allgemeinen verbessert werden.

Ein Vorteil des vorgestellten Systems gegenüber scannenden Messsystemen ergibt sich aus der Möglichkeit die 3D-Rekonstruktion aus einem Kamerabild für die gesamte Szene durchzuführen. Bei Einsatz eines CMOS-Chips mit Global-Shutter Technologie unterliegen die errechneten Punktfolgen daher nicht dem in Laserscannern vorhandenen Rolling-Shutter Effekt. Bei hohen Belichtungszeiten kann es allerdings aufgrund von Szenenänderungen im Kamerabild zu Änderungen der Objektlagen während der Aufnahme kommen, was zu einer ungenauen Distanzmessung führen kann. Da sich höhere Belichtungszeiten positiv auf den Distanzmessbereich auswirken, gilt es einen Kompromiss zwischen der Bildwiederholrate W , die die Belichtungszeit auf $1/W$ begrenzt und der erforderlichen Messgenauigkeit in dynamischen Szenen zu finden. Die Blendenzahl des Objektivs ist dabei so niedrig wie möglich zu wählen, jedoch so groß wie nötig, dass bei der gewählten Brennweite Nah- und Fernpunkt der Schärftiefe den gewünschten Messbereich einschließen.

Da die 3D-Rekonstruktion der Punktewolke aus dem Kamerabild resultiert ist die Zuordnung der Punkte zu Objekten im Kamerabild intrinsisch gegeben. Die 3D Daten sind dadurch mit dem Kamerabild von Anfang an fusioniert. Um die in Abschnitt 2.1 definierten extrinsischen Parameter zu erhalten muss zunächst eine Kamera-Projektor Kalibrierung durchgeführt werden. Das in [1] vorgestellte System erlaubt es durch Verfahren von charakteristischen Punkten in der Lichtverteilung von Scheinwerfern, beispielsweise durch Bewegung der Stellmotoren oder durch Dimmung von einzelnen LEDs bei Matrix-Scheinwerfern und durch Erkennung der charakteristischen Punkte im Kamerabild, die Fehlstellung der Scheinwerfer und somit die extrinsischen Parameter des Systems zu berechnen. Durch die Verwendung von Mustern in der

Projektion der Laserstrahlen kann die Algorithmik der Kamera-Scheinwerferkalibrierung für das vorgestellte System generell angewendet werden ohne die Lichtverteilung dynamisch zu verändern, da von vornherein eine Verteilung der charakteristischen Punkte im Kamerabild vorliegt. Als Streifenlicht Muster kommen dabei beispielsweise räumlich kodierte pseudo-random Verteilungen [10] in Frage. Allgemein sind für das System allerdings beliebige Muster verwendbar, die die Bestimmung der Korrespondenzen zwischen ausgesendeten und einfal-lenden Strahlen ermöglichen. Die Auswahl geeigneter Muster und deren Dekodierung für die Verwendung des Systems im Scheinwerfer wird in dem Beitrag nicht weiter untersucht. Im folgenden Kapitel werden einfache Linienmuster zur Bestimmung der Gesamtperformance ei-nes prototypischen Systems verwendet.

3. Experimentelle Untersuchungen

Um die optischen Eigenschaften und Leistungsfähigkeit eines auf Lasertriangulation basieren-den Systems zu untersuchen wurde ein prototypisches System aufgebaut und unter verschie-denen Lichtbedingungen getestet. Die Experimente wurden durchgeführt unter Verwendung einer CMOS-Kamera mit einer Auflösung von 2048 x 2048 Bildpunkten. Durch die Größe der Sensorpixel von 5.5µm und die Brennweite des verwendeten Objektivs von 50mm ergibt sich nach Gl. (3) ein Sichtfeld von 12.85°. Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern wurde zudem ein Bandpassfilter mit 5nm Halbwertsbreite vor dem Objektiv eingesetzt. Als Projektionseinheit kamen für Versuchszwecke anstatt einem Infrarotlaser zwei Lasermodule mit der mittleren Wellenlänge von 660nm und 100mW maximaler optischer Leistung zum Einsatz, de-ren Strahlen über eine Fokussierlinse und ein diffraktives optisches Element in ein Linienmus-ter aufgeteilt wird.

Abb. 4. zeigt den Aufbau des prototypischen Systems auf einem Rollwagen, an dem ein Alu-miniumträger angebracht ist an dem die Kameraeinheit und die beiden Lasermodule befestigt sind. Der Basisabstand zwischen Kamera und Lasereinheit wurde auf 1,3m festgelegt um die Messeigenschaften bei einem Einbau in das Scheinwerfersystem mit einem typischen Abstand nachzubilden.



Bild 4: Tischaufbau mit angebrachtem Messsystem. Die Kamera (links) und zwei Lasermodule (rechts), sind auf Aluminiumprofilen in einer Distanz von 1,3m zueinander angebracht.

Um die einzelnen Punkte besser referenzieren zu können wurden DOE eingesetzt, die unterschiedliche Abstrahlcharakteristiken aufweisen: der Strahl des oberen Lasermoduls wird auf 99 Punkte mit einer optischen Leistung von jeweils 1mW, in einen Winkelbereich von 19,1° aufgeteilt. Das untere Muster wird durch ein unterschiedliches DOE aus 11 Punkten gebildet, die einen Winkel von 16,75° aufspannen.

Um die Laserpunkte im Kamerabild zu detektieren und deren Zentren die Pixelkoordinaten (u_j, v_j) zuzuweisen, wird ein Gradienten basiertes Template-Matching Verfahren angewendet, das die im Bild sichtbaren Laserpunkte mit mehreren unter unterschiedlichen Randbedingungen aufgenommen prototypischen Verteilungen vergleicht. Anschließend müssen die detektierten Punkte mit den von den Lasern ausgesendeten zugehörigen Strahlen identifiziert werden. Da das ausgesendete Muster keine charakteristischen Merkmale aufweist, geschieht dies über die Berechnung der Distanzen (z_u, z_v) aus dem horizontalen und vertikalen Versatz der Kamera und Minimierung des Distanzfehlers über alle detektierten Punkte. Durch Kenntnis der Korrespondenzen und bilden der Triangulationsdreiecke können dann aus den Kamerabildern die 3D-Koordinaten der Laserpunkte errechnet und zu einer Punktwolke zusammengefasst werden.



Bild 5: Projektion des ausgesendeten Musters mit 99 Punkten (oben) und 11 Punkten (unten).

Da sowohl die Detektion der Punkte, als auch die Zuordnung zu einem der ausgesendeten Strahlen fehlerbehaftet sind, kann es durch Falschdetektionen zu inkorrekt Distanzberechnungen kommen. In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass dies vor allem dann auftritt, wenn Laserpunkte auf inhomogene Flächen oder Kanten treffen.

Um die Performanz des Systems zu ermitteln wurden sowohl Messungen bei Tageslicht als auch bei Dunkelheit durchgeführt und jeweils mit Referenzmessungen verglichen. Als Objekte wurden Fahrzeuge und zum mobile Stellwände in den Strahlengang gestellt, siehe Abb. 6.

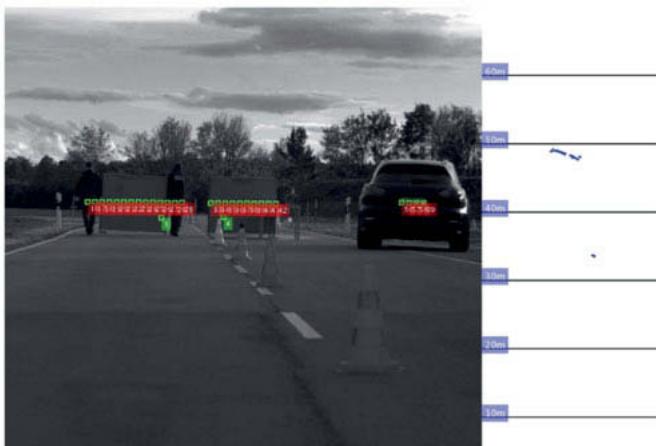


Bild 6: Durchführung einer Messung. Die im Bild detektierten Punkte sind durch Kästen hervorgehoben und mit Labeln versehen, die den zugehörigen aus-gehenden Strahl identifizieren. Rechts dargestellt ist die aus den detektierten Punkten durch Triangu-lation errechnete Punktewolke (Vogelperspektive).

Der verwendete Detektionsalgorithmus zeigt bei Tageslicht eine höhere Anfälligkeit für Falsch-detections, da zusätzlich Streulicht von Objekten zur Kamera reflektiert. Vor allem Strukturen im Bild, die Gradienten aufweisen, die dem Profil der Laserpunkte ähnlich sind, z.B. an Objektkanten können durch den Algorithmus nicht unterschieden werden. In verschiedenen Situationen kann es außerdem zu Nichtdetections kommen. In Bild 6 ist erkennbar, dass auf dem dunklen Fahrzeug lediglich Punkte auf dem Nummernschild detektiert wurden. Während Punkte auf Retroreflektoren gut erkennbar sind können stark reflektierende oder geneigte Flächen die Detektionsrate vermindern.

Bei Tag können Distanzen von 6m bis 50m durch das System erfasst werden, sofern die Zentren der Laserpunkte gut bestimmbar sind. Einmalige Messungen erreichten eine Distanz bis zu 80m bei Tag. Eine Detection der ausgestrahlten Projektion konnte bei Nacht bis in 130m Entfernung durchgeführt werden. Werden nebeneinanderliegende Teilprojektionen von der Kamera detektiert, so erreicht das Gesamtsystem eine Winkelauflösung von unter 0,2°.

4. Fazit und Ausblick

Das vorgestellte Lasertriangulationssystem ermöglicht es durch die Projektion von Streifenlichtmustern Distanzen im Fahrzeugvorfeld zu messen und somit die Scheinwerfer potentiell um ein kostengünstiges Sensorsystem zu erweitern. Der prototypische Versuchsaufbau konnte tagsüber Distanzen bis 50m mit einer Winkelauflösung von 0,2° bestimmen. Durch das verwendete einfache Linienmuster ist die Möglichkeit die Lage von Objekten zu bestimmen mit dem verwendeten Prototyp allerdings eingeschränkt. Durch Verwendung von kodierten Mustern mit größerer vertikaler Winkelverteilung kann sowohl die Erkennung von Objekten als auch die Identifikation der Laserpunkte stark verbessert werden, wodurch Fehldetections reduziert werden können. Um ein solches System im Scheinwerfer einsetzbar zu machen müssen anstelle von Farblasern Infrarotlaser zum Einsatz kommen. Da die Intensität des Sonnenlichtspektrums im Nahinfrarotbereich geringer ist als bei den verwendeten 660nm, ist dadurch mit einer weiteren Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses zu rechnen, was mit einem größeren Messbereich einhergeht. Ein symmetrischer Aufbau mit jeweils einer Kamera und einem Lasersystem auf beiden Seiten ermöglicht zudem ein vergrößertes Sichtfeld des Gesamtsystems. Um die Einsatzmöglichkeit des Systems in Scheinwerfern weitergehend zu untersuchen, ist zukünftig neben der Erprobung im Fahrzustand auch der Aufbau eines prototypischen Scheinwerfers als Entwicklungsschritt zu sehen.

- [1] Söhner, S.; Stork, W.: Online-Kalibrierung von Hauptscheinwerfern und Referenzmessverfahren. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): SIMVEC – Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung: 17. Kongress mit Fachausstellung, Baden-Baden, 18. und 19. November 2014. VDI Verlag, 2014 (VDI-Berichte 2224), S. 639–702
- [2] Christian Schneider et al.: Automotive depth perception based on the interaction of multi pixel light projections and adaptive gabor kernels. Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. 2017
- [3] Vogt, H.: Glare-Free LED High Beam System – Segments – Pixel – High Resolution Matrix. Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting. 2017
- [4] Scharstein D., Szeliski, R.: High-accuracy stereo depth maps using structured light. Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1:195–202, 2003.
- [5] Geng, J.: Structured-light 3-D surface imaging: A tutorial, *Adv. Optics Photonics*, vol. 3, no. 2, pp. 128–160, 2011
- [6] Jih-Huah Wu, Tao-Yuan: Triangulation-based laser range finder using a complementary metal-oxide semiconductor image sensor for application to automotive systems. *Optical Engineering* 45(4), 044302. April 2006
- [7] Hesse, S., Schnell, G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation, Wiesbaden:4. Auflage, Vieweg Teubner, 2009
- [8] Zhang, Z.: Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations. International Conference on Computer Vision 1 (1999) p. 666-673
- [9] Moreno, D., Taubin, G.: Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration. 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission 2 (2012) p. 464-471
- [10] Jeong, J. et al.: High-Quality Stereo Depth Map Generation Using Infrared Pattern Projection. ETR Journal, Volume35, Issue6 2013, p. 1011-1020

Hochauflösender LCoS Scheinwerfer

High Resolution LCoS Headlight

Dr. J. Roth,

Dr. I. Petermann-Stock,

Volkswagen AG, Wolfsburg

Kurzfassung

Die Entwicklung hochauflösender Scheinwerfer ist aktuell eines der treibenden Themen in der automobilen Lichttechnik. Das vorliegende Paper beschreibt einen innovativen Ansatz eines hochauflösenden Scheinwerfers, der ein Liquid Crystal on Silicone (LCoS) Display als Lichtmodulator verwendet. Neben der Beschreibung des optischen Konzeptes, werden mit Messungen die Vor- und Nachteile der Technologie dargestellt. Ebenfalls werden Beispiele von Lichtfunktionen im Lichtkanal vorgestellt, die das Potenzial des LCoS Prototypen-Scheinwerfers demonstrieren.

Abstract

The development of high resolution headlights is one of the topics of current interest in automotive lighting. This paper describes an innovative approach of a high resolution headlight that comprises a Liquid Crystal on Silicone (LCoS) Display as a light modulator. Beside the description of the optical concept, the paper presents advantages and disadvantages of the technology based on measurements. Furthermore, the potential of the LCoS prototype headlight is demonstrated showing examples of light functions in the light tunnel.

1. Einleitung

In den vergangenen Jahren hat sich die automobile Lichttechnik hinsichtlich Lichtquellen und Lichtverteilung stark weiterentwickelt. Neben dem Einsatz von LASER-Phosphor Lichtquellen in Kleinserien haben sich LED-Matrix Lichtsysteme im Markt etabliert. Das derzeit performanteste LED-Matrix Lichtsystem umfasst ein dreizeiliges LED-Array mit 84 einzeln adressierbaren Lichtpunkten pro Scheinwerfer. Hierbei leuchtet das LED-Array einen großen Winkelbereich der Lichtverteilung aus, der zur Realisierung von Abblendlicht- und

Fernlichtfunktionen verwendet wird. Somit wird zusätzlich nur ein weiteres Modul zur Ausleuchtung des Fahrzeugvorfelds benötigt.

Um die Performance pixelbasierter Lichtsysteme hinsichtlich der Ausleuchtung weiter zu optimieren, ist das Ziel von Forschung und Entwicklung die Auflösung der Lichtverteilung weiter zu erhöhen. Klassische LED-Matrix Lichtsysteme sind aufgrund thermischer, optischer und mechanischer Limitierungen in der Auflösung begrenzt. Sollen hingegen Funktionalitäten wie eine digitale Leuchtweltenregulierung umgesetzt werden, sind Auflösungen von mehr als 30.000 Pixeln bzw. weniger als 0,1° Winkelauflösung notwendig [2].

Solch hohe Auflösungen lassen sich nur mit Technologien erzielen, die aus Videoprojektoren bekannt sind. In der Literatur sind zur Realisierung eines Scheinwerfers Ansätze unter Verwendung von DLP (Digital Light Processing), LCD (Liquid Crystal Display) oder Mikrosensoren bekannt [1], [2], [3]. Während beim DLP-Ansatz die maximale Lichtstärke bzw. die Größe des adressierten Winkelbereiches aufgrund des Etendues begrenzt ist, sinkt die optische Effizienz des LCD-Ansatz mit der Erhöhung der Auflösung. Scannende Systeme weisen aufgrund ihrer oft sinusförmigen Schwingung eine ebenfalls geringe Intensität im Zentrum der Lichtverteilung auf und bedingen aufgrund der kleinen Baugröße die Verwendung von Laserlichtquellen.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird deshalb ein innovativer Ansatz zur Realisierung eines hochauflösenden Scheinwerfers unter Verwendung von LCoS (Liquid Crystal on Silicone) beschrieben. Das Licht einer LED-Lichtquelle wird hierbei auf einen LCoS Modulator mit einer Auflösung von 1920x1280 Pixeln fokussiert. Durch pixelweise Beeinflussung der Polarisation des Lichtes kann eine beliebige Lichtverteilung generiert werden. Des Weiteren wird zur Erhöhung der Lichtstärke im Zentrum der Lichtverteilung eine verzeichnende Projektionsoptik verwendet. Das Paper erläutert den optomechanischen Aufbau des Systems und diskutiert erste Messergebnisse eines Funktionsdemonstrators. Außerdem werden erste Ergebnisse von beispielhaften Lichtfunktionen im Lichtkanal vorgestellt. Abschließend wird das Optimierungspotenzial des Ansatzes diskutiert.

2. Konzeptauslegung

Die Grundproblematik, die sich bei der Ausleuchtung eines großen Field of Views (FOV) ergibt, sind die hohen benötigten Lichtströme, die zum Erreichen der geforderten Beleuchtungsstärken benötigt werden. Bei einem FOV von 30°x10° ergibt sich in 25m Entfernung eine Fläche von rund 57m². Wird die Fläche homogen mit einer Beleuchtungsstärke von 100lx ausgeleuchtet, bedingt das einen Lichtstrom von 5700lm. Da hochauflösende Scheinwerferkonzepte im Allgemeinen geringe optische Effizienzen

aufweisen, müssen die Lichtquellen im genannten Beispiel Lichtströme von über 15.000lm bereitstellen. Deshalb ist es nötig entweder eine vordefinierte Intensitätsverteilung auf dem Lichtmodulator (DMD, LCD; LCoS) oder durch die Projektionsoptik eine Intensitätsverteilung zu generieren. Während eine vordefinierte Intensitätsverteilung auf dem Modulator zu einer höheren thermischen Belastung auf diesem führt, bedingt eine Intensitätsumverteilung mittels Projektionsoptik erhöhten optischen Aufwand.

Ein LCoS Display ist von der physikalischen Wirkweise ähnlich zu einem LC-Display, nur dass das Licht bei einem LCoS reflektiert und nicht transmittiert wird. Das Licht wird folglich pixelweise in seiner Polarisation gedreht, wodurch sich ein beliebiges Bild modulieren lässt. Dadurch, dass die Leiterbahnen der Transistorschaltungen zur Ansteuerung der Flüssigkristallzellen beim LCoS Display hinter der reflektiven Schicht des Displays liegen, kann ein hoher Füllfaktor erreicht werden. Bei einem LC-Display liegen diese gitterartigen Schaltungen in der Displayebene, so dass eine Erhöhung der Auflösung zu einer Verringerung des Wirkungsgrades führt [4].

Das optische Konzept des LCoS Scheinwerfers lässt sich anhand der in Bild 1 dargestellten Skizze vereinfacht erläutern. Das Licht der LED wird mittels der Beleuchtungsoptik gebündelt und auf die LCoS Displays mit einer Auflösung von 1920x1080 Pixeln fokussiert. Da es sich um einen Multi-LED Chip handelt, werden die emittierenden Flächen mittels eines Mikrolinsenarrays überlagert, so dass eine homogene Ausleuchtung auf den LCoS Displays realisiert wird. Zwischen der Beleuchtungsoptik und den LCoS Displays befindet sich ein Polarization Beam Splitter (PBS). Abhängig von der Polarisation des Lichtes wird das Licht an der Grenzfläche des PBS reflektiert bzw. transmittiert. Im unten dargestellten Fall wird s-polarisiertes Licht (gestrichelt) reflektiert und p-polarisiertes Licht (durchgezogen) transmittiert. Durch Verwendung zweier LCoS Displays (1+2) können beide Polarisationsrichtungen des Lichtes genutzt werden. Das auf die LCoS Displays fallende Licht kann pixelweise durch die Flüssigkristalle manipuliert und beispielsweise von s zu p gedreht werden. Nur die Lichtanteile bzw. Pixel, die durch die LCoS Displays manipuliert werden, fallen anschließend in die verzeichnende Projektionsoptik. Dieser Fall ist exemplarisch in Bild 1 illustriert. Nicht manipulierte Strahlenanteile fallen zurück in die Lichtquelle.

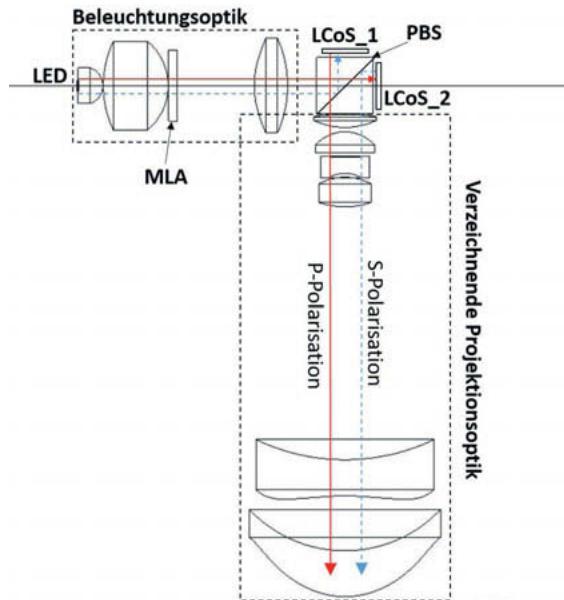


Bild 1: Optisches Konzept des LCoS-Scheinwerfermoduls mit beispielhafter Darstellung beider Polarisationsrichtungen (s+p)

Die homogene Intensitätsverteilung auf den LCoS Displays wird anschließend mittels der verzeichnenden Projektionsoptik umverteilt, so dass die Intensität im Zentrum der Lichtverteilung erhöht wird. Dies ist notwendig um die hohen Beleuchtungsstärken eines KFZ-Scheinwerfers bei einem gleichzeitig großen FOV zu erzielen. Durch die Verzeichnung werden die Pixel im Zentrum kleiner abgebildet und die Größe dieser nimmt zu den Rändern der Lichtverteilung zu. In Bild 2 ist die simulierte Lichtverteilung des obigen Konzeptes dargestellt. Die Verzeichnung kann digital durch eine Vorkonditionierung des Eingangs-Bildes kompensiert werden. Der gestrichelte Bereich in Bild 2 markiert das FOV von $30^\circ \times 10^\circ$. Zusätzlich sind zwei Maskierungen dargestellt, um die Schärfe des Systems zu illustrieren. Zur Realisierung einer Gesamtlichtverteilung wird zusätzlich, wie bei heutigen Matrixsystemen, eine statische Grundlichtverteilung benötigt.

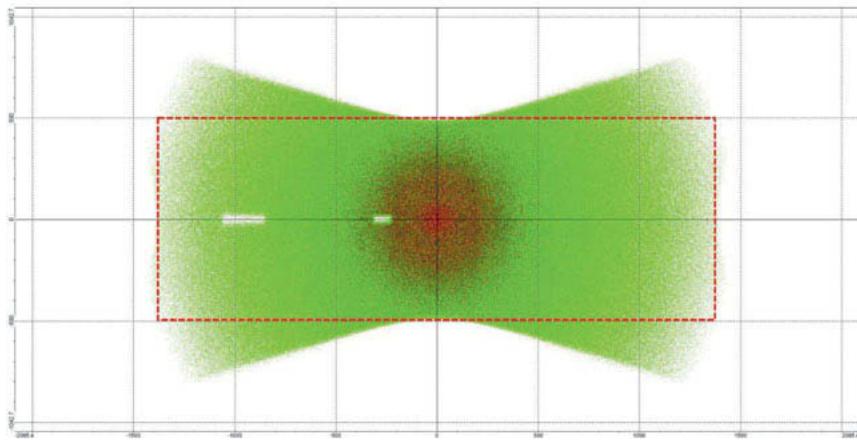


Bild 2: Simulierte Lichtverteilung des oben beschriebenen Konzeptes mit zwei Maskierungen. Der gestrichelte Bereich markiert ein FOV von $30^\circ \times 10^\circ$.

Die optische Gesamteffizienz des oben beschriebenen Systems liegt in der theoretischen Betrachtung bei 30%. Während des Aufbaus des Prototypen wurde jedoch festgestellt, dass der Polarisation Beam Splitter die Polarisationen nicht sauber voneinander trennt. Dies führt dazu, dass nicht nur s-polarisiertes Licht reflektiert wird, sondern auch ein kleiner Teil des p-polarisierten Lichtes. Bei einer Beleuchtung des LCoS Display mit nicht eindeutig polarisiertem Licht wird der Kontrast in der Projektion deutlich gemindert. Die Reflexion am Polarisation Beam Splitter resultiert aus seinem physikalischen Wirkprinzip. Da die Gitterstrukturen bei einem Wiregrid-Polarisator aus Aluminium sind, wird ein Teil des Lichtes unabhängig von der Polarisation an diesem reflektiert. Da Kontraste von über 300:1 im Scheinwerfer gefordert werden, lässt sich das oben gezeigte Konzept in dieser Form nicht verwenden. Da ein Postpolarizer zur Reinigung des einen Polarisationspfad bei einem reflektivem LCoS Display nicht verwendet werden kann, wurde zur Demonstration des Funktionsprinzip ein Vorpolarisator nach der Beleuchtungsoptik integriert. Dieser transmittiert nur s-polarisiertes Licht, so dass das zweite LCoS Display nicht mehr benötigt wird. Jedoch lässt sich durch den Vorpolarisator nur noch 40% des aus der Beleuchtungsoptik emittierenden Lichtstroms nutzen. Hierdurch fällt der theoretische optische Wirkungsgrad auf 12%, jedoch steigt der theoretische Kontrast auf nahezu 400:1.

Um den Wirkungsgrad zu steigern, kann statt eines Vorpolarisators ein Polarization Conversion System (PCS) verwendet werden [5]. Dieses dreht die zweite Polarisation in

Richtung der ersten, anstatt sie wie beim Vorpolarisator zu blockieren. Hierdurch wird der theoretische Wirkungsgrad nahezu verdoppelt, allerdings erhöht sich auch das Etendue. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde aufgrund der Verfügbarkeit jedoch ein Vorpolarisator verwendet.

3. Scheinwerferprototyp

Das oben beschriebene LCoS Konzept wurde als Modul in ein Serienscheinwerferbauraum integriert, um die Anforderungen an den Bauraum abschätzen zu können. Dies ist in den beiden Darstellungen in Bild 3 zu erkennen. Zusätzlich zu dem hochauflösenden LCoS Lichtmodul wurde ein einfaches Reflektormodul zur Realisierung einer breiten Grundausleuchtung des Vorfeldes integriert. Beide Module zusammen realisieren die Gesamtlichtverteilung des Scheinwerfers.

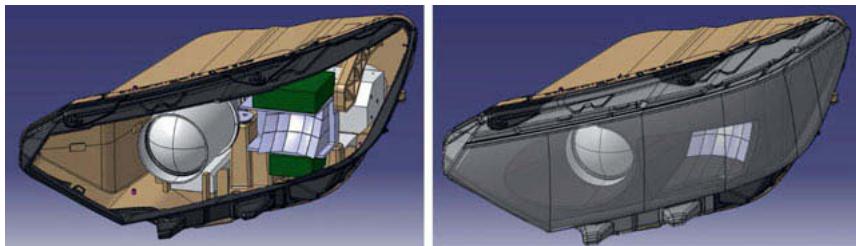


Bild 3: Integration des LCoS-Moduls in einen Serienscheinwerferbauraum. Zusätzlich zum LCoS-Modul ist ein Reflektormodul zur Grundausleuchtung des Vorfeldes integriert.

Die Vermessung des oben dargestellten Prototypen erfolgte auf einem Goniophotometer. Neben der maximalen Lichtstrommessung erfolgte eine Schwarzbildmessung zur Bestimmung der maximalen Kontrastwerte. In Bild 4 ist die Maximallichtstrommessung dargestellt. Insgesamt wird ein Lichtstrom von 500lm und eine Beleuchtungsstärke von 40lx erreicht. Das horizontale FOV beträgt ca. 26°. Der optische Wirkungsgrad liegt leicht unter dem konzeptionellen Maximum. Die Differenz lässt sich dadurch erklären, dass in dem LCoS-Modul eine Blende verbaut wurde, um die Abbildungsschärfe variieren zu können. Allerdings wird selbst bei maximaler Öffnung der Blende ein Teil des Lichtes blockiert, so dass auch der Ausgangslichtstrom minimiert wird. Ebenfalls wird hierdurch das Field of View leicht beschnitten und erreicht nicht die in der Auslegung geforderten 30°.

Aufgrund der starken Linsenkrümmungen der verzeichnenden Projektionsoptik, weisen die Linsen Fertigungsfehler auf. Diese führen zu zwei Effekten: zum einen reduziert sich im zentralen Bereich die Schärfe des Systems, zum anderen wird die Beleuchtungsstärke stark

reduziert, da das Licht nicht mehr fokussiert werden kann. Die Fertigungsfehler sind ebenfalls gut im oberen rechten Quadranten der in Bild 4 gezeigten Lichtverteilung erkennbar. Eine weitere Herausforderung des Systems ergibt sich aus der Anzahl der optischen Komponenten, die zueinander justiert werden müssen. Während der Vermessung auf dem Goniophotometer führten bereits minimale Lageänderungen der Lichtquelle zu großen Lichtstromveränderungen. Auch alle weiteren Komponenten tragen erheblich zur Lage, Schärfe und Leistung der Lichtverteilung bei.

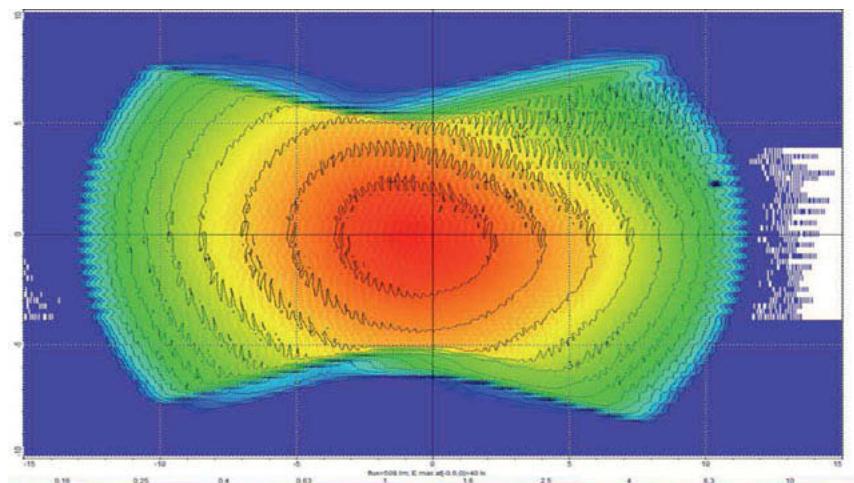


Bild 4: Auf dem Goniophotometer gemessene Lichtverteilung bei einem weißen Eingangsbild.

In Bild 5 ist die Schwarzwertmessung des LCoS Moduls dargestellt. Sehr auffällig ist, dass die rechte Seite der Projektion deutlich höhere Beleuchtungsstärken aufweist als die linke. Da der Wire Grid Polarisor zum Trennen der Polarisation zwischen zwei Glasprismen verkittet ist, ist davon auszugehen, dass eine Erwärmung dieser Kitschicht zu einer Polarisation des Lichtes führt. Da der Polarization Beam Splitter um 45° versetzt zum Lichtbündel liegt, ist eine Seite des Wire Grid Polarisators höheren Intensitäten ausgesetzt. Dies führt dazu, dass ein kleiner Teil des Lichtes auch beim Schwarzwert in die Projektionsebene fällt und den Kontrast stark reduziert. Ebenfalls ist zu beobachten, dass die Lichtfarbe in diesem Bereich mit der Zeit gelblich wird. Auch im linken oberen Bereich der Projektion lässt sich erkennen, dass die Beleuchtungsstärke bereits einen erhöhten Wert aufweist. Zur Lösung dieser Problematik

sollte ein Wire Grid Polarisator ohne Glasprismen verwendet werden, so dass die Polarisation des Lichtes nicht durch eine Kit-Schicht beeinflusst werden kann.

Während der Entwicklung des Prototypen wurden die LCoS Displays anstelle der standardmäßig aluminiumbeschichteten Reflektionsebene, eine dielektrische entwickelt. Hierdurch wird der Reflektionsgrad deutlich erhöht. Jedoch konnten diese Displays nicht im Prototypen verbaut werden, da somit die Leistung auf dem Polarization Beam Splitter erhöht wird und die oben beschriebenen Effekte zunehmen.

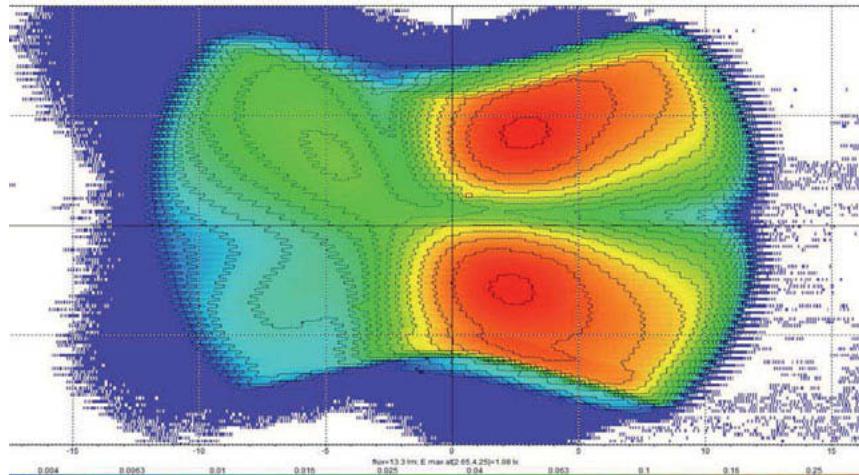


Bild 5: Auf dem Goniophotometer gemessene Lichtverteilung bei einem schwarzen Eingangsbild.

4. Erprobung im Lichtkanal

Um die Performance des oben beschriebenen Prototypenscheinwerfer hinsichtlich der Funktionalität zu erproben, wurde dieser im Lichtkanal aufgebaut und ausgerichtet. In Bild 6 sind beispielhaft verschiedene Lichtfunktionen, die mit dem Prototypen projiziert wurden dargestellt. In Bild 6a) ist das gesamte Fernlicht eingeschaltet und das Verkehrsschild überblendet. Diese Überblendung lässt sich lokal minimieren, so dass sich der Inhalt des Schildes vgl. Bild 6b) ablesen lässt. Befindet sich ein Hindernis auf der Fahrbahn, das außerhalb des Sichtbereiches des Fahrers liegt, jedoch über die Fahrzeugumfeldsensorik detektiert werden kann, ließe sich eine Kollision durch frühzeitige Projektion einer Ausweichtrajektorie, wie beispielhaft in Bild 6c) illustriert, vermeiden.

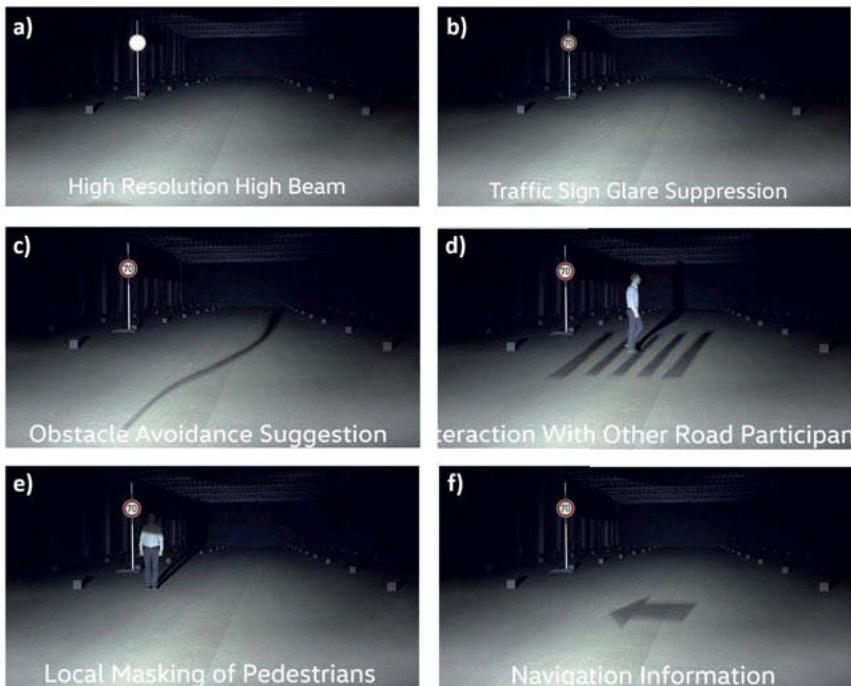


Bild 6: Darstellung von Beispiellichtfunktionen im Lichtkanal: a) Gesamtes HD Fernlicht b) Blendungsreduzierung an retroreflektiven Schildern c) Ausweichtrajektorie bei einem Hindernis auf der Fahrbahn d) Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern e) Lokale Maskierungen von Personen und Fahrzeugen f) Navigationsinformationen

Da sich Fahrzeuge in Zukunft zunehmend in einer steigenden Anzahl an Fahrszenarien automatisiert bewegen werden, wird die Kommunikation des Fahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern an Bedeutung gewinnen. Beispielhaft ist für diese kommunikativen Lichtfunktionen in Bild 6d) die Projektion eines dynamischen Zebrastreifens dargestellt, der dem Passanten signalisiert, dass er sicher die Straße passieren kann. Neben der lokalen Entblendung von Verkehrsschildern, ist auch das lokale Entblenden von Passanten und Fahrzeugen ein wichtiger Funktionsbestandteil hochauflösender Scheinwerfersysteme, um dem Fahrzeugführer möglichst viel Licht zur Ausleuchtung der Umgebung zur Verfügung zu stellen. Dies ist beispielhaft in Bild 6e) dargestellt. Darüber hinaus lassen sich auch schärfere Symbole wie z.B. ein Navigationspfeil in Bild 6f) realisieren. Bei allen Lichtfunktionen für

hochauflösende Scheinwerfer sollte die Erhöhung der Verkehrssicherheit oberste Priorität haben.

Um die maximale Performance des LCoS-Prototypenscheinwerfers zu demonstrieren, wurde wie in Bild 7 illustriert ein Video auf eine 15m entfernte Messwand projiziert. Hier wird auch die Verzeichnung der Projektionsoptik ersichtlich. Diese lässt sich jedoch durch einen Algorithmus digital kompensieren.



Bild 7: Projizierter Videoinhalt auf eine 15m entfernte Messwand zur Veranschaulichung der maximalen Scheinwerferperformance

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Paper stellt einen Ansatz für einen hochauflösenden Scheinwerfer auf Basis eines LCoS – Modulators vor. Im Vergleich zur DMD/DLP Technologie lässt sich mit einem LCoS ein größerer Winkelbereich ausleuchten, da die Etendue des LCoS größer ist. Im Vergleich zur LCD Technologie bietet LCoS einen von der Auflösung unabhängigen Wirkungsgrad, da die Transistorschaltungen zum Steuern der Flüssigkristalle hinter einer reflektiven Schicht liegen und damit den Lichtdurchsatz nicht mindern. Ebenfalls lässt sich aufgrund der reflektiven Nutzung eines LCoS die Abwärme auf der Rückseite des Modulators abführen. Im Vergleich zu den beiden Technologien DMD/DLP und LCD ermöglichen LCoS Modulatoren deutlich höhere Auflösungen.

Da sich bei dem vorgestellten LCoS Prototypen aufgrund der Kontrastminderung durch den Polarisation Beam Splitter nicht beide Polarisationen nutzen lassen, wird durch Verwendung eines Vorpolarisators der optische Gesamtwirkungsgrad deutlich gemindert. Wird anstelle des

Vorpolarisators ein Polarization Conversion System (PCS) verwendet, ließe sich der Wirkungsgrad nahezu verdoppeln. Somit könnte ein ähnlicher Wirkungsgrad wie bei einem optischen Aufbau mit LCD erreicht werden. Mit dem DMD/DLP lässt sich theoretisch ein höherer Wirkungsgrad erzielen, allerdings ist das maximal ausgeleuchtete Field of View aufgrund der geringen Etendue des Modulator deutlich kleiner als bei LCD und LCoS.

Der vorgestellte LCoS Prototyp erzielt auf dem Goniophotometer einen gemessenen Lichtstrom von 500lm bei einer maximalen Beleuchtungsstärke von 40lx. Um die Anforderungen an einen automobilen Scheinwerfer zu erreichen, müsste der Lichtstrom verdoppelt und die Beleuchtungsstärke verdreifacht werden. Dies wäre durch die Verwendung des PCS und einer Optimierung der Fertigungsqualität sowie Justagegenauigkeit möglich. Das Potenzial der Technologie wird durch beispielhafte Lichtfunktionen im Lichtkanal demonstriert.

Grundsätzlich weisen jedoch alle hochauflösenden Scheinwerferansätze unter Verwendung subtraktiver Modulatoren geringe optische Effizienzen auf. Insbesondere im Abblendlichtbetrieb werden diese Effizienzen weiter reduziert, weil bei nahezu konstantem Eingangslightstrom der Ausgangslightstrom reduziert wird. Dies führt zu hohen elektrischen Leistungsaufnahmen, die in Hinblick auf die Elektromobilität als kritisch anzusehen sind. Hier weisen Mikro-Pixel-LEDs, die das Lichtbild additiv erzeugen, geringere Leistungsaufnahmen und höhere optische Effizienzen auf, wenn auch aktuell die Auflösungen geringer sind. Hinsichtlich der Elektromobilität ist dieser Technologieansatz jedoch sehr vielversprechend.

- [1] Bhakta, V. R., Ballard, B.: High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP® technology. International Symposium on Automotive Lighting 2015 Proceedings, 2015, 483-494
- [2] Hesse, H.: BMBF-Project VOLIFA 2020 - High resolution light distribution by using a LCD, Symposium on Automotive Lighting 2015 Proceedings, 2015, 495-502
- [3] Reisinger, B., Reinprecht, M., Pürstinger, J., Moser, A., Böhm, G., Bauer, F.: Potentials of MEMS-based scanners and DMD arrays with high luminance LED and LASER light sources, Symposium on Automotive Lighting 2015 Proceedings, 2015, 473-482
- [4] Cuypers, D., De Smet, H., Van Calster, André: LCOS microdisplay technology for advanced applications, Journal of the society for information displays, Volume 15, Issue 10, 2017, 775-788
- [5] Kim, J., Komanduri, R. K., Lawler, K. F., Kekas, D. J., Escuti, M. J.: Efficient and monolithic polarization conversion system based on a polarization grating, Appl. Opt. 51, 2012, 4852-4857

Aktiver Scheinwerfer mit DMD-Technologie zur Erzeugung vollständiger Lichtverteilungen

M. Knöchelmann, Dr.-Ing. A. Wolf, Dr.-Ing. G. Kloppenburg,

Prof. Dr.-Ing. R. Lachmayer,

Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und
Gerätebau

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird der Prototyp eines aktiven Scheinwerfers vorgestellt, der durch den Einsatz eines Mikrospiegelarrays (DMD) hochauflöste Lichtverteilungen generieren kann. Mit der eingesetzten verzeichnenden Projektionsoptik wird das Aspektverhältnis entsprechende einer KFZ-Lichtverteilung aufgeweitet und ein mittiger Hotspot mit hoher Beleuchtungsstärke erzeugt. Dadurch kann der Nutzungsgrad der Mikrospiegel und damit der Systemwirkungsgrad im Vergleich zu bisherigen Prototypen deutlich gesteigert werden, was anhand einer typischen Fernlichtverteilung gezeigt wird. Basierend auf der optischen Simulation werden die Vor- und Nachteile der verzeichnenden Optik diskutiert und abschließend Ergebnisse der photometrischen Vermessung des Prototyps vorgestellt.

Abstract

In this paper we present the prototype of an active headlamp that can generate high-resolution light distributions by using a micromirror array (DMD). A distortive projection optics is used to widen the aspect ratio according to a headlamp light distribution and to generate a central hotspot with high illuminance. As a result, the degree of utilization of the micromirror and thus the system efficiency compared to previous prototypes can be significantly increased, as shown by a typical high beam distribution. Based on the optical simulation, the advantages and disadvantages of the distortive optics are discussed and finally results of the photometric measurement of the prototype are presented.

1. Einleitung

Mit neuen Scheinwerfertechnologien wie Matrix-LED Systemen können unter anderem eine Blendung des Gegenverkehrs vermieden und Gefahrenstellen markiert werden. Durch den Technologiesprung zu hochauflösenden Scheinwerfern können diese Lichtfunktionen präziser umgesetzt und der Funktionsumfang erweitert werden, beispielsweise um Projektionen auf die Straße.

Für hochauflösende Scheinwerfer werden aktuell verschiedene Technologien diskutiert [1] - [6], eine klare Entscheidung für oder gegen eine Technologie für die Serienentwicklung ist bisher nicht gefallen. Eine mögliche Umsetzung hochauflösender Scheinwerfer basiert auf der DMD-Technologie (Digital Micromirror Device). Diese aus der Videoprojektion stammende Technik hat im Vergleich zu anderen Technologien eine sehr hohe Auflösung und ist sehr schnell schaltbar. Nachteilig ist, dass DMDs bisher nur mit einem von der KFZ-Lichtverteilung stark abweichenden Seitenverhältnis verfügbar sind. Eine klassische, verzeichnungsfreie Projektionsoptik bildet den DMD so ab, dass eine homogene Lichtverteilung entsteht. Daher muss im gesamten Winkelbereich der Lichtverteilung die maximale Hotspot-Beleuchtungsstärke vorgehalten werden, was im Randbereich zu einer dauerhaft hohen Absorptionsrate des Lichtes und einer niedrigen Systemeffizienz führt. Sinnvoller ist es einen Teil des Lichtstroms von den Rändern zu der Mitte der Lichtverteilung umzuverteilen und so die Effizienz deutlich zu steigern.

Eine vielversprechende Lösung ist die Verwendung einer verzeichnenden Projektionsoptik mit asphärischen Linsen, die im Vergleich zu einer konventionellen abbildenden Optik eine Verbreiterung des Öffnungswinkels des Scheinwerfers ermöglicht und gleichzeitig einen zentralen Hotspot erzeugt. Damit ist es möglich, eine vollständige Scheinwerfer-Lichtverteilung mit einem einzigen optischen System zu erzeugen. Gleichzeitig kann der Wirkungsgrad gegenüber nicht-verzeichnenden Systemen signifikant gesteigert werden. In diesem Beitrag werden deshalb die Herausforderungen betrachtet, die sich bei der Entwicklung eines solchen hochauflösenden Scheinwerfers mit DMD-Technologie ergeben. Die Validierung erfolgt anhand von Scheinwerfer-Prototypen, die auf der rotationssymmetrischen Verzeichnung basieren.

2. Systembeschreibung

Mit vollständig adaptiven und hochauflösenden Scheinwerfersystemen, wie dem hier beschriebenen DMD-Scheinwerfer, können neuartige Funktionalitäten umgesetzt werden. Mit der Projektion von Symbolen direkt auf die Fahrbahnoberfläche entsteht eine völlig neue Möglichkeit der Kommunikation im Verkehrsraum, die auch insbesondere im Kontext autonomer

Fahrzeuge an Bedeutung gewinnen wird. Auf dem Weg zu teilautonomen und vollständig autonomen Fahrfunktionen spielen die Erkennung und Interpretation der Umgebung und der aktuellen Verkehrssituation eine entscheidende Rolle. Zukünftige Scheinwerfer können genutzt werden, um Sensorik zu integrieren, oder durch die Projektion von Mustern die Umgebung für Kamerasysteme besser sichtbar zu machen.

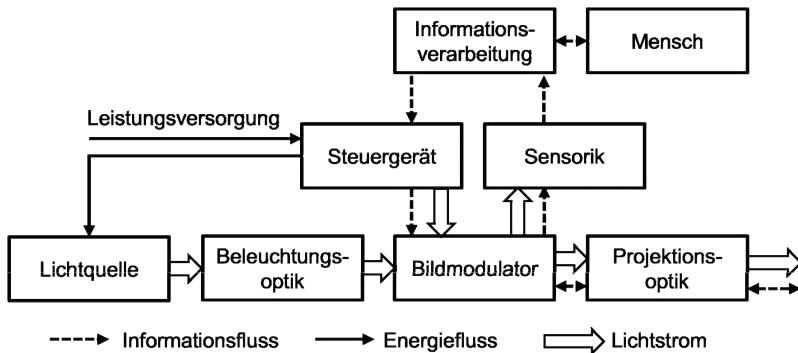


Bild 1: Elemente eines hochauflösenden Scheinwerfers nach [7]

Aktuelle Scheinwerfer werden als mechatronische Systeme beschrieben, die Signale einer zentralen Fahrzeugsteuerung mit Aktoren umsetzen und eine begrenzte Zahl zuvor definierter Lichtfunktionen anzeigen. Um die neuen Funktionalitäten zukünftiger Scheinwerfer zu beschreiben, muss diese Betrachtung erweitert werden. In Bild 1 sind die Elemente eines hochauflösenden Scheinwerfers sowie der Energie- und Informationsfluss dargestellt. Da der Lichtstrom durch das System wichtig ist, wird dieser in der Darstellung abweichend von der VDI 2206 [7] statt des Stoffflusses dargestellt. Die Besonderheit des dargestellten Systems ist der Informationsaustausch des Scheinwerfers mit der Umgebung. Die durch den Bildmodulator erzeugte Information wird mittels der Projektionsoptik auf die Straße projiziert. Die Optik kann gleichzeitig dazu genutzt werden aus einem großen Winkelbereich Informationen wie die Straßentopologie oder die Beleuchtungssituation zu erfassen.

In diesem Beitrag wird die erstgenannte Möglichkeit der Informationsdarstellung mittels hochauflösender Fahrzeugscheinwerfer betrachtet.

3. Analyse

Das Ziel des beschriebenen Vorhabens ist es vollständige KFZ-Lichtverteilungen mit einem DMD-basierten Scheinwerfer zu erzeugen. In diesem Kapitel wird aufgezeigt, welche Herausforderungen dabei auftreten.

Für diese Analyse wird zuerst eine Fernlichtverteilung als Grundlage definiert. Diese Lichtverteilung stellt den Ausgangspunkt für alle weiteren Lichtfunktionen dar, welche durch lokales reduzieren der Lichtmenge erzeugt werden können. Die Effizienz des Systems wird basierend auf der Fernlichtteilung aus Bild 2 durchgeführt. Andere Betriebszustände wie Abblendlicht oder das Ausblenden von Verkehrszeichen [8] und anderen Verkehrsteilnehmern führen durch die subtraktive Bilderzeugung des DMDs zu einem geringeren Systemwirkungsgrad.

3.1 Lichtverteilung

In Bild 2 ist die Beleuchtungsstärkeverteilung eines beispielhaften Scheinwerfers gezeigt, wobei das HID-Fernlicht sowie ein halogenbasiertes Zusatzfernlicht aktiviert sind. Im Zentrum wird die maximale Beleuchtungsstärke von 156 lx erreicht, der Gesamtlichtstrom der Verteilung beträgt 1440 lm.

Für die weitere Betrachtung wird die Lichtverteilung auf den relevanten Winkelbereich $\pm 25^\circ$ horizontal und $+5/-10^\circ$ vertikal reduziert, wo etwa 86 % des Gesamtlichtstroms auftreten.

KFZ-Lichtverteilungen umfassen einen schmalen vertikalen und breiten horizontalen Winkelbereich und weisen einen zentralen Hotspot mit hoher Beleuchtungsstärke auf. Das Aspektverhältnis, also der Quotient aus maximaler horizontaler und vertikaler Ausdehnung der Lichtverteilung, liegt bei etwa 4:1. Im Hotspot ist eine Beleuchtungsstärke gewünscht, die am Rand der Lichtverteilung um den Faktor 100 und mehr geringer ist. Das Seitenverhältnis und die inhomogene Beleuchtungsstärkeverteilung sind Eigenschaften einer KFZ-Lichtverteilung, die sich von der Hauptanwendung von DMDs in Videoprojektoren unterscheiden, wo das Aspektverhältnis beispielsweise 4:3 oder 16:10 beträgt und eine möglichst homogene Beleuchtungsstärkeverteilung gefordert ist.

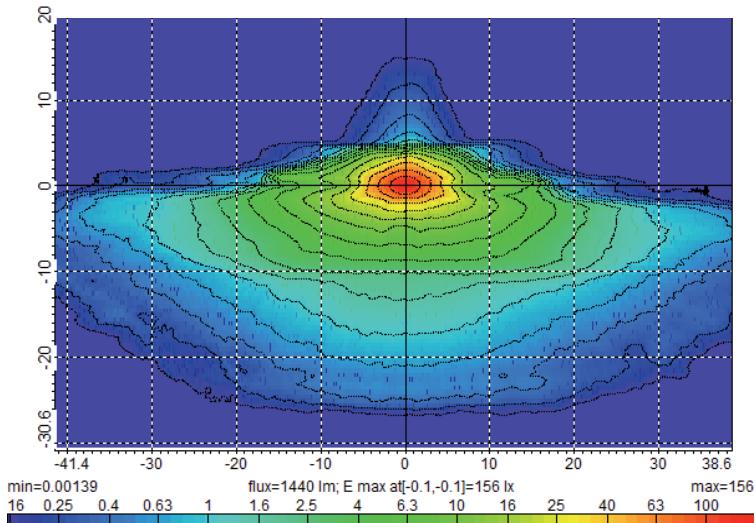


Bild 2: Beispielhafte Lichtverteilung eines Fernlichts

Herausforderung 1:

Anpassen des Aspektverhältnisses des DMDs auf das Verhältnis von KFZ-Lichtverteilungen

Herausforderung 2:

Erzeugen einer inhomogenen Beleuchtungsstärkeverteilung mit zentralem Hotspot

Der maximal erreichbare Kontrast einer Projektion ist eine wichtige Eigenschaft für die Bewertung von Videoprojektoren und liegt für DMD-Projektoren bei etwa 2000:1. Eine Anforderung an den Kontrast für Lichtverteilungen kann aus der ECE 112 [9] abgeleitet werden, in der für eine Abblendlichtverteilung über der Hell-Dunkel Grenze eine maximale Beleuchtungsstärke von 0,4 lx gefordert wird. Für die definierte Fernlichtverteilung muss der Scheinwerfer einen Kontrast von 309:1 erreichen, also deutlich weniger als bei Videoprojektoren.

3.2 Systemwirkungsgrad

Die Bilderzeugung mit einem DMD erfolgt subtraktiv, das bedeutet, dass bei einer homogenen Beleuchtung des DMDs viele Pixel dauerhaft stark gedimmt werden müssen. Dies hat eine starke Reduktion des Systemwirkungsgrades zur Folge. Der Systemwirkungsgrad setzt sich bei einem DMD-Scheinwerfer mit subtraktiver Bilderzeugung aus dem optischen Wirkungsgrad und dem Nutzungsgrad des DMDs zusammen. Der Nutzungsgrad gibt an wie hoch das Verhältnis der An und Aus-Positionen der Spiegel des DMDs ist. Nachfolgend wird der Nutzungsgrad für die oben gezeigte Lichtfunktion nach der Notation von Gut [10] hergeleitet.

Die Beschreibung der Lichtfunktion erfolgt anhand der Lichtstärkematrix A_I der Lichtfunktion.

$$A_I = \begin{bmatrix} I_{F,11} & \cdots & I_{F,1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{F,m1} & \cdots & I_{F,mn} \end{bmatrix}$$

Der Lichtstrom einer Lichtfunktion $\phi_{V,F}$ ergibt sich über das Integral der Winkelbereiche u' und v' (Definition der Winkel in Bild 4):

$$\phi_{V,F,ij} = \int_{-v'}^{v'} \int_{-u'}^{u'} I_{ij} \, du' dv'.$$

Die gesamte Lichtstrommatrix hat die folgende Form:

$$A_\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{V,F,11} & \cdots & \phi_{V,F,1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{V,F,m1} & \cdots & \phi_{V,F,mn} \end{bmatrix}.$$

Das Funktionsprinzip des DMDs beruht auf einer subtraktiven Bilderzeugung. Licht, das auf den DMD trifft wird entweder in die Projektionsoptik gelenkt, oder in einer Lichtfalle absorbiert. Bei einer homogenen Beleuchtung des DMD bedeutet dies, dass der notwendige Lichtstrom der Lichtquelle $\phi_{V,Q}$ von dem maximalen Teillichtstrom $\phi_{V,F,mn}$ abhängt. Dieser Teillichtstrom muss bei einer homogenen Beleuchtung des DMDs auf dem gesamten DMD vorgehalten werden.

$$\phi_{V,Q} = \frac{n \cdot m}{\eta_{BO} \cdot \eta_{DMD} \cdot \eta_{PO}} \max \begin{bmatrix} \phi_{V,F,11} & \cdots & \phi_{V,F,1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{V,F,m1} & \cdots & \phi_{V,F,mn} \end{bmatrix}$$

Der Wirkungsgrad der Beleuchtungsoptik η_{BO} setzt sich aus dem optischen Wirkungsgrad des Linsensystems und dem Anteil des Lichts, das von der Lichtquelle mit der Optik aufgefangen werden kann, zusammen. Der Wirkungsgrad des DMDs η_{DMD} enthält die Reflexions- und Transmissionseigenschaften des Spiegelmaterials und der Scheibe vor dem Spiegelarray. Es ist außerdem ein Faktor zur Berücksichtigung des Beleuchtungswinkels enthalten. Der Wirkungsgrad der Projektionsoptik η_{PO} hängt von der Anzahl, Qualität und Beschichtung der Linsen ab.

Aus $\phi_{V,Q}$ ergibt sich mit

$$\phi_{V,F} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \phi_{V,F,ij}$$

der optische Systemwirkungsgrad η_{Sys} .

$$\eta_{Sys} = \frac{\phi_{V,F}}{\phi_{V,Q}}$$

Gut [10] definiert einen Nutzungsgrad K , um die Auswirkung der subtraktiven Bilderzeugung des DMDs mit anderen Technologien vergleichen zu können. Der Nutzungsgrad K_F wird für eine spezielle Lichtfunktion bestimmt, indem für jeden Spiegel des DMD das Verhältnis zwischen An- und Aus-Position bestimmt wird und anschließend über den gesamten DMD gemittelt wird.

$$K_F = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \phi_{V,F,ij}}{\max(A_\phi) \cdot m \cdot n}$$

Zusammen mit den optischen Wirkungsgraden der Einzelkomponenten kann aus dem Nutzungsgrad ebenfalls der optische Systemwirkungsgrad η_{Sys} bestimmt werden.

$$\eta_{Sys} = \frac{\phi_{V,F}}{\phi_{V,Q}} = K_F \cdot \eta_{BO} \cdot \eta_{DMD} \cdot \eta_{PO}$$

Für die zuvor definierte Fernlichtverteilung ergibt sich für den Winkelbereich $\pm 25^\circ$ horizontal und $+5/-10^\circ$ vertikal ein Nutzungsgrad von $K_F = 5,2\%$. Gut [10] berechnet für eine andere Fernlichtverteilung in einem Winkelbereich von $\pm 20^\circ$ horizontal und $\pm 10^\circ$ vertikal einen Nutzungsgrad von $K_F = 8,5\%$. Für andere Lichtfunktionen reduziert sich der Wert noch weiter, da in der Fernlichtverteilung der höchste Lichtstrom genutzt wird. Um den Energiebedarf und die Wärmeentwicklung der Lichtquelle zu begrenzen, muss für einen Einsatz eines DMDs für vollständige Lichtverteilungen der Nutzungsgrad deutlich erhöht werden.

Herausforderung 3: Erhöhung des Nutzungsgrades

DMDs, die für den Einsatz im Fahrzeug geeignet sind, haben im Vergleich zu anderen Lichtmodulatoren eine sehr kleine Fläche. Die Anforderungen an die Leuchtdichte der Lichtquelle sind daher besonders hoch. Auf die Auswahl und Auslegung der Lichtquelle wird in diesem Beitrag aber nicht der Fokus gelegt.

4. Synthese des optischen Systems

Für die analysierten Herausforderungen existieren bereits Lösungen, die teilweise als Prototypen umgesetzt sind. Tabelle 1 gibt einen Überblick über mögliche Lösungen und ordnet den Stand der Forschung zu. Anschließend wird in diesem Kapitel die Auslegung der Projektionsoptik beschrieben und Simulationsergebnisse dazu vorgestellt.

Tabelle 1: Optische Konzepte für vollständige Lichtverteilungen

	Aspektverhältnis anpassen	Hotspot erzeugen	Nutzungsgrad erhöhen
Variation der Abbildungsbedingungen der Projektionsoptik [11] - [15]	X	X	X
Inhomogene Beleuchtung des DMD [11], [12], [16]		X	X
Umfeldverspiegelung [13]	X		
Nutzung des Absorberlichtstroms [17] - [19]			X
Einsatz einer Pixellichtquelle [20], [21]			X

Die Variation der Abbildungsbedingungen der Projektionsoptik ist ein vielversprechendes Konzept, das bereits von mehreren Forschergruppen untersucht und teilweise als Prototyp umgesetzt wurde. Günther [11] und Bhakta [12] nutzen für die Aufweitung des Aspektverhältnisses eine Projektionsoptik mit Zylinderlinsen.

Zur Erzeugung eines mittigen Hotspots kann der DMD inhomogen beleuchtet werden. Durch diese Vormodellierung auf dem DMD kann die Systemeffizienz im Vergleich zu einer homogenen Ausleuchtung des DMD deutlich erhöht werden. Bestenfalls ist kein weiteres Dimmen einzelner Pixel mehr durch den DMD notwendig.

Als weiteren Ansatz, um das Aspektverhältnis der Lichtverteilung anzupassen, schlägt Kauschke [13] vor, das Umfeld des DMD zu verspiegeln. Aufgrund der möglichen Abschattung durch den schrägen Lichteinfall und die Schwierigkeit einen Spiegel in der gleichen Ebene zu platzieren wie die DMD-Mikrospiegel, verfolgt Kauschke dieses Konzept selbst nicht weiter.

Statt das Licht ausgeschalteter oder gedimmter Pixel auf einen Absorber zu lenken, kann dieses für andere Zwecke, zum Beispiel zur Generation einer Grundlichtverteilung, genutzt werden [17] - [19]. Kauschke [13] gibt zu beachten, dass eine wechselseitige Verknüpfung

zwischen dem Nutzlicht und dem Absorberlicht besteht. Er sieht die Nachteile überwiegen und verfolgt die Nutzung des Absorberlichts nicht weiter.

Wird eine Lichtquelle eingesetzt, die aus mehreren schaltbaren Einzellichtquellen besteht, z.B. ein LED Array, kann die Beleuchtung des DMDs an die aktuelle Lichtverteilung angepasst werden [20], [21]. Mit diesem Ansatz ist eine deutliche Steigerung des Nutzungsgrades zu erwarten.

Da die Variation der Abbildungsbedingungen der Projektionsoptik auf alle der Herausforderungen einen positiven Einfluss haben kann, wird dieses Konzept weiter verfolgt. Für die Auslegung der Projektionsoptik wird das Teilsystem (DMD → Projektionsoptik → 25 m Wand) genauer betrachtet.

Der Abbildungsmaßstab eines optischen Systems ist definiert als Verhältnis zwischen der Bildgröße und der realen Gegenstandsgröße. Um den Einfluss des Abbildungsmaßstabes zu verdeutlichen, wird aus der Lichtstärkematrix I_F die Beleuchtungsstärkematrix E_{25m} abgeleitet. KFZ-Lichtverteilungen werden üblicherweise auf einer $r = 25$ m entfernten Messwand bewertet. Bei senkrechtem Lichteinfall gilt:

$$E = \frac{I_F}{r^2}.$$

Der Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärkematrix der Messwand E_{25m} und der Beleuchtungsstärkematrix des DMD E_{DMD} ist über den Abbildungsmaßstab β der Projektionsoptik gegeben:

$$\beta^2 = \frac{E_{25m}}{E_{DMD}}.$$

In abbildenden optischen Systemen ist der Abbildungsmaßstab konstant über die gesamte Gegenstandsfläche. Das Seitenverhältnis der Abbildung ist identisch zu der des Gegenstandes und die Lichtstärke bleibt ebenfalls konstant. Wird bei der Projektionsoptik gezielt der Abbildungsmaßstab über die Fläche verändert, ergeben sich Vorteile, die für die Darstellung von KFZ-Lichtverteilungen genutzt werden können.

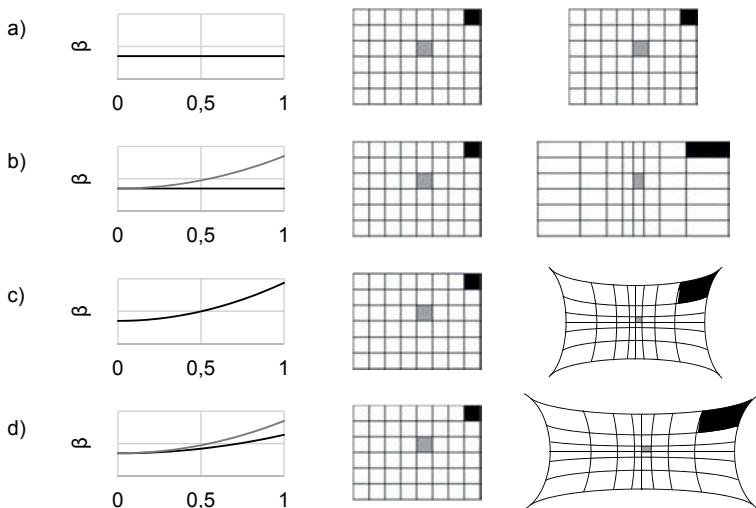


Bild 3: Konzepte für die Projektionsoptik. Abszisse: Relative Position auf dem DMD. Ordinate: Abbildungsmaßstab. Variation des Abbildungsmaßstabes: a) konstant. b) veränderlich in Richtung x oder y. c) veränderlich in radialer Richtung. d) unterschiedlich veränderlich in Richtungen x und y.

In Bild 3 ist dargestellt, welchen Einfluss eine Änderung des Abbildungsmaßstabes hat. Das Ziel des veränderlichen Abbildungsmaßstabes ist es eine homogen beleuchtete Fläche so abzubilden, dass eine inhomogene Abbildung dieser Fläche entsteht. Bild 3 a) zeigt den konstanten Abbildungsmaßstab eines idealen optischen Systems ohne Verzeichnung. Bei b) wird die Abbildung in einer Richtung z.B. durch den Einsatz von Zylinderlinsen gestreckt. Das Aspektverhältnis kann mit diesem Ansatz gezielt beeinflusst werden. An der Größe der abgebildeten Pixel ist ersichtlich, dass sich außerdem ein horizontaler Gradient der Beleuchtungsstärke mit einem Maximum im Bereich der mittigen vertikalen Achse ergibt.

Wie in Bild 3 ersichtlich ist, kann damit das Aspektverhältnis beeinflusst werden und außerdem der Lichtstrom von den Rändern der Lichtverteilung zur Mitte umverteilt werden. Der veränderliche Abbildungsmaßstab in radialer Richtung in c) führt zu ähnlichen Effekten. Vorteilhaft gegenüber b) ist, dass ein runder Bereich hoher Beleuchtungsstärke im Zentrum entsteht, der direkt für den Hotspot genutzt werden kann. Das Aspektverhältnis kann in diesem Ansatz nicht unabhängig von der Kurve des Abbildungsmaßstabes verändert werden. Daher ergeben sich

aus der gewünschten Änderung des Aspektverhältnisses feste Stützpunkte, die bei der Auslegung der Optik beachtet werden müssen. In d) ist der Ansatz mit der höchsten Flexibilität gezeigt, bei dem die Änderung des Abbildungsmaßstabs in x- und y-Richtung unabhängig voneinander bestimmt werden kann.

Um das Potenzial der Variation des Abbildungsmaßstabes zu analysieren, soll eines der Konzepte bei der Auslegung einer Projektionsoptik umgesetzt werden, um anschließend einen Prototypen eines DMD-Scheinwerfers aufzubauen.

Der Ansatz c) erlaubt den Einsatz von rotationssymmetrischen Linsen, was Vorteile bei der Simulation, der Fertigung und der späteren algorithmischen Bildkorrektur bietet. Nachfolgend wird daher beschrieben, wie ein optisches System nach Ansatz c) ausgelegt und simuliert werden kann.

4.1 Auslegung des optischen Systems

Das Ziel der im Folgenden beschriebenen Auslegung ist es die Kurve des Abbildungsmaßstabes analytisch zu bestimmen und anschließend in einer optischen Simulation umzusetzen. Im Folgenden wird dafür nicht mehr der Abbildungsmaßstab beschrieben, sondern der Zusammenhang zwischen der Position ohne Verzeichnung auf dem DMD und der erwünschten Position mit Verzeichnung auf der Wand.

Im ersten Schritt werden die radialen Maxima der Beleuchtungsstärke bestimmt, damit die geforderte Lichtverteilung dargestellt werden kann. Dafür wird die Lichtverteilung in Polarkoordinaten umgewandelt und für jedes r die maximale Beleuchtungsstärke $E(\varphi)$ in Abhängigkeit vom Winkel φ bestimmt.

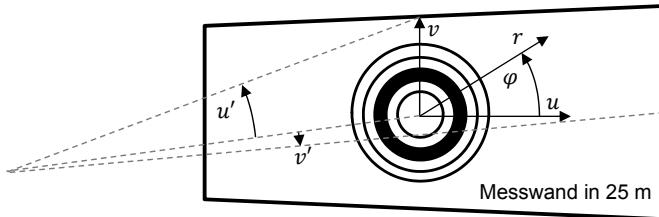


Bild 4: Bestimmung der radialen Maxima der Lichtverteilung

Für jedes Ringsegment kann anschließend der notwendige Lichtstrom $d\phi(r_{\text{Wand}})$ ermittelt werden:

$$d\phi(r_{\text{Wand}}) = E(r_{\text{Wand}}) \cdot \pi \cdot dr_{\text{Wand}}^2 .$$

Aus dem Lichtstrom jedes Segments wird jetzt die Fläche auf der Wand bestimmt, die das Ringsegment bei einer nicht verzeichnenden Abbildung hätte. Dafür wird eine beliebige konstante Beleuchtungsstärke, hier $E_{\text{const}} = 1 \text{ lx}$, auf der Wand angenommen.

$$dA = d\phi(r_{\text{Wand}})/E_{\text{const}}$$

Aus dieser Formel wird anschließend der Radius bestimmt, wobei dieser Radius der Betrachtung ohne Verzeichnung dem Radius r_{DMD} auf dem DMD entspricht. Nach einer Normierung auf den jeweils maximalen Radius ist damit der Zusammenhang zwischen dem Radius r_{Wand} und r_{DMD} bzw. den Positionen gefunden.

In einer anschließenden optischen Simulation wird ein Linsensystem dahingehend optimiert, dass die geforderte Verzeichnung erreicht wird.

4.2 Ergebnis der Simulation

In Bild 5 ist die Kurve der Verzeichnung der simulierten Projektionsoptik dargestellt. Gegenüber einem nicht verzeichnenden optischen System ist die starke Umverteilung des Lichts hin zur Mitte erkennbar.

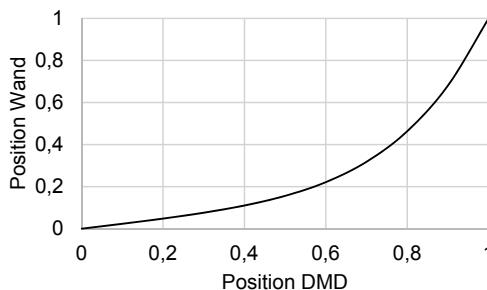


Bild 5: Kurve der Verzeichnung der simulierten Projektionsoptik

In Bild 6 ist ein horizontaler Schnitt durch die Lichtverteilung der simulierten Optik dargestellt. Die starke Verzeichnung der Optik resultiert in hohen Gradienten der Beleuchtungsstärke. Auf der rechten Seite wurden an den Positionen 0° , 3° und $8,3^\circ$ jeweils acht Pixel ausgeschaltet, um den erreichbaren Kontrast zu bestimmen.

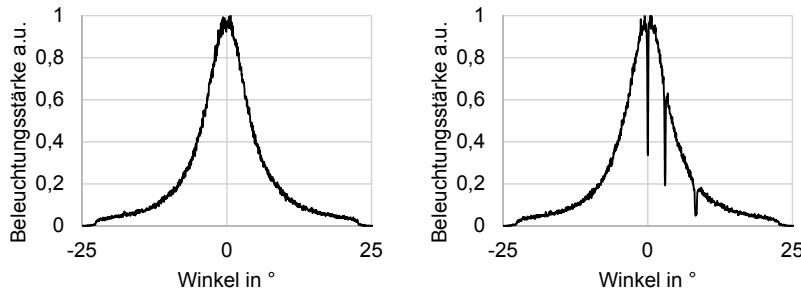


Bild 6: Horizontaler Schnitt durch die simulierte Lichtverteilung der Projektionsoptik. Rechts: Ausblendung von acht Pixeln an drei Positionen

Als Kontrast in Bild 7 ist das Verhältnis der Beleuchtungsstärke mit und ohne deaktivierte Pixel angegeben. Es ist ersichtlich, dass der Kontrast in der Mitte der Verteilung (0°) geringer ist als am Rand. Dies kann durch die Verzeichnung der Optik verursacht werden, da diese Pixel am Rand größer abgebildet als in der Mitte der Verteilung. Um den Einfluss der chromatischen Aberration zu analysieren, wurde die Simulation mit acht deaktivierten Pixeln zusätzlich monochromatisch durchgeführt. Der Kontrast ist in der monochromatischen Simulation etwa viermal so hoch wie in der polychromatischen. Aufgrund des Fertigungsprozesses der Linsen wurde für alle Linsen das Material PMMA gewählt und die Simulation daher nicht hinsichtlich einer geringen chromatischen Aberration optimiert.

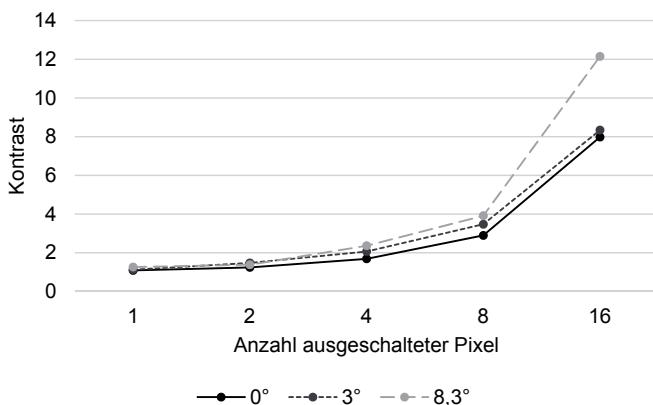


Bild 7: Kontrast in der Simulation an drei Positionen der Lichtverteilung

5. Validierung

Die simulierte Projektionsoptik wurde am IPeG gefertigt ein Prototyp eines hochauflösenden Scheinwerfers aufgebaut (Bild 8). In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der photometrischen Vermessung gezeigt und beschrieben. Die Vermessung erfolgte auf einem Fernfeldgoniophotometer in 25 m Messdistanz.



Bild 8: Prototyp im Scheinwerfergehäuse

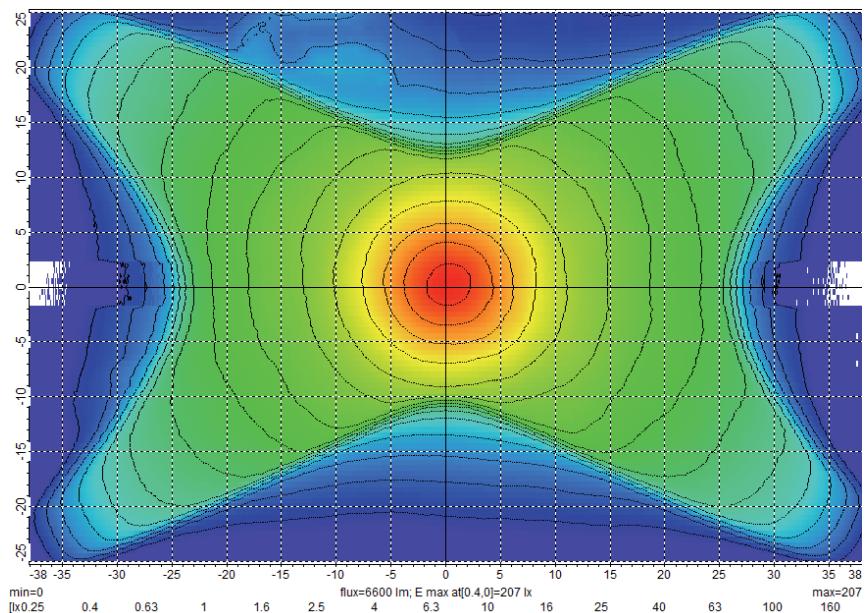


Bild 9: Vollständige Messung der Lichtverteilung des Prototyps

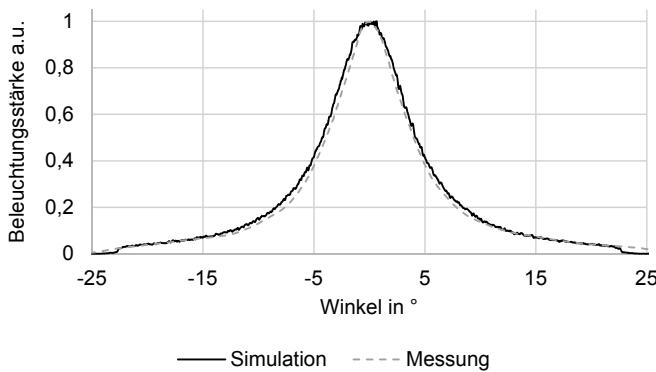


Bild 10: Vergleich des horizontalen Schnitts der Simulation und Messung im horizontalen Schnitt, normiert auf die maximale Beleuchtungsstärke

Die in Bild 9 gezeigte Lichtverteilung ergibt sich, wenn sich alle Spiegel des DMDs in der Anstellung befinden, also ein weißes Bild projiziert wird. Die maximale Beleuchtungsstärke beträgt 207 lx im Zentrum der Verteilung und der gesamte Lichtstrom beträgt 6600 lm. In einem Rechteck von $\pm 25^\circ$ horizontal und $\pm 10^\circ$ vertikal treffen 5290 lm auf, was etwa 80 % des Gesamtlichtstroms beträgt. Dieser Bereich kann für die Darstellung von Lichtfunktionen sinnvoll genutzt werden, sodass der Wirkungsgrad mit der vorgestellten Optik maximal 80 % betragen kann. Im Vergleich mit der Simulation zeigt sich die hohe Qualität der Fertigung und Justage der optischen Komponenten (Bild 10).

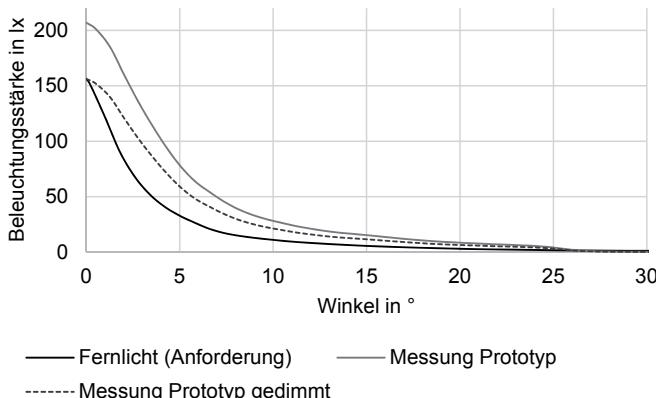


Bild 11: Vergleich der Beleuchtungsstärke des Prototyps mit dem definierten Fernlicht

In Bild 11 ist die Beleuchtungsstärke des Prototyps der definierten Fernlichtverteilung gegenübergestellt. Der Nutzungsgrad für diese Lichtverteilung beträgt bei voller Leistung des Prototyps 18,9 %. In diesem Fall kann ohne Einbußen in der Beleuchtungsstärke des Hotspots ein um $\pm 2^\circ$ mitschwenkendes Kurvenlicht realisiert werden. Wird der Lampenlichtstrom soweit reduziert, dass der Prototyp genau die geforderte Beleuchtungsstärke im Hotspot erreicht, beträgt der Nutzungsgrad 25,8 %.

Der theoretische Kontrast des Systems wird mittels Raytracing bestimmt, in dem an drei Positionen der Lichtverteilung Pixel ausgeblendet werden. Die entsprechende Messung am realen System zeigt, dass die Werte der Simulation nicht erreicht werden können. Eine Ursache dafür ist die Unschärfe der Projektionsoptik, die unter anderem durch Fertigungstoleranzen und Justage bedingt ist. Ungewollte Streuung von Licht an der Innenseite des Gehäuses der Optik hat ebenfalls einen negativen Einfluss auf den gemessenen Kontrast. Zusammen mit einer Antireflexbeschichtung der zurzeit nicht beschichteten Linsen lässt sich dieses Potential für eine Optimierung des Systems nutzen.

In der Szene in Bild 12 sind exemplarische einige mögliche Funktionen dargestellt, die sich mit dem DMD-Scheinwerfer umsetzen lassen.



Bild 12: Einsatz des Prototyps zur Informationsprojektion bei Abblendlicht im Lichtkanal

6. Diskussion und Ausblick

Für die Entwicklung hochauflösender Scheinwerfer kommen verschiedene Technologien in Frage. Alle Module mit subtraktiver Bilderzeugung wie ein LCD, DMD oder LCoS haben gemeinsam, dass der Nutzungsgrad einen direkt Einfluss auf die Systemeffizienz hat. Für die Umsetzung vollständiger KFZ-Lichtverteilungen mit einem typischen Aspektverhältnis und großen Gradienten der Beleuchtungsstärke ist der Nutzungsgrad sehr gering.

In diesem Beitrag werden Konzepte vorgestellt, mit denen es möglich ist vollständige Lichtverteilungen mit einem DMD-Scheinwerfer zu erzeugen. Eine vielversprechende Idee ist der Einsatz einer stark verzeichnenden Projektionsoptik. Es werden verschiedene Konzepte zur Umsetzung dieser Idee vorgestellt und der Ansatz einer radial verzeichnenden Optik als Prototyp eines hochauflösenden Scheinwerfers realisiert. Der Nutzungsgrad steigt im betrachteten Fall um einem Faktor von 5.

Die Simulation des Systems zeigt, dass mit dem gewählten Ansatz vollständige Lichtverteilungen dargestellt werden können. Der Kontrast des Systems wird mittels Raytracing untersucht, indem an drei Positionen der Lichtverteilung Pixel ausgeschaltet werden. Dabei zeigt sich, dass das Abschalten von 16 nebeneinanderliegenden Pixeln zu einem Kontrastverhältnis von knapp 15:1 führt. Dieser relativ geringe Kontrast geht auf die leichte Unschärfe der stark verzeichnenden Optik sowie die chromatische Aberration zurück, welche im prototypischen Aufbau nicht kompensiert wird. Die Kontraste, die mit dem realen Systemaufbau erzeugt werden können liegen unterhalb dieser Werte, was auf Fertigungs- und Justagetoleranzen sowie Streulicht im System zurückzuführen ist. Deshalb ist es nicht möglich, mit dem aktuellen Aufbau beispielsweise eine ECE-konforme Abblendlichtverteilung zu erzeugen.

Der vorgestellte Prototyp eines hochauflösenden Scheinwerfers auf Basis der DMD-Technologie in Kombination mit der verzeichnenden Projektionsoptik erzeugt vollständig adaptive Lichtverteilungen und wird an einem Versuchsträger zur Validierung im Verkehrsraum genutzt. Untersuchungsgegenstand ist zurzeit die Informationsprojektion auf die Fahrbahnoberfläche, welche sich mit dem System deutlich sichtbar umsetzen lässt.

7. Literaturangaben

- [1] Kloppenburg, G.; Wolf, A.; Lachmayer, R.: High-resolution vehicle headlamps: technologies and scanning prototype. *Advanced Optical Technologies* 5(2) (2016) 147–155
- [2] Pfullmann, N.; Thiel, A.; Thamm, M.; Plöger, R.; Kloppenburg, G.; Wolf, A.; Lachmayer, R.: From mechanical ADB systems to high resolution headlamps – new opportunities of novel headlight systems. *Proc. Int. Symp. on Automotive Lighting 2017*, 357–365
- [3] Roth, R.; Wallaschek, J.; Kloppenburg, G.; Lachmayer, R.; Meyer, M.; Thomschke, S.: RGB-Laser Scanning Module for Onroad Projection. *Proc. Int. Symp. on Automotive Lighting 2015*, 385–394
- [4] Hesse, H.: BMBF-Project VOLIFA 2020 – High resolution light distribution by using a LCD. *Proc. Int. Symp. on Automotive Lighting 2015*, 495–502
- [5] Lee, T.; Park, G.: The Developement of the Automotive Headlamp using the DMD. *Proc. Int. Symp. on Automotive Lighting 2011*, 524–534
- [6] Grötsch, S.; Pfeuffer, A.; Liebetrau, T.; Oppermann, H.; Brink, M.; Fiederling, R.; Möllers, I.; Moisel, J.: Integrated High Resolution LED Light Source in an AFS/ADB Headlamp. *Proc. Int. Symp. on Automotive Lighting 2015*, 241–250
- [7] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. 06.2004
- [8] Jürgens, C.: Der kontrastadaptive Scheinwerfer, TEWISS – Technik und Wissen GmbH Verlag, Garbsen, 2015
- [9] ECE-Richtlinie 112: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen und/oder LED-Modulen ausgerüstet sind. 22.08.2014
- [10] Gut, C.: Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme., KIT Karlsruhe Diss. 2017
- [11] Günther, A.: Entwicklung eines aktiven Kraftfahrzeugscheinwerferkonzepts mit DMD-Array., TU Berlin Diss. 2010
- [12] Bhakta, V.; Ballard, B.: High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP technology. *Proc. Int. Symp. on Automotive Lighting 2015*, 483–494
- [13] Kauschke, R.: Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern., Universität Paderborn Diss. 2006
- [14] DE-P 102016103649A8
- [15] DE-P 102016001103A1
- [16] DE-P 102014013202B3
- [17] US-P 20170205040A1
- [18] DE-P 102014225246A1
- [19] DE-P 102010048659A1
- [20] US-P 20170192224A1
- [21] DE-P 102016103717A1

Digitalisierung des Lichts

Unterstützung des Fahrers in unfallträchtigen Situationen

Digital Light

Support of the driver in hazardous situations

Dr. rer. nat. **Carsten Wilks, Boris Kubitza**,
HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt

Abstract

The development of high resolution headlamps in the last 5 years made rapid progress [1] and first series systems are available on the market. Different lighting technologies have been developed [2][3][4] and one very interesting capability is the full flexible generation of light distribution. But on the other hand the open question comes up what are the “right” lighting functions. In this paper we present new lighting functionalities derived from a statistical analysis regarding the misconduct of all drivers.

1. Fehlverhalten der Autofahrer in Deutschland 2016

Im folgenden Diagramm ist eine statistische Analyse der Fehlverhalten von Autofahrern in Deutschland im Jahr 2016 dargestellt [5]. Das Fehlverhalten wird insgesamt in 14 Klassen eingeteilt, wobei die häufigsten Klassen bereits einen Anteil von 63% ausmachen. Diese sind:

- Vorfahrt und Vorrang (17%)
- Geschwindigkeit (12%)
- Abstand (16%) und
- Abbiegen, Wenden, Rückwärtsfahren, Ein- und Anfahren (18%).

In dem Diagramm wird nicht unterschieden zwischen Fehlverhalten bei Tageslicht und bei Nacht. Im Allgemeinen kann man aber sagen, dass die Situationen in der Nacht vom Fahrer schwieriger bewertet werden können als bei Tag. Daraus kann man schließen, dass auch ein wesentlicher Teil der Fehlverhalten in der Nacht stattfinden.

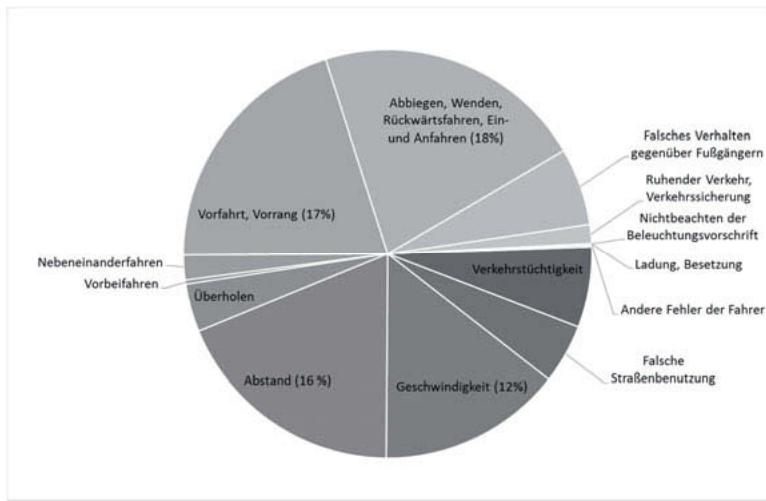


Diagramm 1: Statistische Analyse der Fehlverhalten von Autofahrern in Deutschland im Jahr 2016 [5]

In diesem Beitrag werden Ansätze vorgestellt, wie hochauflösende Scheinwerfersysteme den Fahrer in der Nacht unterstützen können. Die vorgeschlagenen Ansätze werden die Fehlverhalten nicht zu 100% verhindern können, sondern nur die Anzahl der Fehlverhalten reduzieren. Die Argumentation ist dieselbe, wie bei Autonomen Fahrzeugen. Auch bei diesen ist in der Zukunft mit Unfällen zu rechnen, jedoch wird die Anzahl der Unfälle reduziert. Was als Entwicklungsziel ausreichend ist. Die vorgeschlagenen Assistenz-Systeme unterstützen im Wesentlichen den Fahrer. Dies ist darin begründet, dass erste hochauflösende Scheinwerfersysteme aktuell in Serie sind und somit Anwendungen jetzt den Fahrer unterstützen können und nicht auf die Serieneinführung autonomer Fahrzeuge gewartet werden muss.

2. Hochauflösende Assistenzsysteme als Unterstützung in unfallträchtigen Situationen

Abgeleitet von den vier häufigsten Fehlverhalten der Fahrer ergeben sich die folgende Assistenzsysteme:

- Abstands-Assistent,
- Geschwindigkeits-Assistent,
- Vorfahrts-Assistent und
- Abbiege-Assistent.

Die vorgeschlagenen Assistenzsysteme verwenden alle die identische lichttechnische Vorgehensweise. Falls der Fahrer Unterstützung benötigt, werden in diesen Situationen Symbole vor das Fahrzeug projiziert. Die Vorfeldausleuchtung bleibt unverändert, die Symbole werden additiv auf die Vorfeldebeleuchtung addiert. Auf diese Weise kann der Fahrer die Symbole wahrnehmen ohne seinen Blick von der Straße zu nehmen, um ein Display im Fahrzeuginnenraum zu betrachten. Erste Untersuchungen zum optimalen Kontrast [6] und dem Ablenkpotential anderer Verkehrsteilnehmer sind durchgeführt [7]. Es ist natürlich auch möglich, diese Symbole über ein HeadUp-Display dem Fahrer zu präsentieren. In Situationen in denen der Fahrer die Lichtsymbole mit Objekten in der realen Welt vor dem Fahrzeug abgleicht, ist der Einsatz eines hochauflösenden Scheinwerfers jedoch vorteilhaft. Ein Vorteil besteht dann, wenn die Symbole nicht nur vom Fahrer wahrgenommen werden sollen, sondern auch von anderen Verkehrsteilnehmern. Ein weiterer Unterschied zum Kombiinstrument ist, dass der Fahrer den Blick ständig auf die Straße vor dem Fahrzeug richten kann. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten, so dass dem Fahrer nicht nur Informationen dargestellt werden können, sondern auch konkrete Vorschläge für eine Anpassung der Steuerungsaufgabe des Fahrers, z.B. Geschwindigkeitsreduktion vor einer Kurve. Dadurch ist der hochauflösende Scheinwerfer nicht nur ein weiteres Anzeigegerät im Fahrzeug.

2.1 Abstands-Assistent

Dem Fahrer wird durch ein Symbol der Mindestabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug angezeigt, wie z.B. im Bild 1 dargestellt.

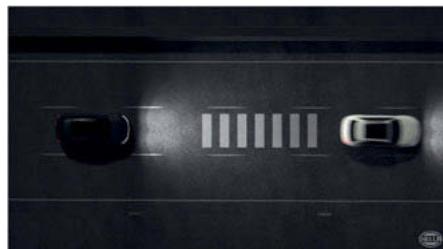


Bild 1: Durch Lichtsymbole wird dem Fahrer der Mindestabstand in der aktuellen Verkehrssituation angezeigt.

Wird der Mindestabstand nicht eingehalten, so schiebt der Fahrer das Lichtsymbol auf das vorausfahrende Fahrzeug. Dadurch kann der Fahrer die Abstandsaufgabe leicht wahrnehmen. Der Mindestabstand kann situationsabhängig berechnet werden. Ist die Haftung der Reifen, z.B. durch Nässe reduziert, kann der Mindestabstand vergrößert werden. Weiter kann auch

die Reaktionsgeschwindigkeit des Fahrers in die Berechnung des Mindestabstandes berücksichtigt werden. Eine Visualisierung des Mindestabstandes im Fahrzeug gibt es aktuell nicht. Durch diese Visualisierung wird das Bewusstsein beim Fahrer für einen sicheren Abstand zum Vorausfahrenden gestärkt werden.

2.2 Geschwindigkeits-Assistent

Beim Geschwindigkeits-Assistenten wird dem Fahrer durch das Lichtsymbol angezeigt, ob dieser eine angemessene sowie zulässige Geschwindigkeit in der aktuellen Fahrsituation hat oder zu schnell oder zu langsam fährt. Die angemessene Geschwindigkeit kann den vorausliegenden Streckenverlauf berücksichtigen. Wird der Fahrer z.B. eine enge Kurve in naher Zukunft durchfahren, kann die Geschwindigkeit schon vor der Kurve reduziert werden. Weiter können Informationen aus der Schlupfregelung berücksichtigt werden, wodurch die aktuelle Fahrbahnbeschaffenheit mitberücksichtigt werden kann. Der Geschwindigkeits-Assistent gibt dem Fahrer auch noch die Information, ob die gefahrene Fahrlinie angepasst werden sollte. Dies geschieht durch die Ausrichtung der Symbole auf der eigenen Spur. In den Bildern 2 und 3 sind beispielhafte Situationen dargestellt, Bild 2 zeigt eine Situation in der die Geschwindigkeit reduziert werden sollte und im Bild 3 kann die Geschwindigkeit erhöht werden.



Bild 2: Fahrer sollte die Geschwindigkeit
reduzieren



Bild 3: Fahrer kann die Geschwindigkeit
erhöhen

2.3 Vorfahrts-Assistent

Ein missachten der Vorfahrtsreglung ist ein häufiger Fehler in der Stadt. Auch in diesen Situationen kann ein hochauflösender Scheinwerfer durch die Projektion von Lichtsymbolen den Fahrer unterstützen. Bei der Vorfahrtreglung gibt es 2 Fälle: Vorfahrt gewähren und Vorfahrt haben. Bild 4 zeigt eine beispielhafte Implementierung. Es wird vom Fahrzeug eine horizontal verlaufende Linie an die Position projiziert, an der das Fahrzeug halten sollte. Nähert sich das

Fahrzeug dieser Position an, bleibt die horizontale Linie ortsfest. Im nächsten Bild ist die Situation dargestellt, dass das Fahrzeug Vorfahrt hat. Es wird eine vertikal verlaufende Linie projiziert, die die Halteposition des anderen Fahrzeugs darstellt. Ob und wie stark die Linien sichtbar sein sollen, d.h. wie stark der Gradient an den Rändern der Linien ist, hängt von der Applikation der Funktion ab. Vorstellbar wäre auch nur eine Aufhellung der Bereiche.



Bild 4: Fahrer muss Vorfahrt gewähren



Bild 5: Fahrer hat Vorfahrt

2.3 Abbiege-Assistent

Der Abbiege-Assistent unterstützt den Fahrer sowohl in komplexen Abbiege- und Spurwechselsituationen als auch bei der Spurführung.



Bild 6: Toter-Winkel Unterstützung



Bild 7: Hervorheben der zukünftigen Fahrspur

Im Bild 6 befindet sich ein Radfahrer im Toten-Winkel des Fahrzeugs. Ein Sensor erkennt den Radfahrer und der hochauflösende Scheinwerfer projiziert eine vertikal verlaufende Linie vor dem Fahrzeug, um dem Fahrer anzuzeigen, dass dieser keinen Spurwechsel machen sollte. Gerade im Stadtverkehr mit hohem Verkehrsaufkommen stellt dieser Ansatz eine gute Unterstützung da, weil der Fahrer den Blick immer nach vorne richten kann, um den Verkehr zu

beobachten. Auch Einfahrten, die der Fahrer nicht nehmen darf, z.B. Einbahnstraßen und Autobahnauffahrten, können so markiert werden. Das nächste Bild 7 zeigt eine Führung des Fahrers durch Licht. Hat der Fahrer sein Navigationsgerät programmiert, kennt das Fahrzeug die zukünftige Route und kann diese für den Fahrer hervorheben. Der Fahrer muss nur dem Licht folgen. Auch in Abbiegesituationen und im Kreisverkehr kann der Fahrer so geführt werden. Bei dieser Methode sieht der Fahrer in der Realität welchen Weg er nehmen soll und muss nicht Kommandos, z.B. 2te Ausfahrt, interpretieren. Auch andere Verkehrsteilnehmer können den zukünftigen Kurs des Fahrzeugs erkennen.

3. Unterstützung nur bei Dunkelheit

Die Lichtsymbole sind nur bei Dunkelheit vom Fahrer wahrzunehmen. Am Tag ist der erreichte Kontrast zu gering, so dass die Sichtbarkeit der Symbole für den Fahrer nicht gegeben ist. Häufig wird daher diskutiert, ob eine Unterstützung nur in der Nacht Sinn macht. In der Nacht unterscheidet sich die menschliche visuelle Wahrnehmung wesentlich zu der Tagwahrnehmung. Die Wahrnehmung von Farbe, Abständen und Geschwindigkeit ist unterschiedlich. Weiter ist die Anzahl der Situationen, in denen sich der Fahrer an helle und dunkle Situationswechsel adaptieren muss, wesentlich größer. Der optische Fluss unterscheidet sich auch wesentlich von der Tagsituation, weil nachts wesentlich weniger Reize vorhanden sind. Das bedeutet, dass der Fahrer nachts eine deutlich schlechtere Wahrnehmung hat und daher auch mehr Unterstützung benötigt. Aus unserer Sicht macht es daher Sinn, eine Unterstützung anzubieten, die nur nachts eingesetzt werden kann. Tagsüber ist die visuelle Wahrnehmung sehr gut.

4. Die Rolle autonomer Fahrzeuge

Die vorgeschlagenen Assistenzsysteme unterstützen im Wesentlichen den Fahrer. Eine interessante Frage ist es, ob auch autonom fahrende Fahrzeuge einen Vorteil von hochauflösten Scheinwerfern haben. Für autonom fahrende Fahrzeug bis zum Level 4 muss der Fahrer auch in der Lage sein, die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen. Tritt dieser Fall ein, wird sich das Fahrzeug in einer komplexen Situation befinden, weil sonst das autonome Fahrzeug durch die Situation gesteuert hätte. In dieser komplexen Situation macht es natürlich Sinn, dass der Fahrer weiterhin die Unterstützung durch Lichtsymbole bekommt. Betrachtet man nun den Level 5, so wird es keinen Fahrer mehr im Fahrzeug geben. Dann nehmen die Sensoren die Rolle des Fahrers ein, d.h. der hochauflöste Scheinwerfer kann die Sensoren unterstützen. Weiter kann das autonome Fahrzeug sein geplantes Vorhaben anderen Verkehrsteilnehmern mittels Lichtsymbolen mitteilen, z.B. an Fahrzeugführer und Fußgänger.

Dies ist aus unserer Sicht ein wichtiger Aspekt, um die Akzeptanz von autonomen Fahrzeugen zu erhöhen. Abschließend kann man sagen, dass der Einsatz von hochauflösenden Scheinwerfersystemen nicht beschränkt ist auf Nicht-Autonome-Fahrzeuge.

5. Konzeptvalidierung

Ein Versuchsträger als Plattform für hochauflösende Scheinwerferentwicklungen ist aufgebaut und voll funktionsfähig. Akzeptanz- und Nutzbarkeitsuntersuchungen sind in der Planung und werden in Kürze durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen ist die Unterstützung für den Fahrer nachzuweisen. Parallel laufen Untersuchung, die das Ablenkpotential anderer Verkehrsteilnehmer bewerten sollen. Interessante Aspekte sind u.a. wie intuitiv der Fahrer die Unterstützung empfindet, wie eindeutig die Deutung der Symbole ist und ob es Verwechslungen mit vorhanden Markierungen und Verkehrszeichen geben kann. Die Ergebnisse sind eine Basis für zukünftige Diskussion bezüglich der Zulassungsfähigkeit.

6. Zusammenfassung

In diesem Beitrag haben wir gezeigt, dass es Ansätze gibt, wie Lichtsymbole den Fahrer in Situationen unterstützen können, in den es häufig zu Fehlverhalten des Fahrers kommt. Durch den Einsatz von Lichtsymbolen kann das Fehlverhalten der Fahrer nicht zu 100% reduziert werden, sondern es kann nur die absolute Anzahl der Fehlverhalten reduziert werden. Erste System mit hochauflösenden Scheinwerfersystemen sind in Serie, so dass sich aktuell die Frage stellt, wie kann der Fahrer durch Lichtsymbole unterstützt werden, da autonome Fahrzeuge erst in den nächsten Jahren eingeführt werden. In nächsten Schritten muss die Akzeptanz, das Ablenkpotential, eine eindeutige Deutung von Symbolen und die Gefahr von Verwechslung mit existierenden Verkehrszeichen und Markierungen untersucht werden. Die Ergebnisse können die Basis für eine zukünftige Zulassung erweitern.

- [1] C. Gut, M. Fiege, B. Böke, Daimler AG, Germany: „DIGITAL LIGHT – Experiences with the development of high resolution headlights at Daimler“, ISAL 2017
- [2] Vikrant R. Bhakta, Ph.D., Brian Ballard, Texas Instruments Incorporated, Dallas, USA: “High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP® technology”, ISAL, 2015,
- [3] H. Hesse, Hella KGaA Hueck & Co., Germany: “BMBF-Project VOLIFA 2020 - High resolution light distribution by using a LCD”, ISAL, 2015
- [4] J. Tommer, T .Feil, D. Weissenberger, R. Fiederling, M. Rayer, OSRAM GmbH, Germany;“New Possibilities with µAFS modules - The Path to High-Resolution Full-Matrix Headlamps“, ISAL 2017
- [5] Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2016
- [6] P. Jahn, I. Cristea, C. Neumann, KIT – Light Technology Institute, Karlsruhe, Germany: “High-Resolution Light-Based Driver-Assistance – Optimal Contrast for Symbols”, ISAL 2017
- [7] Patric Jahn, KIT Karlsruhe: ”Ablenkpotenzial eines Baustellenlichtes auf andere Verkehrsteilnehmer“, Lux Junior 2017

Bewertungskriterien für die Zulassung lichtbasierter Fahrerassistenz

Evaluation criteria for the homologation of light-based driver-assistance

M.Sc. **Patric Jahn**, Prof. Dr. rer. nat. **Cornelius Neumann**, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI), Karlsruhe

Kurzfassung

Bereits heute werden zukünftige Lichtfunktionen wie Baustellenlicht, Fußgängerkommunikation oder optische Distanzwarnung beworben [1–3]. Doch bevor diese im Straßenverkehr zu sehen sind, müssen sie einige Zulassungskriterien erfüllen. Dabei muss gewährleistet sein, dass die Lichtfunktion einerseits einen Mehrwert mit sich bringt, andererseits aber auch den Fahrer oder andere Verkehrsteilnehmer nicht stört oder ablenkt. Hierzu sind beispielsweise Probandenstudien eines unabhängigen Instituts das Mittel der Wahl.

Eine Überprüfung jeder einzelnen Lichtfunktion auf die genannten Punkte ist aufwendig, zeitintensiv und teuer. Daher sollen nachfolgend Kriterien vorgestellt werden, anhand derer Lichtfunktionen schnell und effizient ohne Probandenstudien hinsichtlich ihrer Zulassung bewertet werden können. Diese können einerseits vom Hersteller selbst vor Antrag auf Zulassung, andererseits aber auch von Gremien herangezogen werden.

Abstract

Already today, future lighting functions like construction zone light, pedestrian communication or optical distance warning are being advertised [1–3]. But before they will be on the road in series, they must meet some eligibility criteria in order to get homologation. On the one hand, it must be guaranteed that the lighting function has a benefit for the driver but on the other hand, any disturbance or distraction for the driver or other traffic participants has to be avoided. To ensure this, subject studies done by an independent institute are a common method. But a validation of each individual lighting function with the method mentioned above is complicated, time-intense and expensive. Therefore criteria are presented in this paper which could allow a homologation for future lighting functions quickly and efficiently without any subject studies. These criteria can be used by the manufacturers to rate their ideas before prototyping as well as by the deciding committees.

1. Motivation

Neueste Scheinwerfertechnologien ermöglichen die Darstellung hochauflöster Symbole mit über einer Million Pixeln je Scheinwerfer [1], welche vor allem in der lichtbasierten Fahrerassistenz ihre Anwendung finden. Dabei sollen dem Fahrer Informationen direkt auf die Straße vor ihm projiziert werden, sodass dieser den Blick nicht vom Verkehrsgeschehen weg zum Kombiinstrument lenken muss. Informationen mit direktem Bezug zur Umwelt, wie beispielsweise die Darstellung der Fahrzeugbreite in engen Situationen wie Baustellen, sind problemlos möglich. Head-Up-Displays (HUD) könnten dies theoretisch auch mittels erweiterter Realität, jedoch verfügen diese derzeit noch nicht über die hierfür notwendige Autostereoskopie.

Ungeachtet der technischen Umsetzung stellt sich vor allem eine Frage: Welche dieser Funktionen ist sinnvoll, welche lenkt den Fahrer oder andere Verkehrsteilnehmer ab und letzten Endes: Welche Funktionen sollen zugelassen werden und welche nicht? Dies zu evaluieren bedarf zumeist einer aufwendigen und zeitintensiven Probandenstudie. Doch gerade bei hochauflösenden Scheinwerfern besteht die Möglichkeit, neue Lichtfunktionen mittels Software und somit sehr schnell zu erstellen oder zu verändern. Daher muss ein Konzept entwickelt werden, welches Lichtfunktionen schnell und analytisch bewertet.

2. Entwicklung einer Bewertungsfunktion

Ziel der Bewertung ist die Frage nach einer möglichen Zulassungsfähigkeit zu beantworten. Daher wird nur der Einfluss auf die Verkehrssicherheit in Hinblick auf Ablenkung untersucht, nicht aber ob die zu validierende Lichtfunktion den Fahrer assistieren kann.

Als Grundlage für das Bewertungskonzept soll ein gewichtetes arithmetisches Mittel dienen, welches allgemein durch Formel (1) ausgedrückt wird.

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \cdot K_i \quad (1)$$

Hierbei sei i das jeweilige Bewertungskriterium, K_i dessen Bewertung, c_i die zugehörige Gewichtung und n die Anzahl der herangezogenen Kriterien. Im Folgenden wird nun auf die jeweiligen Parameter eingegangen.

Bewertungskriterium i

Bewertungskriterien sind all jene Kriterien, von denen angenommen werden kann, dass sie einen Einfluss auf die Ablenkung des Fahrers oder anderer Verkehrsteilnehmer haben können. Im Allgemeinen kann man dann von Ablenkung sprechen, wenn der Fahrer sich nicht mehr vollständig auf die Fahraufgabe konzentrieren kann, also beispielsweise kognitiv, visu-

ell, auditiv oder haptisch zusätzlich beansprucht wird. Im Falle von Lichtfunktionen kann dies auf „kognitiv“ und vor allem „visuell“ eingeschränkt werden. Während die kognitive Ablenkung schwierig zu messen ist, kann die visuelle Ablenkung in der Praxis vergleichsweise einfach über Eye-Tracking ermittelt werden. Schaut der Fahrer zu lange, insbesondere zu lange am Stück, auf ein visuell attraktives Muster, welches sich nicht im sicherheitsrelevanten Bereich vor dem Fahrzeug befindet, so liegt ein Gefahrenpotenzial vor. Laut Trefflich liegt die kritische Blickabwendungszeit bei 1,5 Sekunden [4]. Analytisch lässt sich keine Blickabwendungszeit herleiten, jedoch lassen sich qualitative Aussagen treffen.

Hier sei zunächst die **Dynamik** genannt. Evolutionsbedingt reagiert der Mensch eher auf Bewegungen als auf starre Objekte, da von diesen immer eine erhöhte Gefahr ausgeht (wilde Tiere, fallende Gegenstände etc.). Daher ist die Wahrnehmungsgeschwindigkeit in der Peripherie auch höher als in der Fovea. Dynamische Lichtfunktionen ziehen somit unweigerlich den Blick auf sich.

Als zweiter Aspekt sei die Geometrie bzw. deren **Komplexität** genannt. Je komplexer ein dargestelltes Symbol ist, desto länger muss man hinschauen um alle Details zu erkennen und das Symbol vollständig zu verstehen. Ähnliches gilt für die **Homogenität**. Ist die Lichtfunktion bewusst sehr inhomogen ausgelegt, steigert das indirekt auch die Komplexität und somit die Blickzuwendung.

Die **Fahrgeschwindigkeit** wirkt sich zwar nicht unbedingt auf den Grad der Ablenkung aus, allerdings auf das Risiko durch die zurückgelegte Strecke innerhalb der Ablenkungsdauer. Daher wären Lichtfunktionen die in 30er-Zonen als unkritisch gelten auf der Autobahn eventuell undenkbar.

Als letztes sei noch der **Adressat** genannt. Richtet sich die Lichtfunktion nicht nur an den Fahrer sondern auch an andere, so führt dies zwangsläufig zu mehreren abgelenkten Fahrzeugführern, die sich auf relativ kleinem Raum bewegen.

Somit soll in diesem ersten Entwurf der Bewertungsfunktion mit $n = 5$ Kriterien gearbeitet werden, die als maßgeblich für die Einschätzung erachtet werden.

Bewertung K_i

Ziel der Bewertung ist es, so objektiv wie möglich zu bleiben. Eine subjektive Einschätzung würde nur zu einer hohen Streuung in der Gesamtbewertung führen und das Bewertungskonzept unbrauchbar machen. Daher wird für jedes Kriterium eine Unterteilung empfohlen, in die jede Lichtfunktion eindeutig oder maximal mit einer Abweichung von 1 eingeordnet werden kann.

Die Dynamik lässt sich sehr einfach einteilen: Ist keine Dynamik vorhanden, so ist die Lichtfunktion statisch. Durch Ein- und Ausschalten, also Blinken, kann man eine gewisse Dynamik erzeugen, beispielsweise um den Fahrer vor einer Gefahr zu warnen. Die letzte Stufe ist eine Dynamik wie sie bei wischenden Blinkern zu finden ist oder auch eine wellenartige Propagation der Lichtfunktion wie bei Krahnstöver [5].

Einfachste Geometrien stellen geometrische Grundformen wie Rechtecke, Dreiecke und Kreise dar. Kombiniert man diese (beispielsweise Rechteck und Dreieck zu Pfeil) erhöht sich die Komplexität etwas. Im Bereich der Kommunikation wären aber auch deutlich komplexere Geometrien vorstellbar. Als dritte Stufe sind Piktogramme anzusehen, die versuchen viel Information mit wenigen Details einfach darzustellen. Ab einer gewissen Auflösung der Scheinwerfer ist es ebenfalls möglich, komplexe Bilder oder Fotos darzustellen. Dies stellt die höchste Komplexität dar.

Ob eine Lichtfunktion homogen ist, ist eine binäre Entscheidung. Hier gibt es keine Zwischenstufen. Die einzige Entscheidung die hier noch getroffen werden muss und in der Fachwelt (insbesondere im Bereich der Messtechnik) diskutiert wird, ist die Definition von homogen. Hat beispielsweise ein dargestelltes Rechteck überall die gleiche Leuchtdichte, so ist es homogen. Projiziert der Scheinwerfer aber mit konstanter Lichtstärke, so fällt die Leuchtdichte mit dem Entfernungskoeffizient ab und man bekommt einen kontinuierlichen Gradienten. Ob dies dann als homogen betrachtet wird oder nicht, soll an dieser Stelle nicht entschieden werden. Hier wäre eine Wertung mit 1,5 durchaus legitim.

Die Fahrgeschwindigkeit könnte beispielsweise stufenlos oder äquidistant erfolgen. Dennoch wurde sich explizit dagegen entschieden und die Stufen an die Use Cases angepasst. Beispielsweise sind Lichtfunktionen, die via Projektion anzeigen, dass das Auto ausparkt, auf Autobahnen nicht sinnvoll. Daher wird vorgeschlagen, die Stufen „Stand“, 30er-Zone, innerorts (50 km/h) und außerorts (>50 km/h) zu definieren.

Als Adressaten kommen entweder nur der Fahrer, nur andere oder alle Verkehrsteilnehmer in Frage. Zweifelsohne ist die potenzielle Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmer IM Vergleich zum Fahrer allein als kritischer zu betrachten, da diese die Lichtfunktionen eventuell noch nicht kennen und je nach Szenario auch aus mehreren Fahrzeugen bestehen können.

Die Stufen der Bewertungskriterien sind nochmal in Tabelle 1 zusammengefasst:

Tabelle 1: Übersicht über die Bewertungskriterien

Stufe	1	2	3	4
Dynamik	statisch	blinkend	dynamisch	
Komplexität	Grundform	zusammengesetzte Grundform	Piktogramm	Bild/Foto
Homogenität	Homogen	Inhomogen		
Fahrgeschwindigkeit	0 km/h	≤ 30 km/h	≤ 50 km/h	> 50 km/h
Adressat	Fahrer	Andere	Alle	

Gewichtung c_i

Wie bereits bei der Aufzählung der Kriterien angedeutet wurde, hat nicht jedes dieser Kriterien einen äquivalenten Einfluss auf die Bewertung. Daher müssen die Kriterien gewichtet werden. Die qualitativen Gewichtungen werden in Tabelle 2 numerischen Gewichtungen zugeordnet.

Tabelle 2: Bedeutung der Gewichtungen

c_i	Entsprechung
1	klein
2	mittel
3	groß
4	sehr groß

Um die Größe des Einflusses der einzelnen Kriterien zu definieren, wird Literatur zur Wahrnehmungsphysiologie und –psychologie herangezogen.

Bei der Dynamik handelt es sich um einen evolutionsbedingten Einfluss, weshalb dieser nicht oder kaum durch Gewöhnungseffekte kompensiert wird. Weiterhin können Bewegungen im Gegensatz zu Farbe oder Details auf der gesamten Retina, insbesondere in der Peripherie, wahrgenommen werden [6]. Der Einfluss der Dynamik darf daher als sehr groß erachtet werden.

Einen großen Einfluss hat auch die Komplexität, also der Detailgrad einer Lichtfunktion. Komplexere Geometrien stellen visuell attraktivere Muster dar, die folglich zu einer längeren Fixationsdauer der Verkehrsteilnehmer führen.

Im Gegensatz dazu steht die Homogenität. Hier finden sich kaum Hinweise auf einen Einfluss auf die Blickzuwendung, weshalb deren Gewichtung als klein angenommen werden kann.

Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit ist insbesondere aufgrund der Folgen einer Ablenkung als hoch einzuschätzen. Physikalisch bedingt geht die Anfangsgeschwindigkeit quadratisch in den Bremsweg mit ein. Somit können auch vermeintlich kurze Ablenkungen zu einem deutlich erhöhten Unfallrisiko führen.

Zwar können die Lichtfunktionen immer von allen Verkehrsteilnehmern gesehen werden, dennoch ist eine Lichtfunktion, die gezielt andere Verkehrsteilnehmer anspricht (beispielsweise die von Krahnstöver vorgestellten Gräten zur Spurwechselabsicht [5]), kritischer zu betrachten, da ihr Ziel explizit die Aufmerksamkeitslenkung ist. Wägt man dies gegeneinander ab, so kann der Einfluss als mittel betrachtet werden.

Kriterienanzahl n

Indem die Summe durch die Anzahl der verwendeten Kriterien geteilt wird, ist die Formel auch künftig erweiterbar auf eine beliebige Anzahl an Kriterien, ohne dass der als akzeptabel anzusehende Bereich sich verändert.

Modifikation

Formel (1) ist in dieser Form noch zu empfindlich gegenüber der Anzahl an Bewertungsstufen. So würden zwei Kriterien gleicher Gewichtung bei unterschiedlicher Anzahl an Bewertungsstufen auch unterschiedlich stark in die Gesamtbewertung eingehen, d.h. eine Bewertung eines Kriteriums mit „2“ würde die Gesamtbewertung gleichermaßen beeinflussen, egal ob das Kriterium 2 Stufen (hier wäre es die schlechteste Bewertung) oder 8 Stufen (hier wäre es ziemlich gut) hat.

Daher muss Formel (1) noch angepasst und ein Divisor m_i eingefügt werden, der die Einzelkriterien gemäß ihrer Anzahl an Stufen gewichtet. Damit ergibt sich die modifizierte Formel (2):

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \cdot K_i \cdot \frac{1}{m_i} \quad (2)$$

Mit den in Tabelle 3 zusammengefassten Kriterien, deren Einflussgrößen und Anzahl an Stufen gemäß Tabelle 1 ergeben sich für W Werte zwischen 0,8 (best case) und 2,6 (worst case).

Tabelle 3: Übersicht über die Kriterien

Kriterium	Gewichtung c_i	Anzahl der Stufen m_i
Dynamik	4	3
Geometriekomplexität	3	4
Homogenität	1	2
Fahrgeschwindigkeit	3	4
Adressat	2	3

3. Evaluation und Ausblick

Nachdem die Bewertungsfunktion grundlegend aufgestellt wurde muss nun ein Wertebereich definiert werden, innerhalb dessen eine Lichtfunktion als zulassungsfähig gilt. Hier ist es unvermeidlich, die Ergebnisse diverser Probandenstudien heranzuziehen, die positiv wie auch negativ ausfielen. Insbesondere negativ ausgefallene Tests werden aber häufig nicht veröffentlicht, weshalb sich der Bereich zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht genau definieren lässt. Erste Anhaltspunkte konnten aus der Dissertation von Krahnstöver [5] sowie aus eigenen Untersuchungen [7] gewonnen werden. Krahnstöver untersuchte eine Lichtfunktion, die anderen Verkehrsteilnehmern angezeigt, dass sie gleich überholt werden. Diese Lichtfunktion wurde in einer statischen Variante und einer dynamischen Variante, genauer gesagt mit einer Frequenz von 3 Hz blinkend, untersucht. Auch wenn die Effekte hinsichtlich der Wirksamkeit eher gering waren, so konnte vor allem festgestellt werden, dass die dynamische Variante die Probanden „nervt, stört“ und sie von der Fahraufgabe ablenkt. Die Bewertung der beiden Funktionen gemäß Formel (2) ergibt sich somit folgendermaßen:

- Dynamik: statisch bzw. blinkend → 1 bzw. 2
- Geometrie: Rechtecke, also Grundformen → 1
- Homogenität: Mehrere Rechtecke, als abwechselnd hell und dunkel → 2
- Fahrgeschwindigkeit: Mehrspurige Straße außerorts (BAB o.ä.) → 4
- Adressat: Der überholte Verkehrsteilnehmer → 2

$$W_{\text{statisch}} = \frac{1}{5} \left(\frac{4 \cdot 1}{3} + \frac{3 \cdot 1}{4} + \frac{1 \cdot 2}{2} + \frac{3 \cdot 4}{4} + \frac{2 \cdot 2}{3} \right) = 1,483$$

$$W_{\text{dynamisch}} = \frac{1}{5} \left(\frac{4 \cdot 2}{3} + \frac{3 \cdot 1}{4} + \frac{1 \cdot 2}{2} + \frac{3 \cdot 4}{4} + \frac{2 \cdot 2}{3} \right) = 1,750$$

Somit liegt der zu erwartende Korridor vorläufig zwischen $W = 1,48$ und $W = 1,75$. In eigenen Arbeiten wurde ein statisches Baustellenlicht, dargestellt über einen homogenen „Lichtteppich“, also ein Rechteck in Fahrzeugsbreite hinsichtlich der Ablenkung auf andere Ver-

kehrsteilnehmer untersucht. Dieses wurde als unkritisch bewertet [7], schränkt den Bereich mit einer Wertung von $W = 1,317$ nach Formel (2) aber auch nicht weiter ein. Ebenfalls untersucht wurde es in einer dynamischen Variante in der es mitlenkt und somit die Trajektorie des Fahrzeugs anzeigt. Die Darstellung erfolgte allerdings mit 2 Linien, Untersuchungsgegenstand war hier die Wirksamkeit für den Fahrer ohne Beteiligung anderer Verkehrsteilnehmer. Die abschließende Datenauswertung ist noch nicht abgeschlossen, die Sichtung der Daten spricht aber eher gegen einen positiven Effekt. Mit einer Wertung von $W = 1,95$ entspricht dies der Erwartung.

Ebenfalls läuft momentan noch eine Untersuchung zur Darstellung von Pfeilen als Variante eines Navigationssystems. Die Ergebnisse sind insofern besonders interessant, da sie mit einer Wertung von $W = 1,54$ zwischen dem momentanen Wertebereich liegen.

Weiterhin ist es notwendig, die Gewichtungsfaktoren weiter zu präzisieren. Insbesondere sind hier Vergleichsstudien notwendig, die zwei Lichtfunktionen untersuchen, die sich nur in einem Bewertungskriterium unterscheiden. So konnte in dem bereits erwähnten Spurwechselscenario von Krahnstöver die Vermutung des sehr großen Einflusses einer Dynamik bestätigt werden.

Abschließend möchten sich die Autoren noch beim BMBF bedanken, das durch seine Förderung des Verbundvorhabens iLaS (FKZ 13N13089) maßgeblich an den durchgeföhrten Untersuchungen beteiligt war.

Literatur

- [1] Mercedes-Benz, „*DIGITAL LIGHT*“: Zukünftige Schweinwerfertechnologie in HD-Qualität, <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/innovation/digital-light-scheinwerfer-in-hd-qualitaet/> 2016.
- [2] Hella KG Hueck & Co., *Hella Liquid Crystal HD: The Art of Light*, <http://www.hella.com/hella-com/de/Technik-Produkte-27-06-2017-13629.html> 2017.
- [3] AUDI AG, *Lichtsysteme der Zukunft*, http://www.audi.de/content/dam/vorsprung_durch_technik/Video/2015/03/Audi%20lighting%20technology/W2015052_Matrix_Laser_Animation_de_prev.mp4 2015.
- [4] B. Trefflich, *Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen*, 1st ed., Audi Dissertationsreihe, Bd. 26, Cuvillier, Göttingen 2010.
- [5] A. Z. Krahnstöver, M. Vollrath, J. F. Krems, *Licht führt!?: Konzeption und Evaluation von Fahrmanöverunterstützung durch lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme*, AutoUni-Schriftenreihe, Band 98, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden 2017.
- [6] *Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs*, 9th ed., Lehrbuch, Springer, Berlin 2015.
- [7] P. Jahn, C. Neumann, in *Tagungsband Lux Junior 2017* (Eds: Technische Universität Ilmenau) 2017.

Symbolische Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion

J. Reschke,

P. Rabenau,

Dr.-Ing. M. Hamm, AUDI AG, Ingolstadt;

Prof. Dr. rer. nat. C. Neumann, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Kurzfassung

Durch die fortschreitende Automatisierung von Fahrzeugen stehen selbstfahrende Fahrzeuge vor ihrer Einführung und werden schon bald im Straßenverkehr verbreitet sein. Die entfallende Interaktion durch den Fahrer verunsichert vor allem Fußgänger beim Überqueren einer Straße, weshalb eine natürliche Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion unabdingbar wird. Dafür wurde eine Probandenstudie zur symbolischen Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion durchgeführt, wobei zwei am Fahrzeug befestigte Bildschirme mit einer Größe von ca. 300 x 230 mm verwendet wurden. Mit Hilfe dieser wurden den Probanden 30 weiße Symbole dargeboten, um die deren Intuitivität und Korrelation zu Situationen abzuprüfen, wobei sich Gruppen verständlicher und missverständlicher Zeichen bilden lassen. Bei intuitiver Abfrage zeigen die Reaktionszeiten (min. 2,72 s) und Zuordnungen (max. 74 %) der Symbole nur eine geringe Intuitivität. Außerdem werden dynamische Symbole besonders für dynamische Situationen bevorzugt.

Abstract

Due to ongoing advances in automated vehicles, self-driving cars will soon participate on everyday traffic. Missing driver-pedestrian interaction subducts pedestrian's safe and calm feeling especially when crossing a street, which is why a natural vehicle-pedestrian-interaction gains importance. Therefore, a study for symbolic communication is conducted, where two displays with a size of 300 x 230 mm are mounted on a vehicle's front. 35 test persons where asked to evaluate intuitiveness of 30 symbols and correlate them to given situations. Thereby, groups of understandable and incomprehensible signs can be formed. On basis of reaction times (min. 2.72 s) and given answers (max. 74 % correctly answered) it can be shown, that the used symbols show little intuitiveness. Therefor, an open-answer test design was used. For dynamic situations, dynamic icons are preferred.

1. Einführung

Im heutigen Straßenverkehr ist die Kommunikation zwischen motorisierten und nicht motorisierten Verkehrsteilnehmern eine unverzichtbare Hilfe für die Strukturierung des Verkehrsflusses [20]. Der Straßenverkehr ist ein selbstorganisierendes System, das prinzipiell durch

offizielle Regeln geordnet ist [5]. Allerdings können diese Regeln nicht alle Situationen eindeutig abbilden [5, 20]. Zur Klärung werden in diesen Situationen informelle Zeichen zur Kommunikation zwischen den Beteiligten eingesetzt [5, 25]. Zu diesen Zeichen zählen Änderungen der Fahrzeugdynamik und vorgeschrriebene Anzeigen, wie Fahrtrichtungsanzeiger oder Lichthupe [5, 15, 25, 26], ebenso wie Augenkontakt, Gesichtsausdruck oder Gesten [5, 15, 25, 26, 29]. Obwohl diese Zeichen nicht eindeutig interpretiert werden können [5, 20, 25], kann durch Verwenden informeller Zeichen der Verkehrsfluss verbessert [20], unklare Situationen aufgelöst und ein Gewähren der Vorfahrt angezeigt werden [25].

Vor allem Fußgänger, die eine Straße überqueren, sind auf die Interaktion mit Fahrern angewiesen und versuchen durch Blick zum Fahrer dessen Intention zu bestimmen [16, 18, 29]. Durch eine Kommunikation mit dem Fahrer fühlen sich Fußgänger sicherer beim Überqueren einer Straße. Im Gegensatz dazu verringert sich die Bereitschaft von Fußgängern die Straße zu überqueren, wenn Fahrer unaufmerksam sind und keinen Blickkontakt herstellen [9].

Die Fahrzeugentwicklung schreitet kontinuierlich voran und so sind heute automatisierte Fahrfunktionen wie Abstandsregelautomaten, Notbrems- oder Spurhalteassistenten weit verbreitet [1, 15]. Die nächste Stufe der Entwicklung bilden automatisierte Fahrzeuge, die bereits in verschiedenen Ländern erprobt werden [9, 17]. Trotz laufender Fortschritte beim automatisierten Fahren [15] zeigt das Bewältigen des städtischen Verkehrs, vor allem wegen der großen Anzahl von Verkehrsteilnehmern und der Notwendigkeit der Kommunikation, noch große Schwierigkeiten [29]. Automatisierte Fahrzeuge stehen wahrscheinlich noch Jahrzehnte vor der Problematik des Mischverkehrs mit nichtautomatisierten Fahrzeugen, wobei auch Fußgänger stets eine wichtige Rolle einnehmen werden [12]. Bei automatisierten Fahrzeugen ist eine klassische Kommunikation zwischen Fahrern und anderen Verkehrsteilnehmern nicht mehr möglich [3, 10]. Um trotzdem das Vertrauen zwischen Verkehrsteilnehmern und automatisierten Fahrzeugen beizubehalten, ist eine Kommunikation zwischen diesen weiterhin entscheidend [3, 10, 12, 29]. Dafür ist bspw. das Anzeigen bzw. Kommunizieren von Fahrzeugzustand und -intention sowie die Erkennung von Fußgängern sinnvoll, um eine Vertrauensbasis herzustellen [15, 18, 29]. Die Notwendigkeit der Fahrzeug-Fußgänger-Kommunikation belegen auch zahlreiche Studien [8, 9, 25, 29, 32].

Deshalb wird mit dieser Arbeit eine Probandenstudie zur Interaktion und Symbolik mit anderen Verkehrsteilnehmern beschrieben. So wurde untersucht, wie eine zukünftige Fahrzeug-Fußgänger-Kommunikation durch geeignete Symboliken aussehen kann und wie intuitiv die Zeichen zu verstehen sind. Anders als in [6, 15, 18, 23] beschrieben, wurde hierfür kein eindimensionaler bzw. flacher LED-Streifen, sondern ein Display verwendet (vgl. auch [7]). Damit können sowohl einfache/rechteckige als auch komplexe Symbole dargestellt werden. Auf eine

Darstellung von Text zur Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern, wie in [19, 21] vorgestellt, wurde in dieser Arbeit verzichtet. Wie in [3] beschrieben eignen sich nur sehr ikonische Wörter zur schnellen Interaktion, wie z.B. STOP, textuelle Anweisungen werden nur langsam verstanden. Außerdem ist eine Voraussetzung für das Verstehen der Textbotschaft, dass der betroffene Verkehrsteilnehmer die verwendete Sprache spricht.

2. Probandenstudie

Um zu untersuchen, wie eine zukünftige Fahrzeug-Fußgänger-Kommunikation durch geeignete Symboliken aussehen kann, welche Zeichen schnell Situationen zuzuordnen sind und wie intuitiv diese sind, wurde eine Probandenstudie durchgeführt.

Wie in [10, 20, 24] beschrieben, ist es naheliegend, dass dynamische Symbole besser wahrgenommen werden als statische und auch in [6, 15, 18] wird ein dynamischer LED-Streifen zur Kommunikation eingesetzt. Im Gegensatz dazu werden in [3, 19, 30] statische Signale zur Interaktion mit Fußgängern verwendet. Deshalb wurden im Vorfeld der Studie sowohl statische als auch dynamische Symbole ausgewählt und in einer Expertenrunde evaluiert. Daraus wurden die Symbole aus Abbildung 1 für die Probandenstudie festgelegt. Die zusammengestellte Auswahl stellt keine repräsentative Sammlung dar, doch werden alle Grundtypen (Balkendarstellungen, Piktogramme, allgemein bekannte Symbole) berücksichtigt und mit einer Clusteranalyse (siehe Abschnitt 3.1) beurteilt.

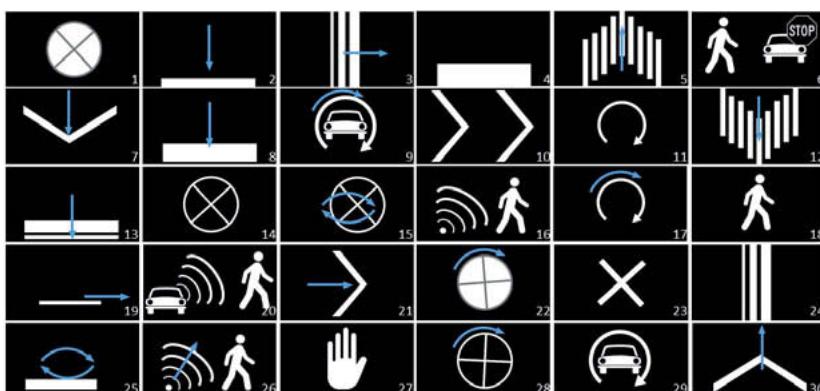


Abbildung 1: In Probandenstudie dargebotene Symbole mit Animationen (blau)

Für die zu untersuchenden Zeichen der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion wurden bekannte Symbole aus dem Straßenverkehr, z.B. Ampelmännchen, Kurvenleittafeln, Halteverbot oder Fahrtrichtung, vertraute Icons aus dem Fahrzeuginnenbereich, z.B. Icons des ACC und Ultraschallsensoren oder Start-Stop-Automatik, und Symbole, die mit LED-Streifen darstellbar sind,

als Vorlage verwendet. Zusätzlich wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Aus diesen wurden verschiedene Zeichen abgeleitet und Symbole kombiniert.

2.1. Aufbau

Für die Studiendurchführung (siehe 2.3) wurde ein Fahrzeug in einem befahrbaren Lichtkanal platziert, um Kommunikationsmöglichkeiten mit anderen Verkehrsteilnehmern zu untersuchen. Weil eine Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion untersucht werden sollte, wurde ein relativ kurzer Abstand von ungefähr 10 m zwischen Fahrzeug und Proband gewählt. Dies entspricht in etwa der Entfernung, in der Autofahrer vor einem Zebrastreifen in einer 30 km/h Zone beginnen zu verzögern [23, 29] bzw. der maximalen Entfernung bei welcher ein Blickkontakt erkannt werden kann [28]. Die exakte Entfernung zum Fahrzeug wurde durch einen Pfosten markiert.



Abbildung 2: Setup der Probandenstudie

Die ausgewählten Symbole wurden für die ersten beiden Teile der Studie auf zwei Displays mit einer Größe von ungefähr 300 x 230 mm und einer Leuchtdichte von 315 cd/m² angezeigt. Für den gesamten Test wurden die Symbole achromatisch, d.h. weiß auf schwarzen Hintergrund, dargestellt. Die beiden identischen Monitore waren symmetrisch am Fahrzeug, knapp unter den Scheinwerfern angebracht. Die Symbole wurden durch Betätigung einer Fernbedienung umgeschaltet.

2.2. Probanden

An der Durchführung der Studie nahmen insgesamt 35 Probanden mit einem durchschnittlichen Alter von 28,2 Jahre (Median = 26 Jahre) in einem Altersbereich zwischen 21 und 55 Jahren teil. Dabei waren 31 der Probanden männlich und vier weiblich. Zwei der Studienteilnehmer wiesen geringe Weitsichtigkeiten (-0,25 dpt und -0,50 dpt) auf, alle weiteren Probanden hatten eine Normalsichtigkeit oder korrigierte Sehschwächen. Zwei der männlichen

Teilnehmer hatten eine Farbfehlsichtigkeit (Deutanopie bzw. Pratonapie). 80 % der Probanden gaben an häufig (mehr als viermal pro Woche) ein Kraftfahrzeug zu führen und 94 % fahren mindestens einmal pro Woche selbst ein Kraftfahrzeug.

2.3. Ablauf

Die Durchführung der Studie gliederte sich in vier Abschnitte, wobei in den ersten beiden die Symbole am Fahrzeug ca. 10 m und in den anderen beiden Teilen am Notebook ca. 0,75 m entfernt angezeigt wurden. Für den gesamten Ablauf waren maximal 45 Minuten vorgesehen. Alle Antworten, Anmerkungen und Informationen wurden vom Versuchsleiter im Fragebogen notiert. Vor dem Durchführen der Studie wurde den Probanden der Ablauf anhand schriftlicher Hinweise erläutert und die demographischen Daten aufgenommen. Die Testpersonen waren dazu aufgefordert, sich vorzustellen, am Straßenverkehr teilzunehmen, ohne dass eine bestimmte Situation vorgegeben wurde. Der Ablauf und die Durchführung der Probandenstudie sind an das von Lagström/Lundgren [15] und Merten [20] vorgeschlagene Studiendesign angelehnt. Die Testpersonen wurden außerdem darauf hingewiesen, dass die Teilnahme an der Studie freiwillig erfolgt und jederzeit abgebrochen werden kann, nach [15].

In der ersten Sektion wurde den Probanden jeweils ein Symbol auf beiden am Fahrzeug montierten Bildschirmen gezeigt. Mit Hilfe der Fernbedienung konnte der Proband selbst auf das nächste Zeichen umschalten. Die Aufgabe bestand darin, dass der Proband versucht, dem Symbol einen belieben Fahrzeugzustand, eine Intention oder Kommunikation zuzuordnen. Das freie Antwortformat wurde nach Jonkisz et al. [11] gewählt. Sobald der Proband sicher war, die Situation benennen zu können, schaltete er selbstständig weiter, um anschließend eine Aussage zu treffen. Konnte der Proband die Situation nicht eindeutig benennen, wurde er nach zehn Sekunden aufgefordert, ohne Antwort fortzufahren. So wurde eine Zeit (0 - 10 Sekunden) gemessen, in welcher der Proband ein Zeichen intuitiv deuten konnte, die freie Antwort zum gezeigten Zeichen wurde notiert.

Für den nächsten Abschnitt wurde den Probanden eine Auswahl an Situationen vorgegeben. Mit Hilfe des Handzettels sollten sich die Testpersonen mit den Auswahlmöglichkeiten vertraut machen, um anschließend einen ähnlich Ablauf wie im ersten Test zu durchlaufen. Zur Auswahl standen: „Fahrzeug steht“, „Fahrzeug beschleunigt“, „Fahrzeug verzögert“, „Fahrzeug biegt ab“, nach [2, 9, 15], und „Fußgänger (ich) wurde erkannt“, „Fußgänger (ich) darf gehen“, „Fußgänger (ich) sollte/muss stehen bleiben“, nach [2, 3, 9, 15]. Konnten die Probanden dem Zeichen innerhalb von fünf Sekunden keine der vorgestellten Situationen zuordnen, wurde wie in Test 1 ohne Antwort fortgefahrene. Alle Symbole wurden dreimal dargestellt.

Im dritten Teil wurden den Probanden, ohne zeitliche Einschränkung, alle Symbole nacheinander am Computerbildschirm dargeboten und die drei folgenden Aussagen sollten bewertet werden: „Das gezeigte Symbol empfinde ich als aussagekräftig oder intuitiv“, „Das gezeigte Symbol ist gut zu erkennen“, „Ich verstehe, dass das Fahrzeug mit mir kommuniziert“. Für die Beurteilung wurde eine verbale Ratingskala nach [11] mit sechs Stufen („trifft voll und ganz zu“ bzw. 1 bis „trifft überhaupt nicht zu“ bzw. 6) gewählt, um die Tendenz zur Mitte zu vermeiden. Nach [11] lässt sich mit mehr Skalenstufen kein zusätzlicher Informationsgewinn finden.

Im letzten Testabschnitt wurden dichotome Aufgaben (Ja/Nein-Fragen) mit einer „Ich weiß nicht“ Antwortmöglichkeit gestellt [11]. Als erstes wurde für jede der in Test 2 vorgestellten Situationen abgefragt, ob die Probanden dynamische vor statischen Symbolen bevorzugen. Abschließend wurden alle Symbole dargeboten und die Testpersonen sollten beantworten, ob das gezeigt Symbol die Situation „Fahrzeug steht“ darstellen soll. Nachdem alle Zeichen bewertet wurden, wurden alle weiteren, in Test 2 vorgeschlagenen Situationen auf die gleiche Weise abgetestet. Damit kann überprüft werden, ob die Zuordnung der Symbole für die Darstellung am Fahrzeug und ohne Fahrzeug gleichermaßen erfolgt.

3. Ergebnisse

Die in der Probandenstudie aufgenommenen Parameter werden mit Hilfe einer Clusteranalyse und einer Rangliste qualitativ und quantitativ ausgewertet, um Gruppen innerhalb der 30 Symbole zu finden. Außerdem wird die Intuitivität der Symbole untersucht.

3.1. Clusteranalyse

Mit Hilfe einer Clusteranalyse können einzelne Beobachtungen eines vorliegenden Datensatzes so in Gruppen eingesortiert werden, dass sich gruppeninterne Ähnlichkeiten maximieren und gleichzeitig Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Clustern minimieren [4]. Die Clusteranalyse eignet sich besonders gut für explorative Zwecke und ist gerade zu Beginn einer Analyse hilfreich, um Typen oder Gruppenstrukturen zu finden, die sich durch spezifische Merkmalskombination charakterisieren lassen [13]. Die Clusteranalyse ist ein strukturidentifizierendes Verfahren [13]. Um solche Gruppenstrukturen und damit eine Einteilung geeigneter und ungeeigneter Symbole für eine Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion zu finden, wird eine Clusteranalyse eingesetzt.

Für die Einteilung der Symbole in Cluster werden folgende Merkmale bzw. Messdaten der Probandenstudie verwendet: gemessene Zeiten für Deutung der Symbole in Test 1 und Test 2 sowie die Deutung aus Test 2 und die Beurteilung der drei Aussagen aus Test 3. Weil keine Mittelwertbildung oder Zusammenfassung dieser Merkmale erfolgt, ergibt sich für jedes

Symbol ein Merkmalsvektor der Dimension 350. Die Antworten aus Test 4 werden nicht explizit berücksichtigt, weil sie, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, nahezu identisch mit den Zuordnungen aus Test 2 sind. Eine Information über die Geometrie, das Aussehen oder einer möglichen Dynamik der Symbole geht nicht in die Clusteranalyse mit ein.

Als Clustering-Algorithmus wird eine dichtebasierende Methode (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN) eingesetzt [13, 27], wobei mit einem K-Means Algorithmus [13] vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können. Wie in Abbildung 3 gezeigt, kann mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse [22] der 350-dimensionale Merkmalraum mit Zuordnung der Cluster zweidimensional dargestellt werden.

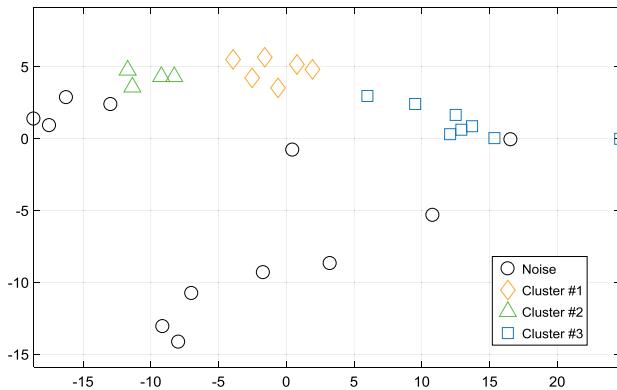


Abbildung 3: DBSCAN ($\epsilon=33$, MinPts=4) – Clustering der dargebotenen Symbole

Durch Anwenden des DBSCAN Algorithmus ergibt sich die Zuordnung von Symbol 2, 4, 5, 7, 12 und 30 zum Cluster 1, im Cluster 2 sind die Zeichen 9, 11, 17 und 29 enthalten und 3, 10, 16, 18, 20, 21, 26 und 27 bilden Cluster 3. Obwohl in die Gruppierung keine Information zur Form oder Dynamik der Zeichen eingegangen ist, zeigt sich, dass die Gruppe 2 alle runden Pfeile und Gruppe 3 alle vertikal bewegten Symbole enthält. Durch diese Symbolzuordnung lässt sich erwarten, dass weitere, weniger offensichtliche Informationen in den Clustern enthalten sind.

3.2. Rangliste mit Regressionsanalyse

Durch Ordnen von statistischen Beobachtungen nach ihrer Größe ergibt sich mit einem Nummerieren dieser Reihe eine Rangliste, welche einzelne Elemente direkt vergleichbar macht. Es handelt sich dabei um einen nichtparametrischen Test [14]. Durch Aufstellen eines Rankings sollen in diesem Abschnitt geeignete und ungeeignete Symbole für die Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion gefunden werden, die in der gesamten Studie am besten abgeschnitten

haben. Dafür wird eine Rangliste für die zur Clusteranalyse verwendeten Variablen gebildet, wobei auf die Zuordnung der Situationen (Test 2) verzichtet wird und an Stelle dessen die berechneten Erkennungsraten betrachtet werden. Durch Normieren der Variablen und anschließender Mittelung wird eine zusätzliche Variable generiert. Dieser Kombinationswert kann in einer Rangliste der Höhe nach sortiert werden (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Ranglisten zum generierten Kombinationswert und den mittleren Zeiten aus Test 1

Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Zeiten Test 1	27	23	6	21	18	3	20	30	10	14	29	7	26	11	1
Kombinationswert	27	21	18	20	26	6	23	16	30	10	3	5	7	12	4
Rang	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Zeiten Test 1	12	4	16	5	2	17	9	8	19	28	13	24	15	22	25
Kombinationswert	14	2	1	19	11	29	8	15	17	9	28	22	25	24	13

Die Symbole 27, 21, 18, 20 und 26 bilden dabei die fünf besten Symbole aus der durchgeföhrten Probandenstudie, wobei 28, 22, 25, 24, 13 die am schlechtesten gelisteten Symbole darstellen. Die Symbole 6, 23, 16, 30 und 10 sind noch im besten Drittel angesiedelt, wobei die Erkennungsrate der Symbole 6, 23 und 10 unter 80 % liegt. Deshalb sollen ab hier nur die Zeichen 16 und 30 als noch gute Symbole gewertet werden. Die Symbole 29, 8, 15, 17 und 9 zählen noch zum schlechtesten Drittel des Ranking.

Mit dieser Einteilung und der vorher erstellten Clusteranalyse wird schnell klar, dass sich alle der besten und eines der guten Symbole in Cluster 3 befinden und dass sieben Zeichen des am schlechtesten gerankten Drittels, darunter alle der schlechtesten, im Cluster Noise zu finden sind. Deshalb wird davon ausgegangen, dass das Cluster Noise schlechte Symbole zusammenfasst und Cluster 3 gute Symbole. In Cluster 2 sind ebenfalls noch drei schlecht gelistete Symbole zu finden. In der verbleibenden Gruppe 1 sind weder besonders gute noch besonders schlechte Symbole zu finden.

Durch diskrete Zuordnung der Klassen 1 bis 4 für schlechte bis gute Symbole und Verwenden der Variablen für den Kombinationswert, kann eine Regressionsanalyse durchgeführt werden. Damit lassen sich die wichtigsten Variablen für das Clustering finden [29]. Es ergibt sich folgender Zusammenhang für die Symbolbewertung B :

$$B = 1,04 - 0,02 \cdot t_{Test\ 1} - 0,02 \cdot t_{Test\ 2} + 0,04 \cdot RR_{Test\ 2} + [1,12; -0,70; -1,13] \\ \cdot \text{Bewertung}_{Test3}$$

Das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,71$ gibt an, dass rund 71 % der beobachteten Varianz mit dem Modell der linearen Regression beschrieben werden können. Das Modell stimmt demnach gut mit den Beobachtungen überein [29]. Auch die quadratische Effektstärke $f^2 = 2,39$ weist auf einen starken Effekt des Regressionsmodells hin [31].

3.3. Vergleich der Erkennungsraten

Aus den Zuordnungen der Situationen in Test 2 können für jedes Symbol die Situationen bestimmt werden, welche in den drei Abfragen am häufigsten von den Probanden gewählt wurden. Für ein Symbol i soll die Anzahl dieser Situationen die Summe der korrekten Antworten n_k sein, wobei die Zahl aller Antworten durch N_g beschrieben wird. Damit lässt sich für Test 2 eine Erkennungsrate (Recognition Rate) $RR_{Test\ 2,i} = \frac{n_k}{N_g}$ bestimmen. Nach ähnlichem Prinzip kann eine Erkennungsrate $RR_{Test\ 4,i}$ für Test 4 bestimmt werden. Durch die Berechnung eines Korrelationskoeffizienten $KOR(RR_{Test2,i}, RR_{Test4,i})$ kann ein Maß des linearen Zusammenhangs bestimmt werden [22]. Der Korrelationskoeffizient beträgt ca. 0,99, was auf einen sehr starken Zusammenhang hinweist. Die Symbolerkennungsraten sind damit vom Fahrzeug unabhängig.

3.4. Dynamische vs. statische Symbole

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, wurde im vierten Teil der Probandenstudie abgefragt, ob dynamische Symbole für bestimmte Situationen bevorzugt werden (siehe Tabelle 2). Damit entscheiden sich vor allem bei dynamischen Situationen, z.B. Fahrzeug beschleunigt (94 %), bremst (83 %), biegt ab (94 %), die Mehrheit der Probanden für dynamische Symbole. Dagegen bevorzugen die meisten Probanden (80 %) statische Zeichen zur Darstellung statischer Situationen (z.B. ich sollte stehen bleiben).

Tabelle 2: Dynamische vs. statische Symbole

	Fahrzeug steht	Fahrzeug beschleunigt	Fahrzeug bremst	Fahrzeug biegt ab	Fahrzeug hat Fußgänger erkannt	Ich darf gehen	Ich sollte stehen bleiben
Ja	11	33	29	33	12	20	5
Nein	19	0	4	2	17	11	28
Weiß nicht	5	2	2	0	6	4	2

3.5. Intuitivität der Symbole

Da die Probanden im ersten Teil der Studie keine Situationsauswahl oder andere Hinweise zur dargestellten Symbolik zur Verfügung hatten, eignet sich dieser Test besonders gut, um die Intuitivität der Symbole für die Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion zu untersuchen. Dafür werden die Rangliste aus Tabelle 1 und die freien Antworten näher betrachtet. Obwohl alle Symbole, wie in Abschnitt 2 beschrieben, bekannte Zeichen zeigen oder von diesen abgeleitet werden können, beträgt die mittlere Zeit bis zum Deuten der Interaktion 6,64 s. Für das beste Drittel liegt die mittlere Zeit bis zum Beurteilen der Interaktion noch bei 4,84 s. Unter den am

schnellsten erkannten Symbolen (siehe Tabelle 1) sind beispielsweise die STOP-Hand US-amerikanischer Ampeln, das Kreuz und die schematische Darstellung von Fahrzeug, Fußgänger und Stoppschild. Dies lässt die Vermutung zu, dass besonders bekannte Gefahrensymbole schnell erkannt werden. Die meisten der Antworten der Probanden, was das Fahrzeug versucht zu kommunizieren, können auf die untersuchten Situationen aufgeteilt werden bzw. ergaben keine Antwort. Durch Einteilen der Aussagen in eine der sieben untersuchten Situationen und eine sonstige Kategorie werden damit rund 66 Prozent der Antworten berücksichtigt. Die übrigen 34 Prozent konnten zu keinen sinnvollen Gruppen zusammengefasst werden. Mit der beschriebenen Gruppierung wird, analog wie in Abschnitt 3.3 gezeigt, eine Erkennungsrate für jedes Symbol berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt.

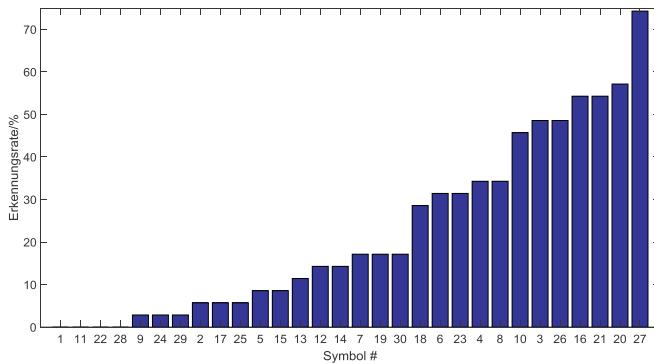


Abbildung 4: Erkennungsrate im Test 1

Das Symbol mit der besten Erkennungsrate im Test 1 ist die STOP-Hand mit ungefähr 74 %. Die drei nächstbesten sind mit ca. 57 % das Fahrzeug mit Fußgänger und jeweils ca. 54 % der animierte Abbiegepfeil und der Fußgänger mit der Wellendarstellung. Alle anderen Symbole zeigen eine Erkennungsrate von weniger als 50 %, was bedeutet, dass weniger als die Hälfte der Probanden die gleiche Symboldeutung angaben. Die Symbole 1, 11, 22 und 28 liegen mit jeweils 0 % am Ende der Auflistung. Dies zeigt, dass, obwohl bekannte Symbole schneller erkannt werden als unbekannte, keines der Symbole in der nachgestellten Situation intuitiv erkannt wird. Lediglich Zeichen 27 stellt eine kleine Ausnahme dar. In Test 1 werden 26 Symbole von maximal 50 Prozent der Probanden gleich interpretiert.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe einer Clusteranalyse, einer Ranglistenuntersuchung und einer multiplen linearen Regressionsanalyse konnten geeignete Symbole für eine Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion mit bekannten Situationen gefunden werden. Gerade die STOP-Hand US-amerikanischer Ampeln

zeigt gegenüber den Zeichen aus Abbildung 1 sehr gute Ergebnisse über alle Testabschnitte. Durch Vergleich der Erkennungsraten für Symbole am Fahrzeug und am Computerbildschirm zeigt sich, dass das Fahrzeugsetup kaum einen Einfluss auf die Zuordnung der Symbole hat. Besonders die Ergebnisse aus Abschnitt 3.4 zur Bewertung der Intuitivität der Symbole zeigen, dass auch bekannte Symbole, die in anderen Situation sicher erkannt werden, für eine Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion wenig intuitiv zuordenbar sind. Dies verdeutlicht, dass zukünftige Forschung vor allem in die Auslegung intuitiver Symbole gerichtet sein sollte. Dies lässt, wie in [15] beschrieben, vermuten, dass Symbole für die neuen Anwendungsbereiche erst erlernt werden müssen. So bestätigt das auch die hier vorgestellte Probandenstudie, wobei mit einer vorgegebenen Situationsauswahl weitaus schnellere und sicherere Antworten gegeben wurden. Es sollte daher noch untersucht werden, wie Symbole aussehen sollten bzw. in welchen Situation kommuniziert werden sollte, damit sich für Fußgänger eine natürliche Interaktion mit automatisierten Fahrzeugen einstellen kann, wie bisher mit dem Fahrer eines Fahrzeugs.

Literaturverzeichnis

- [1] AUDI AG, *Fahrerassistenzsysteme*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.audi-mediacenter.com/de/technik-lexikon-7180/fahrerassistenzsysteme-7184>. Zuletzt geprüft am: 22.02.2018.
- [2] *CityMobil2 final conference. Donostia, San Sebastian, Spain. 2016*.
- [3] M. Clamann, M. Aubert und M. L. Cummings, "Evaluation of Vehicle-to-Pedestrian Communication Displays for Autonomous Vehicles," in *Transportation Research Board 96th Annual Meeting, Washington DC, United States, 2017*
- [4] T. Deutschländer, "Über Möglichkeiten und Grenzen der statistischen Langfristprognose," Dissertation, Freie Universität Berlin, Berlin, 2003.
- [5] B. Färber, "Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrem," in *Springer open, Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*, M. Maurer, Ed., Berlin u.a.: Springer Vieweg, 2015, S. 127–146.
- [6] M. J. Flannagan, "UMTRI Review: Lighting for Automated Vehicles," Transportation Research Institute, UMTRI, University of Michigan, Ann Arbor, USA, 2017.
- [7] L. Fridman und B. Mehler et al., *To Walk or Not to Walk: Crowdsourced Assessment of External Vehicle-to-Pedestrian Displays*. [Online] Verfügbar unter: <https://arxiv.org/abs/1707.02698>. Zuletzt geprüft am: 06.03.2018.
- [8] T. Fuest, L. Sorokin, H. Bellem und K. Bengler, "Taxonomy of Traffic Situations for the Interaction between Automated Vehicles and Human Road Users," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Bd. 597, *Advances in Human Aspects of Transportation: Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Human Factors in Transportation, July 17–21, 2017, Los Angeles, CA, USA*, N. A. Stanton, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 708–719.
- [9] A. Habibovic, J. Andersson, M. Nilsson, V. M. Lundgren und J. Nilsson, "Evaluating interactions with non-existing automated vehicles: Three Wizard of Oz approaches," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV): 19-22 June 2016*, [Piscataway, New Jersey]: [IEEE], 2016, S. 32–37.
- [10] W. Huhn, M. Hamm, S. Berlitz und S. Omerbegovic, "Digitales Licht: Von der Matrix zum Mikrospiegel," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 120. Jg., Nr. 2, S. 18–25, 2018.
- [11] E. Jonkisz, H. Moosbrugger und H. Brandt, "Testtheorie und Fragebogenkonstruktion," in *Springer-Lehrbuch, Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*, H. Moosbrugger und A. Kelava, Eds. 2. Aufl., Berlin u.a.: Springer, 2012.
- [12] R. Klädtke, S. Hauptmann und G. Böhm, "Lichttechnik zur Kommunikation beim autonomen Fahren," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 120. Jg., Nr. 2, S. 30–35, 2018.

- [13] P. D. König und S. Jäckle, "Clusteranalyse," in *Lehrbuch, Neue Trends in den Sozialwissenschaften: Innovative Techniken für qualitative und quantitative Forschung*, S. Jäckle, Ed., 2017, S. 51–84.
- [14] U. Krenkel, *Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik: für Studium, Berufspraxis und Lehramt*, 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2003.
- [15] T. Lagström und V. M. Lundgren, "Autonomous vehicles' interaction with pedestrians: An investigation of pedestrian-driver communication and development of a vehicle external interface," Master Thesis, Department of Product- and Production Development, Division of Design & Human Factors, Chalmers University of Technology, Gothenborg, Sweden, 2015.
- [16] Q. Liu, B. Emmermann, O. Suen, B. Grant, J. Hercules, E. Glaser und B. Lathrop, "Rightward attentional bias in windshield displays: Implication Towards External Human Machine Interfaces for Self-driving Cars," in *2017 IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management(CogSIMA), March 27-31, 2017 in Savannah, GA, USA*
- [17] V. M. Lundgren, A. Habibovic, J. Andersson, T. Lagström, M. Nilsson, A. Sirkka, J. Fagerlönn, R. Fredriksson, C. Edgren, S. Krupenia und D. Saluär, "Will There Be New Communication Needs When Introducing Automated Vehicles to the Urban Context?," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Bd. 597, *Advances in Human Aspects of Transportation: Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Human Factors in Transportation, July 17-21, 2017, Los Angeles, CA, USA*, N. A. Stanton, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 485–497.
- [18] K. Mathadevan, S. Somanath und E. Sharlin, "Communicating Awareness and Intent in Autonomous Vehicle-Pedestrian Interaction," Research Report, Computer Science, University of Calgary, Calgary, 2017.
- [19] M. Matthews, G. Chowdhary und E. Kieson, *Intent Communication between Autonomous Vehicles and Pedestrians*. [Online] Verfügbar unter: <https://arxiv.org/abs/1708.07123>. Zuletzt geprüft am: 18.01.2018.
- [20] K. Merten, *Informelle Zeichengebung im Straßenverkehr: Bericht zum Forschungsprojekt 7521 der Bundesanstalt für Straßenwesen Bereich Unfallforschung*. Köln: Bundesanstalt für Straßenwesen Bereich Unfallforschung, 1981.
- [21] A. L. Newman, "Vehicle-to-pedestrian communication systems", USA US20180040240A1.
- [22] L. Papula, *Mathematische Formelsammlung: Für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, 10. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [23] T. Petzoldt, K. Schleinitz und R. Banse, "The potential safety effects of a frontal brake light for motor vehicles," in *IET Intelligent Transport Systems*. 2018
- [24] P. Rabenau, F. Patzig und T. Q. Khanh, "Investigation of the Optimum Brightness of Dynamic Taillights," in *Darmstädter Lichttechnik, Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting: ISAL 2017*, T. Q. Khanh, Ed., München: Utz, Herbert, 2017, S. 491–499.
- [25] R. Risser, *Kommunikation und Kultur des Strassenverkehrs*, 1. Aufl. Wien: Literas-Universitäts-Verlag, 1988.
- [26] C. Said und D. R. Baker, *Humanizing cars, sensitizing humans: The rise of robot vehicles will mean reprogramming a longtime relationship*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.schronicle.com/news/article/Self-driving-cars-human-car-interactions-12215194.php#container>. Zuletzt geprüft am: 16.01.2018.
- [27] J. Sander, "Generalized Density-Based Clustering for Spatial Data Mining," Dissertation, Fakultät für Mathematik und Informatik, Ludwig-Maximilians-Universität München, München, 1998.
- [28] D. L. Scarl, "Eye contact perception at distances up to six meters," Dissertation, Portland State University, Portland, USA, 1985.
- [29] F. Schneemann und I. Gohl, "Analyzing driver-pedestrian interaction at crosswalks: A contribution to autonomous driving in urban environments," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV): 19-22 June 2016*, [Piscataway, New Jersey]: [IEEE], 2016, S. 38–43.
- [30] E. Uhlemann, "Initial Steps Toward a Cellular Vehicle-to-Everything Standard [Connected Vehicles]," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 12. Jg., Nr. 1, S. 14–19, 2017.
- [31] Universität Zürich UZH, *Methodenberatung: Multiple Regression*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse/zusammenhaenge/mreg.html>. Zuletzt geprüft am: 13.03.2018.
- [32] E. Vinkhuyzen und M. Cefkin, "Developing Socially Acceptable Autonomous Vehicles," *Ethnographic Praxis in Industry Conference Proceedings*, 2016. Jg., Nr. 1, S. 522–534, 2016.

Tiefenwahrnehmung basierend auf aktuellen Scheinwerferentwicklungen

Depth perception based on current headlight advancement

**C. Schneider, C. Haas, M. Akmal, Dr.-Ing. S. Söhner,
Dr.-Ing. T. Schaal, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach;
Prof. Dr. rer.nat. W. Stork, KIT, Karlsruhe**

1. Abstract

Common headlight systems are used to light the vehicles scene ahead and for current multi pixel derivates do so in an adaptive manner. The proposed paper outlines a methodology called automotive active triangulation to broaden the functional spectra of common headlight systems, from classical illumination operations to 3D reconstruction tasks, performed by the vehicles headlight. Within the scope of this paper a system characterisation as well as the used underlying methodologies are outlined and the systems suitability relating real operation will be shown by considering a Porsche prototype implementation.

Modern automotive headlight devices aim at dense multi pixel structures. Therefore, a system architecture is provided for advancement of existing functionalities ranging from highly precise glare free high beam to communicative projections. However, such functionalities are exclusively used for the sake of driver awareness and information transfer. Hence, there is a clear division of the automotive light development with its underlying potentials and the need of ADAS sensor systems. In modern vehicles, the sensing is incorporated by various sensor solutions. Many of them still show distinct drawbacks which either limit their operational range or the efficient application. One of these limitations is the well-known gap of cost efficient and accurate close range sensing. The presented paper focuses at this drawback by proposing a novel sensor solution taking into account modern headlight systems to generate accurate and efficient depth sensing of the cars environment.

The proposed system is the result of continuous advancement of Porsches adaptive headlight adjustment and a first glimpse of the future light strategy. It is using a headlight to camera fusion and implements a scenery depth perception by taking advantage of the well-known active triangulation approach. It shares the working principle of stereo vision but contrarily project its features by using the pixel array of the multi-pixel headlight and records the features by

using a mono-camera with a corresponding image processing. The advantage of the concept lays in its ability to enable depth perception for low structured scenarios on a single camera unit and still offer the superior camera strength of object segmentation. The concept can be provided for redundancy enhancement by a software module as the components, multi pixel headlights and driver assistance frontal camera are preexisting in most advanced vehicles. Hence, a sensor device is generated without the need of any hardware addition and thus avoiding complex and cost-intensive integration duties such as sensor packaging and electronic integration. The resulting depth perception may be used for, among others, driverless parking or intelligent chassis controls.

The proposed paper will give an overview relating the potential of an automotive 3D reconstruction based on active triangulation by conducting a system characterisation. This will be based on the current 84 Pixel Porsche Matrix Beam architecture. In addition, the given characterisation will incorporate future high resolution strategies enabling superior pixel density as well, to show the methods future applicability for autonomous scenarios. Further on, the paper describes and visualises the used function blocks such as calibration and image processing methods. As Deep Learning approaches yield promising results in automotive research as well as development a comparison relating its effectiveness with classic image processing cascades poses an interesting research strategy. Hence, the proposed paper will compare those strategies for feature extraction respectively feature learning. The corresponding training data as well as the detection results are gathered by realistic road tests with the corresponding Porsche prototype vehicle, which is based on the Porsche Cayenne E3 architecture.

Hence, the proposed paper outlines a methodology in conjunction with its underlying function implementation to realise a novel sensor solution, which simply relies on an already existing hardware set. Based on this fusion the tremendous progress of automotive light systems can be used to realise light based depth sensing and therefore present new research and business areas for automotive lighting.

1. Einleitung

Die aktuellen Bestrebungen heutige Scheinwerfersysteme an die Anforderungen der Zukunft anzupassen, schreiten immer weiter voran. So sind beispielsweise vermehrt Hardwarekonzepte in der Entwicklung, die Pixelzahlen von über mehreren zehntausend individuell ansteuerbaren Pixeln ermöglichen. Als Beispiel hierfür sei Eviyos anzuführen, welches die Serienumsetzung des µAFS BMBF Projektes beschreibt und hierfür eine Scheinwerferumgebung mit über 1024 Pixeln pro Komponente ermöglicht [1]. Neben additiven LED Systemen ermöglichen ebenso Konzepte basierend auf LCD und DMD Technik hochauflöste Projektionssysteme [2],[3]. Demgegenüber bestehen neben den aktuellen Hardwareentwicklungen ebenso Konzepte für funktionelle Erweiterungen, um die hochauflösenden Scheinwerfersysteme in der Serie anzuwenden. Hierbei zählen neben einer Verbesserung der ADB Funktionalitäten ebenso Funktionen für Navigations- und Kommunikationsanwendungen [4],[5].

Grundsätzlich können die Anwendungen für hochauflöste Systeme in Maskierungs- und Kommunikationsprojektion differenziert werden. Ersteres beschreibt hierbei die Lösung des Zielkonflikts zwischen einer optimalen Szenenbeleuchtung für den Fahrer und eine Vermeidung der Blendung voraus liegender Fahrzeuge. Auf Basis von höher aufgelösten Systemen kann der hierfür angewandte Maskierungsbereich optimal am umgebenden Verkehr angepasst werden. Funktionserweiterung zur Kommunikationsprojektion umschreibt hingegen die Projektion von Symbolen auf die Fahrzeugfrontszene um eine kommunikative Interaktion mit dem Fahrer (Navigationsanweisungen, Geschwindigkeitslimitierung etc.) und dessen Umfeld (Projektion von Fußgängerübergängen etc.) zu ermöglichen.

Die Entwicklung sowie Erweiterung dieser Funktionalitäten steht jedoch im kritischen Kontext hinsichtlich deren Anforderung an hochauflöste Scheinwerfersysteme. So sind beispielsweise Aussagen hinsichtlich der optimalen Pixelanzahl für maskierte Fernlichter nur bedingt in der Literatur gegeben. So beschreibt beispielhaft Moisel [6] einen Pixelbereich zwischen $N=19200$ und $N=76800$ Pixeln, orientiert sich hierbei jedoch überwiegend an den möglichen technischen Auslegung des Linsensystems. Demgegenüber bestehen für die kommunikativen Projektionen rechtliche Limitierungen, da diese nicht die in den Regularien ECE112 und ECE123 deklarierten Lichtverteilungen umfassen. Basierend auf diesen Limitierungen besteht ein Zielkonflikt zwischen der stetigen Weiterentwicklung hochauflöster Scheinwerfersystemen und den einhergehenden Potential zur Funktionserweiterung bestehender und angedachter Funktionen. Neben den Funktionalitäten zur Maskierung und kommunikativer Projektion beschreibt das vorliegende Paper das Potential des Scheinwerfers als tiefenwahrnehmende Sensoreinheit zu agieren. Dementsprechend ist es die Motivation des vorliegenden Papers,

die funktionalen Bereiche für hochauflösten Scheinwerfersysteme um eine 3D Sensorik zu erweitern.

Die scheinwerferbasierte Tiefenwahrnehmung wird anhand einer Scheinwerfer-Kamera Fusion ermöglicht und fußt auf, der im Bereich der 3D Rekonstruktion bekannten, aktiven Triangulation. Hierbei werden durch ein Projektionssystem charakteristische Merkmale in die Szene projiziert, welche wiederum durch ein Kamerasytem akquiriert werden. Auf Basis bekannter geometrischer Relationen kann anhand von Triangulationsalgorithmen der Projektionspunkt des charakteristischen Merkmals im 3D Raum berechnet werden. Im Bereich der automobilen aktiven Triangulation fungiert der Scheinwerfer als Projektionseinheit um charakteristische Merkmale in den Raum zu projizieren, welche wiederum von der Fahrerassistenzkamera akquiriert werden. Durch diesen Stereoaufbau kann eine 3D Sensorik ermöglicht werden, welche eine Tiefenwahrnehmung in gering strukturierten Szenarien und im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ermöglicht. Diese Bedingungen sind für existente Rekonstruktionsalgorithmen wie beispielhaft SFM (**S**tructure **F**rom **M**otion) anspruchsvoll aufgrund der Forderung nach charakteristischen Merkmalen mit einem entsprechend hohen Basisabstand e.g. Bewegungsversatz. Darüber hinaus kann die beschriebene Methodik in existente Systeme integriert werden, da die benötigten Hardwarekomponenten bereits im Fahrzeug integriert und verknüpft sind. Als weiteren Vorteil der aktiven Triangulation sind der Verzicht auf eine Synchronisierung der Komponenten und der Vorteil hinsichtlich der Tiefenauflösung bei kontinuierlicher Weiterentwicklung der hochauflösten Scheinwerfersysteme zu nennen.

Mögliche Anwendungsfälle für eine scheinwerferbasierte Tiefenwahrnehmung sind neben automatisierten Einparkmanövern in Parkszenarien ebenso die Redundanzweiterung heutiger Nahbereichssensorik. Darüber hinaus sind die Umsetzung von Diensten zur simultanen Fahrzeuglokalisierung in einer eigenständigen Karte (bekannt als SLAM, engl.: **S**imultaneous **L**ocation **A**nd **M**apping) ebenso durch die Sensorik denkbar.

Im Folgenden sollen die Grundlagen für die aktive Triangulation und die Charakterisierung der Methodik für den automobilen Anwendungsfall dargelegt werden. Darüber hinaus wird in einem weiteren Schritt die einhergehende Funktionskaskade dargelegt und die prototypische Umsetzung beschrieben.

2. Aktive Triangulation

Die aktive Triangulation umfasst neben der Projektion und Akquisition charakteristischer Merkmale eine initiale Kalibrierung. Hierbei wird die Kamera sowie der Scheinwerfer als Lochkameramodell entsprechend Bild 1 verstanden.

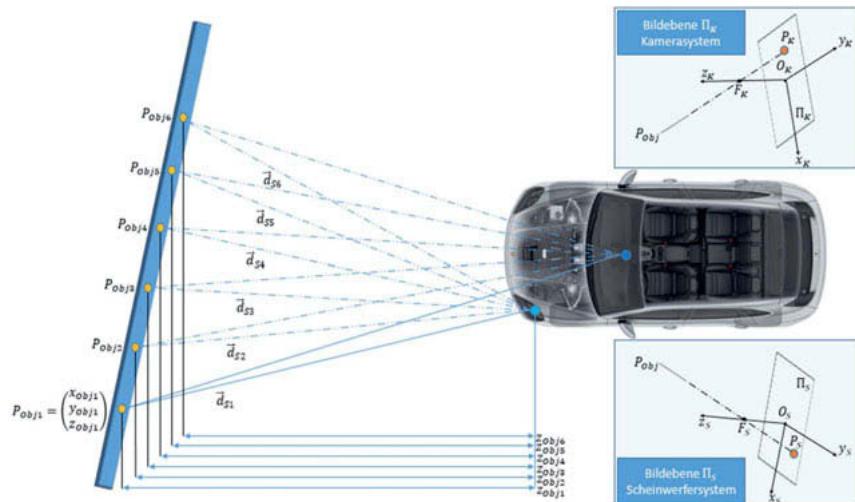


Bild 1: Darstellung des Funktionsprinzips der aktiven Triangulation sowie der geometrischen Relationen. Hierbei ist zu beachten, dass z_{obj} in Relation zum Scheinwerfersprung berechnet wird. Diese Definition wurde aus Übersichtsgründen gewählt. In einer späteren Applikation werden die Distanzwerte in Relation zum Fahrzeugkoordinatensystem berechnet (Fahrzeug Hinterachse).

Anhand der Kalibrierung sind entsprechend der Brennpunkt, die Bildebene sowie die 2D Punkte der charakteristischen Merkmale auf der Bildebene der Kamera (F_K, Π_K, P_K) sowie des Scheinwerfers (F_S, Π_S, P_S) bekannt. Auf Basis des bekannten Brenn- und Bildebenenpunktes - F_K, P_K und F_S, P_S sowie der 3D Weltpunkte der projizierten charakteristischen Merkmale P_{Obj} kann jeweils für das Kamera- und Scheinwerfersystem eine Geradengleichung entsprechend Gleichung 2.1 und 2.3 angegeben werden.

$$P_K = F_K + \alpha \cdot (P_{obj} - F_K) \quad (2.1)$$

$$\begin{pmatrix} x_K \\ y_K \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_K \end{pmatrix} + \alpha \cdot \begin{pmatrix} x_{obj} - 0 \\ y_{obj} - 0 \\ z_{obj} - F_K \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$P_S = F_S + \beta \cdot (P_{obj} - F_S) \quad (2.3)$$

$$\begin{pmatrix} x_2 + x_S \\ y_2 + y_S \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 + F_S \end{pmatrix} + \beta \cdot \begin{pmatrix} x_{obj} - x_2 \\ y_{obj} - y_2 \\ z_{obj} - z_2 - F_S \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Werden Gleichung 2.1 und 2.3 für x_{obj} und y_{obj} gleichgesetzt, kann die Gleichung für den Distanzwert z_{obj} entsprechend Formel 2.5 und 2.6 aufgelöst werden.

$$z_{objx} = \frac{F_K \cdot F_S}{F_K \cdot x_S - F_S \cdot x_K} \cdot \left(x_2 + x_S - x_K + \frac{z_2 \cdot x_S}{F_S} \right) \quad (2.5)$$

$$z_{objy} = \frac{F_K \cdot F_S}{F_K \cdot y_S - F_S \cdot y_K} \cdot \left(y_2 + y_S - y_K + \frac{z_2 \cdot y_S}{F_S} \right) \quad (2.6)$$

Für die zuvor angeführte Berechnung ist aus Gründen der Übersicht eine Translation zwischen den Komponenten berücksichtigt wurden. Sind die Komponenten zueinander gedreht ist entsprechend die Applikation einer Rotationsmatrix notwendig. Für eine vollständige Herleitung der mathematischen Beziehung sei an dieser Stelle auf Salvi et al. [7] und Batlle et al. [8] verwiesen. Aus Gleichung 2.5 und 2.6 folgt, dass der Distanzwert eines projizierten Merkmals basierend auf der aktiven Triangulation anhand des Brennpunkts und der Bild des charakteristischen Merkmals auf den Bildebenen der Stereokomponenten berechnet werden kann. Im Folgenden wird anhand einer Systemcharakterisierung das Potential der aufgezeigten Methodik für die automobile Anwendung analysiert.

3. System Charakterisierung

Die momentan in den Fahrzeugen Panamera und Cayenne befindlichen Scheinwerfersysteme weisen eine Pixelanzahl von $N=84$ auf. Aus Bild 2 kann das räumliche Auflösungsvermögen für variierende Distanzen abgeleitet werden. Ersichtlich ist, dass für heutige Multipixel Scheinwerfersysteme Objekte mit einem horizontalen Abstand von <4 cm bei 2 m respektive <40 cm bei 20 m Tiefendistanz durch die Methodik der aktiven Triangulation differenziert werden können. Das räumliche Auflösungsvermögen steigt entsprechend mit 0.021 cm pro Distanzmeter zur Projektionsfläche bei einer räumlichen Winkelauflösung von 1.17° an. Für höhераufgelöste Scheinwerfersysteme, wie beispielsweise LCD und DMD Systeme, können Winkelauflösungen im Bereich von 0.1° [2],[3] angenommen werden. Hierbei würde sich die räumliche Winkelauflösung signifikant auf <0.35 cm bei 2 m Distanz zur Projektionsfläche steigern und mit 0.17 cm pro Distanzmeter verlaufen.

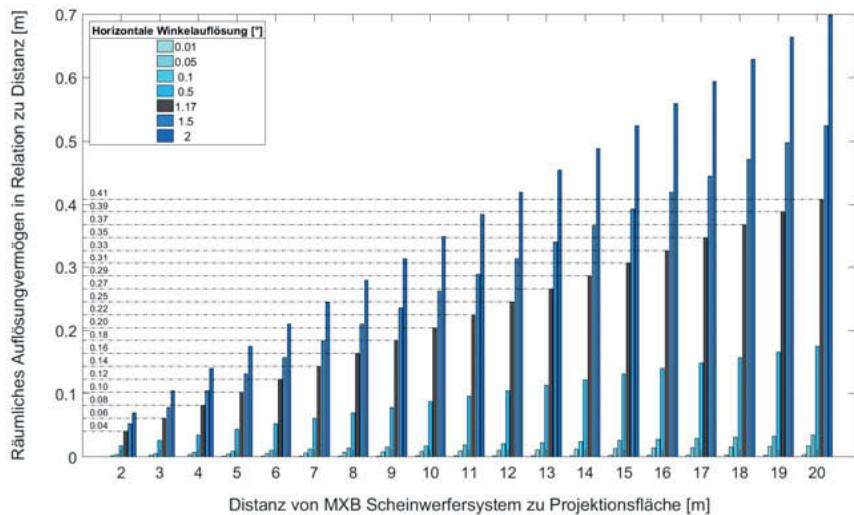


Bild 2: Darstellung des räumlichen Auflösungsvermögens für variierende Projektionsdistanzen im Intervall zwischen 2 und 20 m und horizontaler Winkelauflösungen des Scheinwerfers im Bereich von 0.01° bis 2° . Deutlich zu erkennen ist, dass mit zunehmender Scheinwerferauflösung die Möglichkeit der Objektdifferenzierung in der Distanz sichtlich ansteigt. Die schwarzen Balken verdeutlichen das räumliche Auflösungsvermögen für den Porsche 84 Pixel MXB Scheinwerfer.

Diese Charakterisierungen sind natürlich an die Annahme geknüpft, dass die charakteristischen Punkte mit einer entsprechenden Bildverarbeitung aufgelöst werden können. Neben der beschriebenen Winkelauflösungen ist jedoch der Fehler bei angewandter Triangulation für das Gesamtsystem relevant. Dieser ist an den Basisabstand sowie den Detektionsfehler auf der Kamera und Scheinwerferebene gebunden. Folglich wird im weiteren eine Betrachtung des Distanzfehlers in Abhängigkeit der genannten Größen vorgenommen.

4. Triangulationsbasierte Fehlerbetrachtung

Um im Nachfolgenden eine Charakterisierung der aktiven Triangulation zu ermöglichen, wurde der Basisabstand sowie Orientierung des Scheinwerfers zur Kamera in einer Simulationsumgebung variiert. Die angewandte vertikale und horizontale Translation sowie Rotation ist der Bild 3 zu entnehmen. Der Scheinwerfer wurde hierbei simulativ horizontal $T_{CHor}\{-0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5\}$ und vertikal $T_{CVer}\{-0.5, 0, 0.5\}$ versetzt sowie um definierte Winkel $R_{CHor}\{-3^\circ, \dots, +3^\circ\}$, $R_{CVer}\{-3^\circ, \dots, +3^\circ\}$ rotiert.

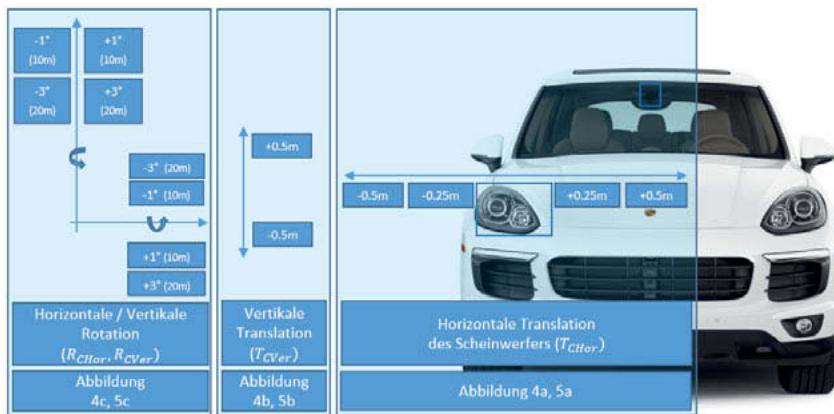


Bild 3: Darstellung der simulativ durchgeföhrten Variationen zwischen Scheinwerfer und Kamera (Translation T_{CHor} , T_{CVer} und Rotation R_{CHor} , R_{CVer}).

Für die durchgeführte Verschiebung und Rotation wurde die aktive Triangulation durchgeführt. Keine Variation ($T_{CHor} = T_{CVer} = 0$) und Rotation ($R_{CHor} = 0$) gibt entsprechend den verbauten Stand im Fahrzeug wieder. Um die Relation des Fehlers in Abhängigkeit des Basisabstands und Orientierung zu verdeutlichen, wurde der Bildpunkt der Kamera P_K mit Gauss-verteiltem Rauschen ($\mu = 0$, $\sigma = \{0, 0.5, 1, 1.5, 2\}$) entsprechend Bild 4 und 5 behaftet.

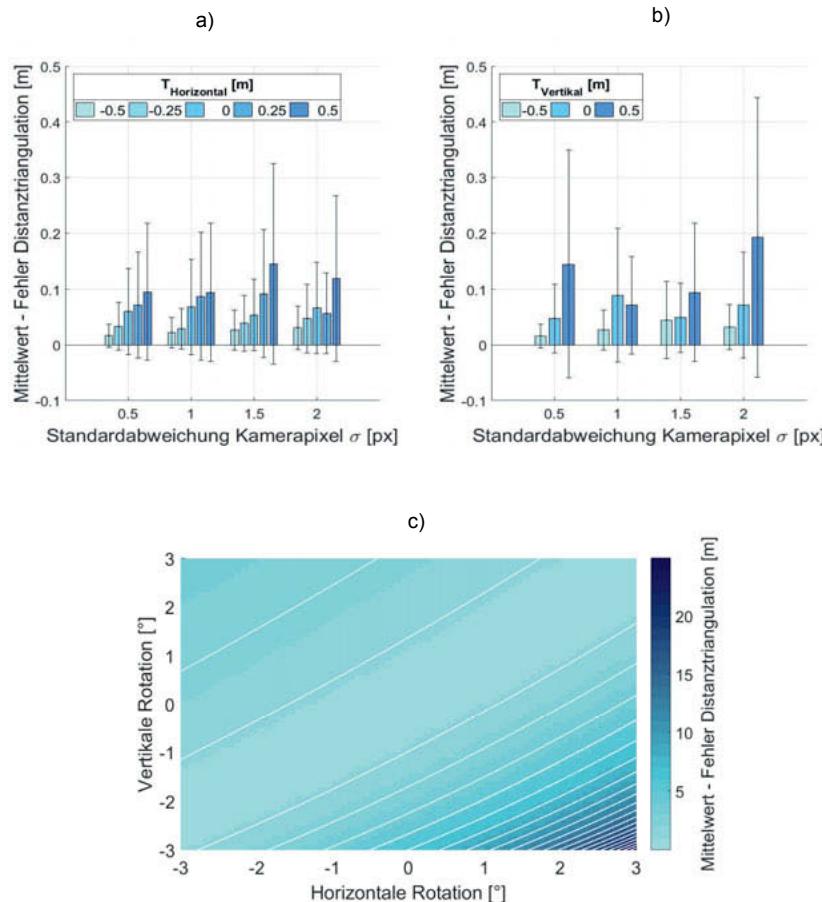


Bild 4: Darstellung des Mittelwerts des Distanzfehlers (simulierte Distanz 10m) bei Variation von Basisabstand und Orientierung des Scheinwerfers zur Kamera sowie verrauschten Kamerapixel für a) Horizontale Translation $T_{CHor}\{-0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5\}$, b) Vertikale Translation $T_{CVer}\{-0.5, 0, 0.5\}$ und c) Horizontale und Vertikale Rotation $R_{CHor}\{-3^\circ, \dots, +3^\circ\}$, $R_{CVer}\{-3^\circ, \dots, +3^\circ\}$. Der Mittelwert des Distanzfehlers für $T_{CHor} = T_{CVer} = 0$, $R_{CHor} = 0$ beträgt 0 m ($\sigma = 0$), 0,060 m ($\sigma = 0.5$), 0,068 m ($\sigma = 1.0$), 0,054 m ($\sigma = 1.5$), 0,067 m ($\sigma = 2.0$).

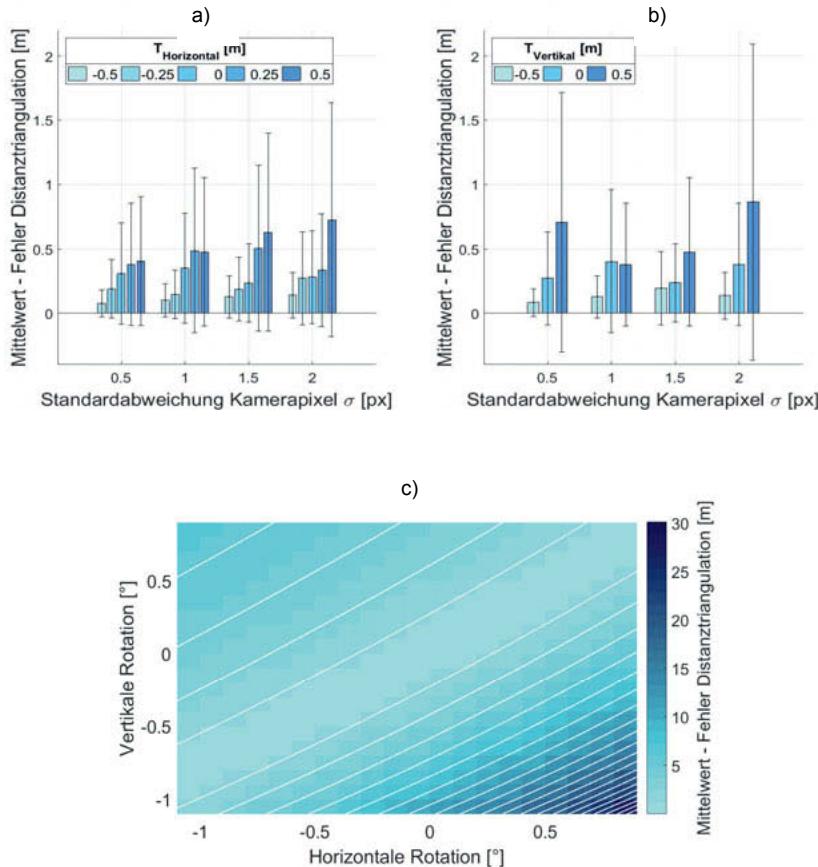


Bild 5: Darstellung des Mittelwerts des Distanzfehlers (simulierte Distanz 20m) bei Variation von Basisabstand und Orientierung des Scheinwerfers zur Kamera sowie verrauschten Kamerapixel für a) Horizontale Translation $T_{CHor}\{-0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5\}$, b) Vertikale Translation $T_{CVer}\{-0.5, 0, 0.5\}$ und c) Horizontale und Vertikale Rotation $R_{CHor}\{-1^\circ, \dots, +1^\circ\}$, $R_{CVer}\{-1^\circ, \dots, +1^\circ\}$. Der Mittelwert des Distanzfehlers für $T_{CHor} = T_{CVer} = 0$, $R_{CHor} = 0$ beträgt 0 m ($\sigma = 0$), 0.31 m ($\sigma = 0.5$), 0.35 m ($\sigma = 1$), 0.24 m ($\sigma = 1.5$), 0.28 m ($\sigma = 2.0$).

In Bild 4 und 5 wird deutlich, dass eine Erhöhung des Basisabstandes von Scheinwerfer zur Kamera (Translation des Scheinwerfers zur rechten Außenseite des Fahrzeugs) mit einer Verringerung des Distanzfehlers einhergeht. Analog hierzu steigt der Fehler mit Verringerung des Basisabstandes. In dem aufgezeigten Bewegungsbereich steigt die Standardabweichung des Fehlers der Distanztriangulation (bei $\sigma = 1 \text{ Pixel}$) für eine definierte Distanz von 10 m von 0.068 m ($\mu = 0.086 \text{ m}$) bei keiner applizierten Translation auf 0.094 m ($\mu = 0.124 \text{ m}$) bei einem horizontalen Versatz von +0.5 m und sinkt hingegen auf 0.022 m ($\mu = 0.028 \text{ m}$) bei einem horizontalen Versatz von -0.5 m. Demgegenüber steigt der Fehler bei einer vertikalen Positionsänderung des Scheinwerfers auf 0.071 m ($\mu = 0.089 \text{ m}$) und sinkt auf 0.027 m ($\mu = 0.036 \text{ m}$) für eine vertikale Translation um +0.5 respektive -0.5 m entsprechend Bild 4. Die Fehler steigen für den definierten Distanzbereich von 20 m entsprechend Bild 5 weiter an. Darüber hinaus kann die deutliche Zunahme des Distanzfehlers bei einer Rotation des Scheinwerfers verdeutlicht werden. So resultiert bereits eine positive 1° Scheinwerferrotation in horizontale und vertikale Richtung zu einem Distanzfehler von 0.12 m respektive 0.46 m für Projektionsdistanzen von 10 m beziehungsweise 20 m. Ferner ist aus Bild 4 und 5 ersichtlich, dass Rotationen in positiver horizontaler und negativer vertikaler Richtung für den rechten Scheinwerfer höhere Distanzfehler bewirken. Dies ist der verringerten Disparität für zunehmende Distanzen geschuldet. Die aufgezeigten Relationen zwischen geometrischer Positionierung sowie Orientierung der Stereokomponenten und der Tiefenauflösung ist in der Literatur allgemein bekannt und wird in beispielhaften Literaturstellen [9] und [10] weiterführend erläutert.

5. Funktionsverlauf Aktive Triangulation

Die Umsetzung der aktiven Triangulation im Fahrzeug orientiert sich an einen definierten Funktionsverlauf welche eine statische Initialisierung sowie eine dynamische Distanzwarnehmung vorsieht. Der Funktionsverlauf ist schematisch Bild 6 zu entnehmen.

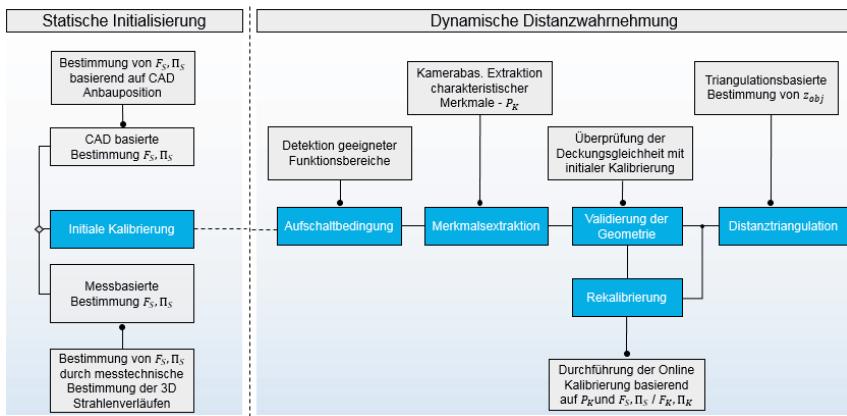


Bild 6: Darstellung des Funktionsablaufs der aktiven Triangulation. Der Funktionsablauf ist in eine statische Initialisierung und dynamische Distanzwarnehmung differenziert. Die Initialisierung ermöglicht die Bestimmung der geometrischen Relationen des Fahrzeugs welche einmalig für ein Fahrzeug (messtechnische Bestimmung) oder Baureihe (CAD basierte Bestimmung) durchgeführt wird. Die dynamische Tiefenwahrnehmung wird wiederkehrend im Fahrzeug bei positiver Aufschaltbedingung online ausgeführt.

Im Funktionsablauf wird zwischen initialer und dynamischer Phase unterschieden. Der initiale Schritt wird durchgeführt, um die intrinsischen und extrinsischen Relationen des Scheinwerfers sowie der Kamera zu bestimmen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die geometrischen Relationen auf Basis einer messtechnischen Kalibrierung extrahiert oder durch das fahrzeugspezifische CAD Modells bestimmt werden können. Für eine zukünftige Serienanwendung ist eine messtechnische Bestimmung auf der Basis einer kostenintensiven produktionstechnischen Implementierung und zeitintensiver Messdurchführung nicht anzustreben. Infolgedessen wird für eine Serienanwendung die Extraktion anhand eines CAD Modells favorisiert. Auf der Basis der statischen Initialisierung sind die Parameter F_K, Π_K sowie F_S, Π_S bekannt und eine Distanztriangulation kann durchgeführt werden.

Die dynamische Distanzwarnehmung wird im Fahrzeug zur Tiefenwahrnehmung durchgeführt, wenn die Bedingung zur Aktivierung gegeben ist. Diese liegt vor, wenn eine Abblend-

oder Fernlichtverteilung auf einer geeigneten Projektionsfläche durch die Fahrerassistenzkamera wahrgenommen wurde (siehe Kapitel 6). Nachfolgend wird anhand einer bildbasierten Merkmalsextraktion die charakteristischen Punkte P_K im Kamerabild extrahiert. Die projizierten Punkte P_S sind aufgrund der in der CAN Matrix deklarierten Scheinwerferpixel zur Generierung der Lichtverteilung bereits bekannt. Um eine fehlerbehaftete Triangulation aufgrund einer scheinwerferbasierten Fehlstellung auszuschließen, wird durch eine Validierung der Geometrie eine vorliegende Fehlstellung detektiert. Sollte diese vorliegen, wird F_S und Π_S der initialen Kalibrierung durch eine Rekalibrierung dynamisch im Fahrbetrieb aktualisiert. In einem abschließenden Schritt wird anhand geeigneter Triangulationsalgorithmen der Tiefenwert der projizierten Merkmale z_{Obj} in Relation zum Fahrzeugkoordinatensystem extrahiert.

6. Funktionsübersicht

Statische Initialisierung

In der statischen Initialisierung werden die intrinsischen und extrinsischen Parameter des Scheinwerfers bestimmt. Hierfür werden für die messtechnische Bestimmung die Strahlenpfade der Matrix Eckpunkte nachempfunden. Ausgegangen wird davon, dass die Eckpunkte entlang einer nicht-gekrümmten Trajektorie entsprechend Gleichung 6.1 im Raum propagieren.

$$s_l: \vec{P}_{Obj} = \vec{P}_S + \lambda \cdot \vec{d}_S \text{ mit } \lambda \in \mathbb{R} \quad (6.1)$$

Hierbei beschreibt \vec{P}_{Obj} einen beliebigen 3D Punkt auf der Trajektorie $\{s_1, s_2, \dots, s_{118}\}$, \vec{P}_S den Bildpunkt auf der Bildebene des Scheinwerfers Π_S sowie \vec{d}_S der Richtungsvektor der 3D Geradengleichung. Um diese aufstellen zu können, wird das Fahrzeug vor eingemessenen Wänden positioniert und anhand der bekannten Geometrie von Fahrzeug zur Projektionsfläche, 3D Punkte extrahiert. Anhand einer Hauptkomponentenanalyse werden die Richtungsvektoren \vec{d}_S der Strahlen bestimmt. Angenommen wird, dass die Strahlen in einem gemeinsamen Punkt, dem Brennpunkt \vec{F}_S einander schneiden. Um diesen zu extrahieren, wird ein lineares Gleichungssystem der Form $A \cdot \vec{l} = \vec{b}$ aufgestellt. Das Ausgleichsproblem wird für die Koordinaten von \vec{F}_S und $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ anhand der Methode der kleinsten Quadrate gelöst und entsprechend die Projektionseigenschaften des Scheinwerfers bestimmt. Alternativ zur messtechnischen Bestimmung kann der Brennpunkt des Scheinwerfers ebenso über das für die Baureihe vorhandene CAD und Simulationsmodell extrahiert werden, obgleich hierfür beispielsweise Produktionstoleranzen akzeptiert werden müssen.

Sind die geometrischen Relationen anhand der statischen Initialisierung durch CAD Berücksichtigung im Entwicklungsprozess oder messtechnischer Bestimmung im Produktionsverlauf bekannt, kann eine scheinwerferbasierte Tiefenwahrnehmung im darauffolgenden Fahrzeugbetrieb vorgenommen werden.

Dynamische Distanzwahrnehmung

Die Tiefenwahrnehmung im Fahrzeugbetrieb umfasst neben der Extraktion von charakteristischen Merkmalen, sowie der geometrischen Validierung und möglichen Aktualisierung ebenso eine szenenspezifische Aufschaltbedingung. Im Folgenden sollen die Funktionsbausteine der Aufschaltbedingung und Merkmalsextraktion kurz dargelegt werden.

Aufschaltbedingungen

Die Aufschaltbedingung ermöglicht die Aktivierung der Tiefenwahrnehmungen in potentiellen Funktionsräumen, wie beispielsweise Projektionsflächen in Tiefgaragen etc. Um diese zu detektieren, wird im Bild der Fahrerassistenzkamera die Struktur der projizierten Lichtverteilung entsprechend Bild 7 gesucht.

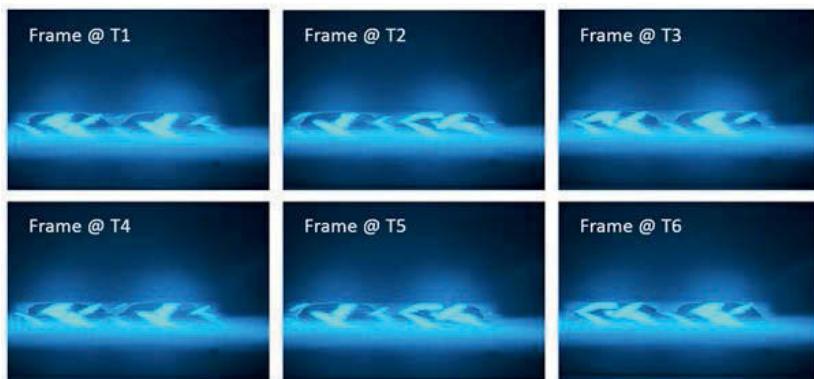


Bild 7: Darstellung einer Fernlichtverteilung bei einer Projektionsdistanz von 10 m in Relation zur Hinterachse. Deutlich zu erkennen ist hierbei der auftretende Flickereffekt, welcher aus dem Zusammenspiel von Scheinwerferansteuerung und dem elektronischen Kameraverschluss resultiert.

Diese Struktur kann aufgrund der flickerbehafteten Lichtverteilung als charakteristisch beschrieben werden. Der in Bild 7 dargestellte Effekt resultiert aus einem Zusammenspiel von Scheinwerferansteuerung und elektronischen Kameraverschlüssen. Die Scheinwerferpixel

werden in Paketen phasenversetzt auf- und abgeschaltet. Infolgedessen wird der Kamerachip durch definierte Scheinwerfersegmente beleuchtet. Entsprechend Bild 7 können diese Scheinwerfersegmente durch zueinander versetzte Lichtpakete im Kamerabild wahrgenommen werden. Die vorhandene Fahrerassistenzkamera weist zudem einen elektronischen Rolling Shutter Verschluss auf. Dieser liest die Zeilen des Kamerachips zeitversetzt aus, wodurch die charakteristischen Treppenstufen in Bild 7 hervorgehen. Da eine derartige Struktur, hervorgerufen von flickerbehafteten Lichtverteilung, durch die Projektion auf Flächen etc. erzeugt wird, wird dieses Charakteristikum für die zuvor erwähnte Aufschaltbedingung angewandt. Um die flickerbehaftete Lichtverteilung zu detektieren, werden kamerabasierte Bewegungsvektoren genutzt. Darauf aufbauend werden die Bewegungsvektoren im Kamerabild hinsichtlich deren lokaler Zusammenhänge analysiert. Bild 8 gibt die hieraus resultierende Aufschaltbedingung für vier variierende Szenarien wieder.

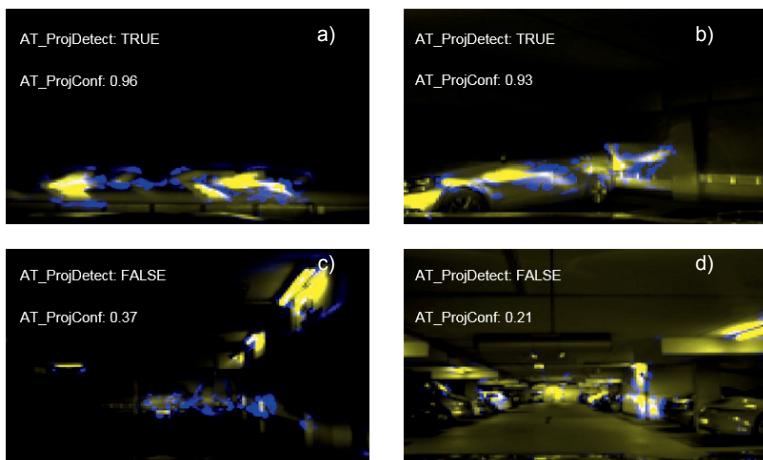


Bild 8: Darstellung von realen Fahrszenen in einer Tiefgarage mit der Projektion flickerbehafteter Lichtverteilung. Bild 8 a) und b) geben die positive Detektion einer Projektionsfläche durch die beschriebene flickerbasierte Aufschaltbedingung wieder. Demgegenüber repräsentieren c) und d) eine Fahrszene in welche die Aufschaltbedingung negativ gesetzt ist und entsprechend eine scheinwerferbasierte Tiefenwahrnehmung unterdrückt werden würde.

Merkmalsextraktion

Die Extraktion von Merkmalen aus den flickerbehafteten Lichtverteilungen, welche beispielhaft in Bild 7 dargestellt wurde, wird anhand einer CNN Architektur durchgeführt. Der Trainings und Prädiktionsverlauf ist schematisch Bild 9 zu entnehmen.

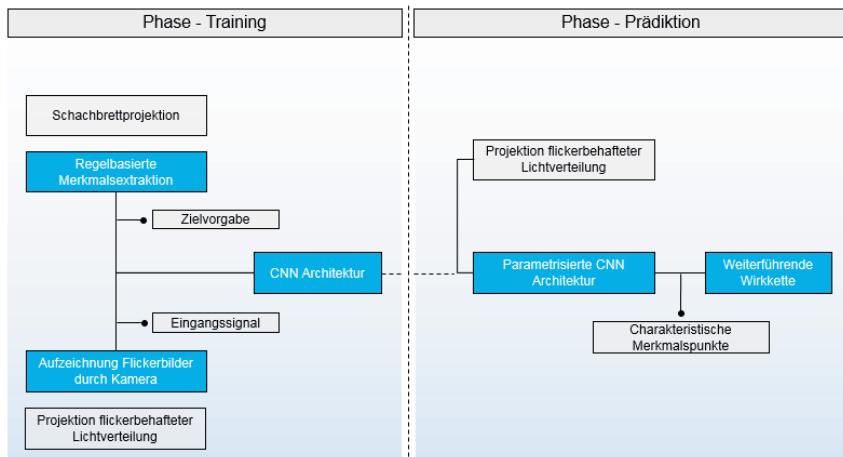


Bild 9: Darstellung des Funktionsablaufs der flickerbasierten Merkmalsextraktion. Der Ablauf wird in Trainings- und Prädiktionsphase differenziert. Im Rahmen der Trainingsphase wird anhand klassischer Bildverarbeitungspunkte der Architektur Groundtruth Merkmale sowie flickerbehaftete Kamerasequenzen als Inputdaten vorgestellt. Die Prädiktionsphase sieht die Extraktion flickerbehafteter Merkmale anhand des gelernten Netzes und der flickerbehafteten Projektion von Abblend- oder Fernlichtverteilung vor.

Die Trainingsphase umfasst die Generierung von Groundtruth Merkmalen anhand einer klassischen regelbasierten Bildverarbeitungskaskade. Hierbei werden Eckpunkte einer projizierten Schachbrettlichtverteilung detektiert. Um dies umzusetzen, wurde die Schachbrettlichtverteilung frequenzgefiltert und ein Kantenabbild der Projektion erzeugt. Auf dessen Basis wurden die Eckpunkte als Wendepunkte sowie Endpunkte des Kantenbildes definiert und entsprechend detektiert. Für eine weiterführende Erläuterung der angewandten Bildverarbeitungskaskade sei an dieser Stelle auf Schneider et al. [11] verwiesen. Bild 10 stellt die Detektion der charakteristischen Merkmale im Kamerabild basierend auf einer projizierten Schachbrettverteilung für variierende Distanzen dar.

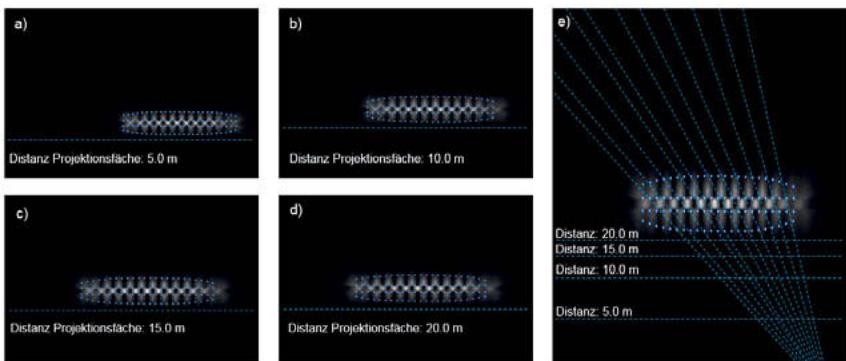


Bild 10: Darstellung von projizierten Schachbrettverteilungen des rechten Scheinwerfers für variierende Distanzen zur Projektionsfläche (a-f). Grafik e) stellt den Bewegungsverlauf der Lichtprojektion für ansteigende Distanzwerte auf der Kamerabildebene dar.

Nachfolgend zur Projektion der Schachbrettlichtverteilung und der Generierung der Ground-truth Punkte werden Sequenzen von Abblend- und Fernlichtverteilung analog zu Bild 7 aufgezeichnet. Dieses Schema wird für eine Variation von Distanzen, Tageszeiten, Umgebungshelligkeiten sowie Wandrotation und –strukturen wiederholt, um eine umfassende Trainingsdatenbank zu ermöglichen. Diese umfasst 128 Groundtruth Berechnungen sowie 145 000 Aufzeichnungen von flickerbehafteten Lichtprojektionen. Alle Daten wurden mittels Cayenne Versuchsfahrzeuge der aktuellen Baureihe eingefahren. Basierend auf den Groundtruth Merkmalen und den flickerbehafteten Projektionen wird die CNN Architektur überwacht trainiert. Die Prädiktionsphase wird im Fahrzeugbetrieb genutzt um anhand des CNN Merkmalspunkte zu generieren. Hierbei wird analog zur Trainingsphase das Kamerabild der gewählten flickerbehafteten Lichtprojektion aufgezeichnet und das Modell appliziert. Die detektierten Bildpunkte werden darauf aufbauend an die weiterführende Wirkkette zur Tiefenwahrnehmung übergeben.

7. Versuchsergebnisse

Im Folgenden soll ein Vergleich der aktiven Triangulation basierend auf Merkmalspunkten einer projizierten Schachbrettlichtverteilung und flickerbehafteten Lichtverteilungen durchgeführt werden. Hierfür wird ein Fahrzeug vor Projektionsflächen mit variierenden Distanzen positioniert. Darauf aufbauend wird der Distanzwert der aktiven Triangulation basierend auf den Merkmalspunkten der zwei Lichtprojektionen berechnet. Der reale Distanzwert des Fahrzeugs

zur Projektionsfläche wird anhand eines Laser Distanzsensors bestimmt. Bild 11 stellt die Abweichung der berechneten Distanz für die detektierten Merkmalspunkte in Abhängigkeit zur realen Entfernung zur Projektionsfläche dar. Demgegenüber gibt Bild 12 die überlagerte Detektion der Merkmalspunkte für eine projizierte Schachbrett- und Abblendlichtverteilung wieder.

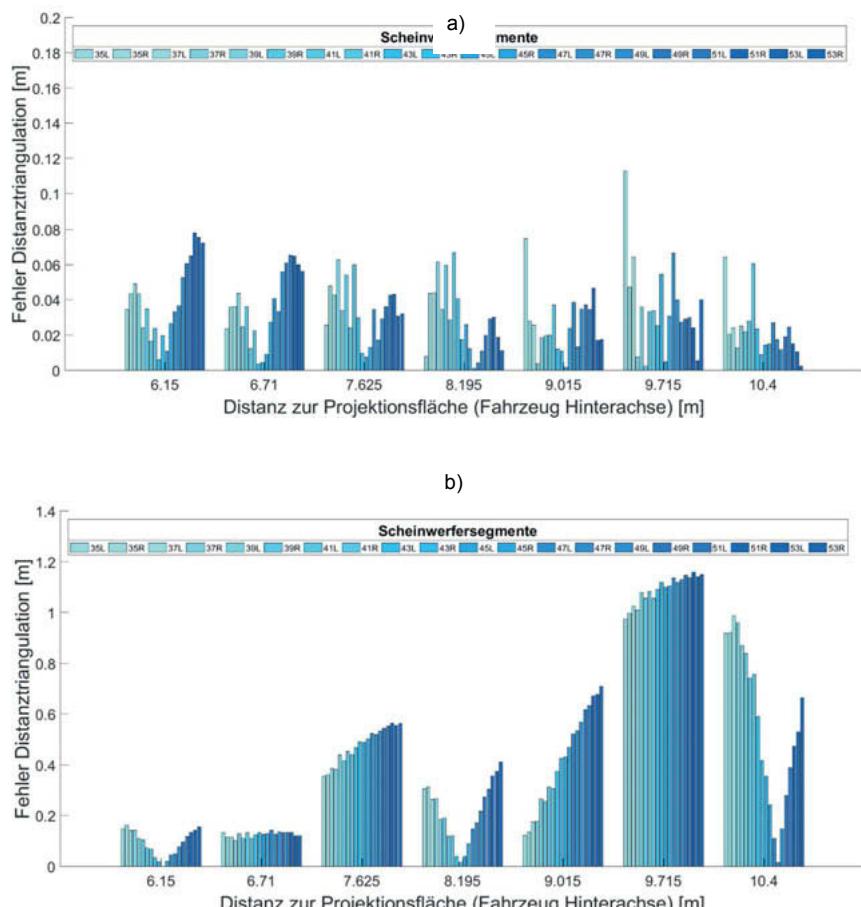


Bild 11: Darstellung des absoluten Triangulationsfehlers für variierende Projektionsflächen [6.15m,...10.4m] und den entsprechenden charakteristischen Merkmalen, welche auf Basis einer a) Schachbrettlichtverteilung sowie b) flickerbehafteten Abblendlichtverteilung extrahiert wurden.

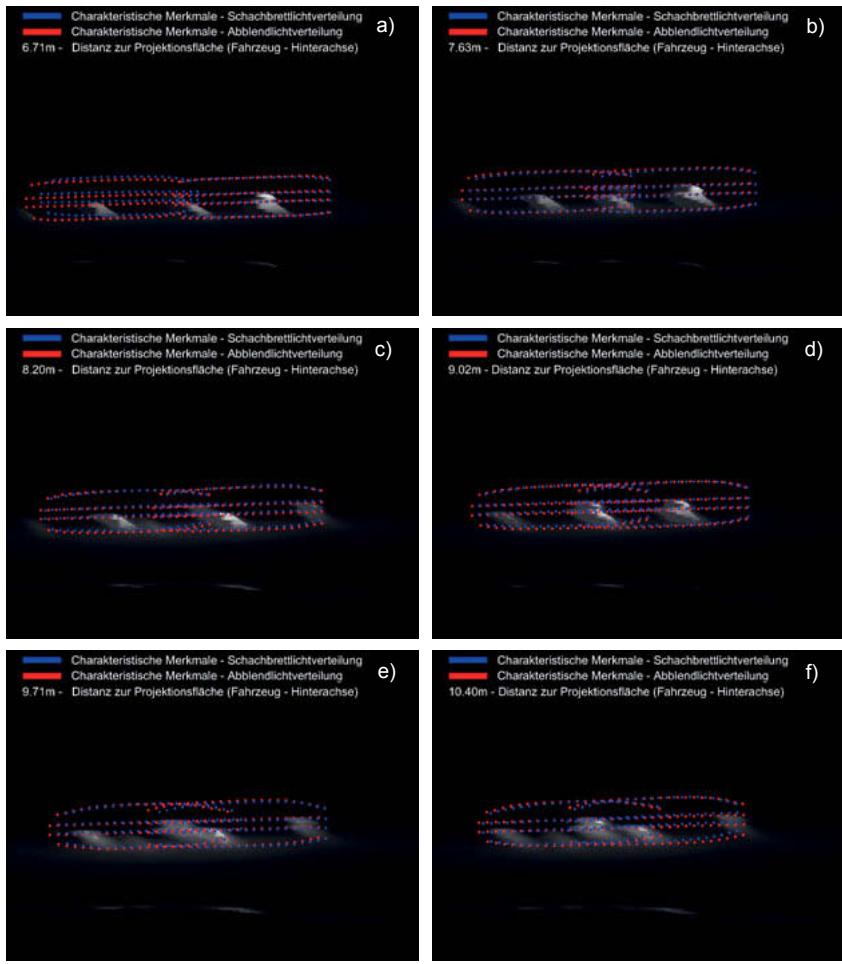


Bild 12: Darstellung der extrahierten charakteristischen Merkmale einer flickerbehafteten Abblendlichtverteilung (rot) und der Groundtruth Merkmale einer entsprechenden Schachbrettlichtverteilung (blau) für sieben definierte Distanzen von Fahrzeug Hinterachse zur Projektionsfläche [6.71m,...,10.40m]. Die mittlere Abweichung der extrahierten charakteristischen Merkmale zur Groundtruth beträgt für a) $\mu_{6,71}=14,19$ Pixel ($\sigma_{6,71m}=9,62$ Pixel), b) $\mu_{7,63m}=14,15$ Pixel ($\sigma_{7,63m}=10,10$ Pixel), c) $\mu_{8,20m}=14,37$ Pixel ($\sigma_{8,20m}=10,11$ Pixel), d) $\mu_{9,02m}=14,72$ Pixel ($\sigma_{9,02m}=10,60$ Pixel), e) $\mu_{9,72m}=14,50$ Pixel ($\sigma_{9,72m}=10,87$ Pixel), f) $\mu_{10,40m}=15,18$ Pixel ($\sigma_{10,40m}=11,21$ Pixel).

Anhand Bild 11 und 12 wird deutlich, dass eine Triangulation auf Basis der charakteristischen Merkmale einer Schachbrettlichtprojektion mit einem deutlich geringeren Triangulationsfehler einhergeht ($\mu_{6.15m-10.4m} = 0.015m$). Demgegenüber steigt der Triangulationsfehler auf Basis einer gelernten Merkmalsextraktion mittels einer flickerbehafteten Abblendlichtverteilung deutlich an ($\mu_{6.15m-10.4m} = 0.352 m$). Darüber hinaus wird in Bild 11 ebenso deutlich, dass der Triangulationsfehler charakteristische Verläufe annimmt. So ist der Fehler für einen Distanzwert von 6,71 m als nahezu konstant anzunehmen wohingegen er für Distanzen von 7,62 m und 9,72 m zu den äußeren Pixeln hin ansteigt. Die Ursachen dieser Verläufe werden anhand Bild 12 beziehungsweise dem Pixelfehler in Relation zu den Groundtruth Merkmalen der Schachbrettprojektion verdeutlicht. So zeigt sich in der Bild 12 für eine Distanz von 6.71 m ein konstanter Pixelfehler für die mittleren Eckpunkte. Werden hingegen die Pixel für eine Distanz von 7.62 m und 9.72 m betrachtet, ist eine Zunahme des Pixelfehlers zu den äußeren Pixeln ersichtlich. Dieser Fehler beeinflusst natürlich die nachgeschaltete Triangulation wodurch die Abweichungen in Bild 11 resultieren. Die Ursache der Abweichungen in der Merkmalsextraktion ist in den Trainingsdaten begründet. Diese wurden zumeist mit einer konstanten Scheinwerferfehlstellung akquiriert. Prädiktionen auf Abblendlichtverteilung mit variierender Fehlstellung resultieren in den zuvor diskutierten Pixelfehlern. Um dem entgegenzuwirken, wird der Datensatz erweitert und Abblendlicht- sowie Fernlichtverteilung mit variierenden Fehlstellung akquiriert.

8. Zusammenfassung

Vorgestellt wurde ein System, welches anhand einer Kamera-Scheinwerfer Fusion ein virtuelles Sensorsystem aufbaut. Dieses basiert auf dem wohlbekannten Funktionsprinzip der aktiven Triangulation und umfasst die Projektion charakteristischer Merkmale. Durch die Matrix Struktur heutiger Scheinwerfersysteme kann das Funktionsprinzip von bekannten Szenarien der Oberflächenmodellierung in die moderne Fahrzeugtechnik transferiert werden. Der Porsche Matrix Beam Scheinwerfer sowie die Fahrerassistenzkamera dienen hierbei als Stereokomponenten, welche im Zusammenspiel den Fahrzeuvorraum drei dimensional vermessen. Um das Konzept an zukünftige Serienanforderung anzupassen, wurde die Tiefenerkennung auf der Basis einer variablen Stereogeometrie sowie nicht perzeptiven Flickerprojektionen aufgebaut. Das vorliegende Paper hat hierfür die Grundlagen der aktiven Triangulation angeführt sowie eine Systemcharakterisierung dargestellt. Ferner wurden Funktionsbausteine beschrieben und für ausgewählte Module der aktuelle Entwicklungsstand dargelegt. Abschließend wurden Versuchsergebnisse angeführt, welche eine aktive Triangulation auf der Basis von sicht-

baren projizierten Mustern mit einer nicht perzeptiven Musterprojektion vergleichen. Zusammenfassend beschreibt das Paper mit der beschriebenen Methodik und den dargelegten Resultaten ein Konzept zur stetigen Erweiterung des Anwendungsbereiches heutiger und zukünftiger hochaufgelöster Scheinwerfersysteme.

9. Literurnachweise

- [1] Trommer,J.; Feil,T.; Weissenberger,D.; Fiederling,R.; Rayer,M.: New Possibilities with μAFS modules – The Path to High-Resolution Full-Matrix Headlamps: Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting, S.333-342, ISBN 978-3-8316-4672-2, 2017
- [2] Duhme,D.; Fischer,B.: Next Generation LCD Module: Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting, S.11-18, ISBN 978-3-8316-4672-2, 2017
- [3] Bhakta,V.; Ballard,B.: High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP technology: Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting, S.483-494, ISBN 978-3-8316-4482-7, 2015
- [4] Pfullmann,N.; Thiel,A.; Thamm,M; Plöger,R.; Kloppenburg,G.; Wolf,A.; Lachmayer,R.: From mechanical ADB systems to high resolution headlamps – new opportunities of novel headlight systems: Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting, S.357-365, ISBN 978-3-8316-4672-2, 2017
- [5] Berlitz,S.: How Digitalization and Automated Driving will revolutionize Automotive Lighting: Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting, S.549-558, ISBN 978-3-8316-4672-2, 2017
- [6] Moisel,J.: Requirements for Future High Resolution ADB Modules: Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting, S.549-558, ISBN 978-3-8316-4482-7, 2015
- [7] Salvi,J.; Pages,J.; Batlle,J.: Pattern Codification startegies in structured light systems: Pattern Recognition (37), S.827-849, 2004

- [8] Batlle,J.; Mouaddib,E; Salvi,J.: Recent Progress in Coded Structured Light as a Technique to Solve the Correspondence Problem: A Survey: Pattern Recognition (32), S.963-982, 1998
- [9] Siegwart,R.; Nourbakhsh,I.R.; Scaramuzza,D.:Autonomous Mobile Robots:MIT Press, ISBN 9780262015356, 2011
- [10] Schmalz,C.: Robuste 3D-Vermessung mit strukturierter Beleuchtung in Einzelbildern: Dissertation: Universität Erlangen-Nürnberg, 2011
- [11] Schneider,C.; Kunz,T.; Haas, J. C.: Automotive depth perception based on the interaction of multi pixel light projections and adaptive gabor kernels: Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting, S.667-676, ISBN 978-3-8316-4672-2, 2017

Akzeptanz von Registrierungsfehlern in einem Augmented Reality Head-up-Display

M.Sc. Vitalij Sadovitch, Dipl.-Inf. Michael Wittkämper,
Volkswagen AG, Wolfsburg

Kurzfassung

Augmented Reality Head-up-Displays (AR-HUD) ermöglichen eine kontaktanaloge Erweiterung der Fahrszene, indem virtuelle Anzeigehalte wie zum Beispiel Navigationshinweise perspektivisch korrekt im direkten Sichtfeld des Fahrers positioniert werden. Dadurch kann der Fahrer bei der Ausführung der Fahraufgabe unterstützt und zugleich kognitiv entlastet werden [1]. Präzisionseinschränkungen, die bei der Verortung der virtuellen Inhalte im dreidimensionalen Raum auftreten, werden als Registrierungsfehler bezeichnet. Diese können zu reduzierter subjektiver Systemakzeptanz und sinkender Fahrleistung führen [2]. Zur ganzheitlichen Betrachtung von Fehlerquellen und resultierender Fehlerkategorien in Augmented Reality Anwendungen wird eine neu entwickelte Taxonomie vorgestellt. Auf Basis dieser Taxonomie wurden relevante Fehlerarten für das AR-HUD identifiziert und in einer Filmstudie hinsichtlich ihres Einflusses auf die subjektive Systemakzeptanz untersucht. Die empirischen Ergebnisse ermöglichen eine Ableitung von Genauigkeitsanforderungen an die räumliche und zeitliche Registrierung virtueller Inhalte in einem AR-HUD.

1. Einleitung

Mit der steigenden Anzahl an Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen haben sich neue Anzeigetechnologien wie das Head-up-Display (HUD) in modernen Fahrzeugen etabliert [3]. Das HUD ermöglicht mittels einer Lichtreflexion an der Windschutzscheibe oder einer separaten Combiner-Scheibe die Darstellung von Informationen auf einer virtuellen Bildebene im direkten Sichtfeld des Fahrers [4]. Die fahrzenahe Positionierung der Anzeige und die vergrößerte Entfernung zum Fahreraugpunkt (ca. 2,50 m) bewirken im Vergleich zu herkömmlichen Head-down-Displays (z.B. Kombiinstrument) reduzierte Blickabwendungen von der Straße und einen geringeren Akkommodationsaufwand für die Augen [5]. Daher wird das HUD heutzutage von diversen Herstellern zur Darstellung von fahrtrelevanten Informationen (z.B. Geschwindigkeit, Navigationshinweise und Warnungen) eingesetzt.

Ein Augmented Reality Head-up-Display ermöglicht eine Erweiterung des konventionellen HUD um kontaktanalog verortete Informationen. Hierbei werden die virtuellen Inhalte per-

spektivisch korrekt in der Umgebung dargestellt, um den Fahrer durch die räumliche Nähe realer und virtueller Informationen kognitiv zu entlasten [1, 6] und ein gesteigertes Situationsbewusstsein zu fördern [7]. So können u.a. Gefahrenobjekte (z.B. Fußgänger oder Wild) [8] direkt im Sichtfeld markiert und Navigationshinweise (z.B. Pfeile) [2] auf der zu befahrenden Straße platziert werden. Hinsichtlich der Displaytechnologie erfordert eine Augmented Reality Anzeige jedoch eine größere Bildfläche von mindestens etwa $10^\circ \times 5^\circ$ [9] und eine Distanz der virtuellen Bildebene von mindestens 7,5 - 10 m [9]. Aktuelle Seriensysteme stellen das virtuelle Bild demgegenüber lediglich in einer Entfernung von etwa 2,50 m mit einem Field-of-View von ca. $6^\circ \times 2^\circ$ dar [10]. Außerdem sind präzise Kenntnisse der Umgebung als auch Position und Lage des Fahrzeuges, für eine ortskorrekte Überlagerung der Realität notwendig [1].

Aufgrund der eingeschränkten Präzision von Sensoren und Kartenmaterial sind beim heutigen Stand der Technik jedoch Einbußen bei der Genauigkeit der Überlagerung zu erwarten [7]. Zudem wirken sich auch Einflüsse der Fahrdynamik (insb. Nicken und Gieren) sowie Latenz auf die Genauigkeit aus [4]. Die dadurch entstehenden Diskrepanzen zwischen realen und virtuellen Objekten werden als Registrierungsfehler (engl.: registration error) bezeichnet [11] und sind durch das menschliche Auge bereits im Bereich weniger Bogenminuten ($1/60^\circ$) wahrnehmbar [12].

In einer Simulatorstudie mit Navigationsaufgaben konnten Pfannmüller et al. [2] eine erhöhte Anzahl an Abbiegefehlern und schlechtere subjektive Bewertungen der kontaktanalogen Anzeige beobachten, wenn die Navigationshinweise zwischen 3 und 6 m von der Idealposition abwichen. Ebenso wurden in einer Realfahrtstudie negative Auswirkungen von auftretenden Registrierungsfehlern auf die subjektive Bewertung einer kontaktanalogen Navigationsanzeige gezeigt [13]. Jachens et al. postulieren auf Basis theoretischer Überlegungen Genauigkeitsanforderungen von $0,06^\circ$ [9].

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass Darstellungsungenauigkeiten im AR-HUD nachweislich Auswirkungen auf subjektive Systemakzeptanz und Fahrleistung haben. Jedoch fehlen bisher eine differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Arten von Fehlern und empirische Befunde zu entsprechenden Anforderungen an die Registrierungsgenauigkeit.

2. Taxonomie von Registrierungsfehlern

Die geometrische Registrierung, also eine perspektivisch korrekte Verortung virtueller Inhalte in der realen Umgebung, ist eine Grundvoraussetzung und zugleich große technische Herausforderung für alle Augmented Reality Anwendungen. Um zu verstehen, welche Arten von Registrierungsfehlern in einem AR-HUD auftreten können, ist eine ganzheitliche Betrachtung

der Fehlerentstehung erforderlich. In der Literatur finden sich hierfür unterschiedliche Kategorisierungen von Registrierungsfehlern. Holloway [11] nennt verschiedene Fehlerquellen (Sensormessfehler, Latenz etc.) und Systemphasen von der Erfassung der Umgebung über das Headtracking bis hin zur Bildausgabe und -wahrnehmung durch den Nutzer. Azuma [12] unterscheidet wiederum zwischen translatorischen Abweichungen entlang der Richtungsachsen X, Y, Z relativ zum Nutzerblickpunkt (Positionsfehler) und rotatorischen Abweichungen um die Achsen herum (Orientierungsfehler). Zudem können Fehlerursachen statischer oder dynamischer Natur sein. Während dynamische Fehler (z.B. Latenz) erst bei Veränderung der Position bzw. Orientierung des Nutzers oder anderer Objekte in der Szene sichtbar werden, treten statische Fehler (z.B. Sensormessfehler) auch in konstanten Szenen durch unpräzise Augmentierung in Erscheinung [12]. Livingston et al. [14] beschreiben Registrierungsfehler hingegen als statisch, wenn die Diskrepanz zwischen virtuellem und realem Objekt über die Zeit konstant bleibt. Eine sichtbare Relativbewegung zwischen realen und virtuellen Objekt wird von den Autoren als dynamisch bezeichnet.

Die Überlegungen der zitierten Autoren wurden in einer neuen Taxonomie (siehe Bild 1) aggregiert und ergänzt, um eine ganzheitliche Betrachtung der Problemstellung zu ermöglichen. Die Taxonomie besteht aus zwei Ebenen. Die erste Ebene beschreibt die Fehlerquellen, während die daraus resultierenden Fehlerkategorien in Ebene 2 abgebildet sind.

2.1 Taxonomie Ebene 1: Fehlerquellen

In der Ebene der Fehlerquellen werden Fehlerursachen sowie wesentliche Systemkomponenten den einzelnen aufeinander aufbauenden Prozessschritten zugeordnet. In Anlehnung an [11, 15] umfasst die Taxonomie folgende Prozessschritte und Systemkomponenten:

Erfassung: Im ersten Prozessschritt wird die mit virtuellen Inhalten zu erweiternde Umgebung erfasst und in Form einer Karte digitalisiert. Relevante Attribute für die Augmentierung im Straßenverkehr können u.a. das Straßennetz mit Fahrstreifenmarkierungen und Höhenprofil (3D-Karte) sowie dauerhafte und volatile (flüchtige) Objekte wie beispielsweise permanente und temporäre Verkehrszeichen sein. Die Erfassung erfolgt bereits vor Fahrtantritt mittels spezieller Sensorik durch Dritte (z.B. Kartenhersteller).

Tracking: In diesem Prozessschritt werden die Position und Lage des Egofahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer als auch des Fahrers innerhalb des Egofahrzeugs über die Zeit fortlaufend aktualisiert. Dazu ist die Systemkomponente Ego-Fahrzeug mit der digitalen Kar-

te sowie Eigen- und Umfeldsensorik ausgestattet und kann darüber hinaus Daten über Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation erhalten.

Bildgenerierung: Die 3D-Engine als Systemkomponente enthält u.a. den Szenengraph, mittels dessen geometrische Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Systemkomponenten (z.B. HUD, Sensoren, Fahrerblickpunkt) anhand deren Koordinatensystemen kontinuierlich abgebildet werden. Durch Transformation dieser Koordinatensysteme werden im 3D-Renderer die darzustellenden Inhalte in der Szene registriert und aus Sicht einer virtuellen Kamera gerendert.

Bilddarstellung: Das gerenderte Bild wird mittels Head-up-Display auf einer virtuellen Bildebene dargestellt. Das HUD beinhaltet eine Bilderzeugungseinheit und das optische System bestehend aus Spiegeln und einem Combiner (z.B. Windschutzscheibe) [4].

Wahrnehmung & Verarbeitung: Die dargestellten AR-Anzeigehalte werden abschließend vom Fahrer aus einem bestimmten Blickpunkt visuell wahrgenommen und kognitiv verarbeitet. Während sich der Fahrerblickpunkt auf die objektive Registrierungsgenauigkeit auswirkt, beeinflusst die kognitive Informationsverarbeitung lediglich die subjektiv empfundene Genauigkeit. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Registrierungsfehler vom Nutzer wahrgenommen und als störend empfunden wird, ist abhängig von zur Verfügung stehender Aufmerksamkeitsressourcen sowie Top-Down (z.B. Erwartung) und Bottom-Up (z.B. Salienz) Mechanismen der Aufmerksamkeitssteuerung (siehe z.B. SEEV-Modell [16]).

In Bild 1 wird außerdem deutlich, dass jedem Prozessschritt Fehlerquellen zugeordnet werden können. So führen Ungenauigkeiten bei der Erfassung der Umgebung zu Datensatzfehlern in der digitalen Karte. Diese entstehen identisch zu den Trackingfehlern durch fehlerhafte Kalibrierung der Sensoren und Messungenauigkeiten [11]. In der Phase der Bildgenerierung können Modell- und Renderingfehler bei der Modellierung des Szenengraphs und der Bildberechnung entstehen. Bei der Bilddarstellung treten optische Abbildungsfehler auf, die jedoch zum Teil durch ein softwareseitiges Warping kompensiert werden können [4]. Bei monokularen Head-up-Displays ist außerdem nur eine eingeschränkte Tiefenauflösung realisierbar, da keine stereoskopischen Tiefenkriterien abgebildet werden können. Abweichungen des tatsächlichen Fahrerblickpunktes vom modellierten Blickpunkt führen ferner zu Betrachtungsfehlern bei der visuellen Wahrnehmung der Anzeige. Darüber hinaus tritt beim Tracking als auch der Bildgenerierung und -darstellung Latenz auf.

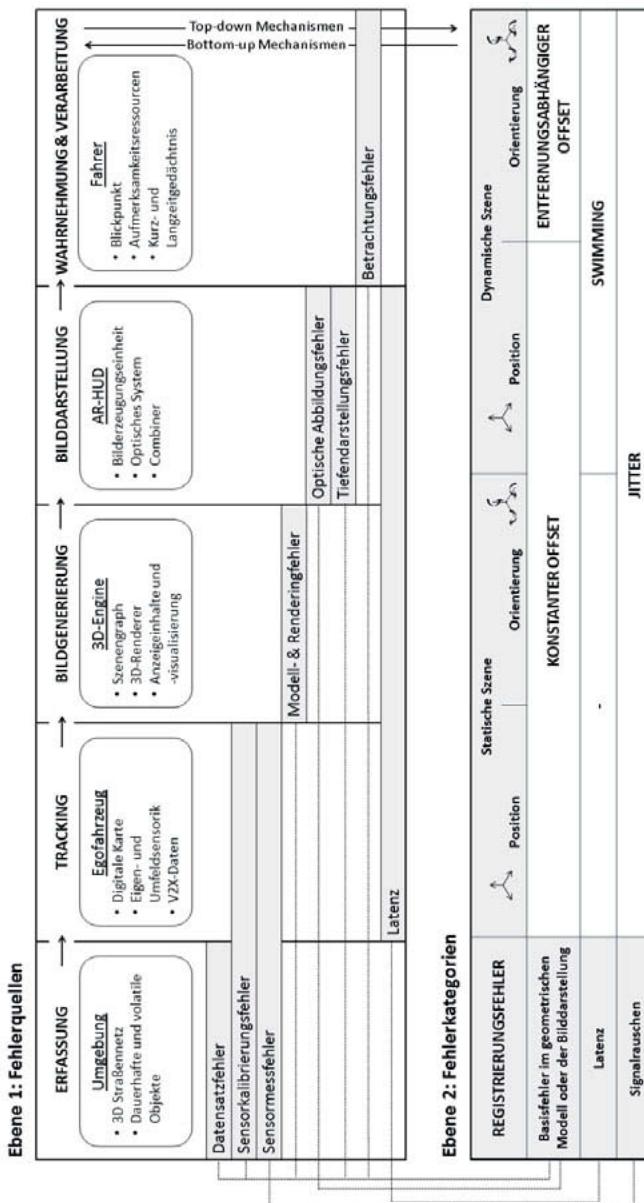


Bild 1: Taxonomie von Registrierungsfehlern in einem AR-HUD (eigene Darstellung).

2.2 Taxonomie Ebene 2: Fehlerkategorien

Die zweite Ebene der Taxonomie bildet die Implikationen der Fehlerentstehung auf die möglichen Fehlerkategorien ab (vgl. Bild 1). Die beschriebenen Fehlerquellen summieren sich über den gesamten Augmentierungsprozess auf und lassen sich zu drei resultierenden Fehlergruppen zusammenfassen: Basisfehler im geometrischen Modell oder der Bilddarstellung, Latenz und Signalrauschen. Diese Fehlergruppen können sich sowohl in statischen als auch dynamischen Szenen in Form von Positions- und Orientierungsfehlern ausprägen [12]. Dies meint eine translatorische oder rotatorische Abweichung der Augmentierung in jeweils bis zu drei Freiheitsgraden in Relation zum Fahrerblickpunkt. In Abbildung 2 sind die sechs geometrisch möglichen Fehlerausprägungen dargestellt.



Bild 2: Positions- und Orientierungsfehler in Relation zum Fahrerblickpunkt
(eigene Darstellung).

Eine Kombination der möglichen Positions- und Orientierungsfehler, die auf Basis der drei Fehlergruppen in statischen und dynamischen Situationen auftreten können, führt zu vier differenzierbaren Fehlerkategorien (vgl. Bild 1).

Konstanter Offset: In einer statischen Szene werden Basisfehler als konstante Abweichung des virtuellen Objektes von seinem Registrierungsort permanent sichtbar. Handelt es sich dabei um eine Positionsabweichung, bleibt die Diskrepanz auch in einer dynamischen Szene konstant.

Entfernungsabhängiger Offset: Handelt es sich bei einem Basisfehler um einen Orientierungsfehler, so ist die Größe der Abweichung variabel in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Nutzerblickpunkt und virtuellem Objekt. Durch die kontinuierliche Änderung der Ab-

weichungsgröße, wird in einer dynamischen Szene eine permanente Abweichung mit einer fließenden Bewegung bei Entfernungsänderungen sichtbar.

Swimming: Wird der Registrierungsfehler durch Latenz verursacht, ist ebenfalls eine variable Abweichungsgröße in Form einer fließenden Bewegung zu beobachten, die jedoch nicht in Abhängigkeit zur Entfernung, sondern der Relativgeschwindigkeit entsteht. In einer statischen Szene werden die Auswirkungen von Latenz dementsprechend nicht sichtbar, sodass der Fehler nur temporär bei Veränderungen der Egoposition oder der Szene auftritt.

Jitter: Bei einem durch Sensorrauschen (Noise) verursachten Registrierungsfehler wird ebenfalls keine konstante, sondern eine variable Abweichung sichtbar. Die Abweichungsänderung ist jedoch willkürlich und erscheint sprunghaft statt fließend.

3. Methodik

Die vorgestellte Taxonomie fasst auf theoretischer Basis zusammen, welche Arten von Registrierungsfehlern grundsätzlich in Augmented Reality Anwendungen auftreten können. In einer darauf aufbauenden Probandenstudie wurde an konkreten Beispielen der Einfluss einzelner Fehlerarten auf die subjektive Akzeptanz eines Augmented Reality Head-up-Displays untersucht.

3.1 Studiensempling

Mit dem Ziel eine visuell möglichst realistische Wirkung der Augmentierung zu realisieren und gleichzeitig das Auftreten von Registrierungsfehlern präzise kontrollieren zu können, fiel die Entscheidung auf eine Kombination aus Realfahrt- und Simulatorstudie in Form einer Filmstudie. In einem Prüfgelände der Volkswagen AG wurde hierfür Videomaterial aufgezeichnet, indem eine professionelle Kamera mit Bildstabilisierungsfunktion derart an der Fahrertür des verwendeten Versuchsträgers angebracht wurde, dass das AR-HUD aus Fahrerperspektive während der Fahrt abgefilmt werden konnte. Das Head-up-Display hatte eine Bildgröße von $10^\circ \times 4,5^\circ$ und eine virtuelle Bilddistanz von etwa 14 m. Das Videomaterial wurde mit einem Field-of-View von 60° aufgezeichnet und den Probanden bei der Versuchsdurchführung auf einer 3,85 m breiten Leinwand in einer Entfernung von 3,34 m im Fahrimulator dargestellt (vgl. Bild 3A). Das Bild wurde in der vertikalen Achse so positioniert, dass der Horizont auf 1,18 m und somit etwa auf Augenhöhe der Versuchspersonen lag. Diese saßen dabei in einem Fahrzeugmockup und hatten die Aufgabe sich das Videomaterial anzuschauen und auftretende Registrierungsfehler zu bewerten.



Bild 3: A) Versuchsaufbau im Fahrsimulator, B) Navigationshinweis, C) Objektwarnung.

Jeder Filmausschnitt dauerte etwa 90 Sekunden und bestand aus vier Szenarien, die ohne Eingriff des Probanden durchfahren wurden. In zwei davon waren kontaktanaloge Navigationshinweise durch auf der Fahrbahn liegende, großflächige blaue Teppiche visualisiert. Neben der Rechtsabbiegung (vgl. Bild 3B) wurde außerdem eine Engstelle durchfahren. Die beiden anderen Szenarien beinhalteten Objektwarnungen, in denen ein Schaumstoffwürfel am Straßenrand (vgl. Bild 3C) und ein Schlagloch in der Fahrbahn mit einem orangefarbenen Rahmen markiert wurden. Die Versuchspersonen bewerteten die Filmausschnitte auf einem Fragebogen, nachdem sie diese zuvor jeweils zweimal gesehen hatten.

3.2 Unabhängige und abhängige Variablen

Die Registrierungsgüte wurde zwischen den Fahrten durch die beiden Within-Subject-Faktoren Fehlerart (5 Stufen) und Fehlerausprägung (3 Stufen) variiert. Die ausgewählten Fehlerarten repräsentierten die in der Taxonomie definierten Fehlerkategorien (vgl. Bild1).

Fehlerarten

Da es sich bei den Fahrten um dynamische Szenen handelte, wurde der konstante Offset mittels eines lateralen Positionsfehlers dargestellt (siehe Taxonomie). Positionsfehler sind bei einem AR-HUD im Wesentlichen auf die Lokalisierung des Egofahrzeugs durch (D)GPS (Differential Global Positioning System) zurückzuführen, das lediglich eine Genauigkeit von maximal 2 m ermöglicht [17]. Besonders stark wahrnehmbar sind die Folgen in der lateralen Ausrichtung entlang der Y-Achse des Fahrzeugs, während longitudinale Verschiebungen dieser Größenordnung in X-Richtung bei den verwendeten Szenarien kaum erkennbar waren und deshalb nicht untersucht wurden. Auch in Z-Richtung wurde die vertikale Ausprägung

dieser Fehlerart nicht berücksichtigt, da der Abstand des Fahrzeuges zur Fahrbahn stets als annähernd konstant angenommen werden kann.

Der entfernungsabhängige Offset wurde durch zwei Arten von Orientierungsfehlern (Yaw und Pitch) repräsentiert. Laut [4] haben diese Fehlerarten bei Darstellungen im Head-up-Display besonders hohe Auswirkungen auf die Lage des virtuellen Bildes im Raum. Roll-Orientierungsfehler wurden hingegen bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

Das temporär auftretende Swimming wurde durch eine verzögerte Bildausgabe (Latenz) realisiert. Die Umsetzung des Jitters erfolgte, indem die virtuelle Kamera des 3D-Renderers diskrete Positionssprünge in X, Y und Z-Richtung machte. Für die Sprunggröße jedes einzelnen Frames wurde ein Moving Average von einzelnen zufälligen Sprüngen bis zu 0,5 m über ein variables Zeitfenster berechnet. Je kleiner dabei das gewählte Zeitfenster war, umso stärker erschienen die Sprünge.

Fehlerausprägungen

Jede der fünf Fehlerarten wurde in drei Ausprägungsstärken - einer Nullausprägung (Baseline), einer schwachen und einer starken Ausprägung - realisiert. Dabei entsprach die Nullausprägung einer fehlerfreien Anzeige und war somit in allen Bedingungen identisch. Diese Bedingung wurde von jeder Versuchsperson aus ökonomischen Gründen nur einmalig, anstatt fünfmal bewertet. Die beiden anderen Ausprägungsstufen wurden für den jeweiligen Fehler separat so gewählt, dass die schwache Ausprägung bereits im mühelos wahrnehmbaren Bereich und die starke Fehlerausprägung noch immer im realistischen Bereich lagen (vgl. Tabelle 1). Auch diese Bedingungen wurden jeweils nur einmal pro Fehlerart von den Versuchspersonen bewertet.

Tabelle 1: Fehlerarten und Fehlerausprägungen.

Fehlerkategorie	Fehlerart	Ausprägung 1	Ausprägung 2
Konstanter Offset	Laterale Position	0,50 m	1,00 m
Entfernungsabhängiger Offset	Yaw-Orientierung	0,75°	1,50°
Entfernungsabhängiger Offset	Pitch-Orientierung	0,50°	0,75°
Swimming	Latenz	70 ms	140 ms
Jitter	Noise	Moving Average über 140 ms	Moving Average über 70 ms

Die Erhebung der Systemakzeptanz erfolgte mittels der validierten Van der Laan-Skala (VdL-Skala) [18], welche aus 9 semantischen Differentialen besteht. Die Wortpaare stellen die jeweiligen Enden einer fünfstufigen Likert-Skala (-2 bis 2) dar, mit der die Versuchspersonen das System bei vorliegender Fehlerausprägung bewerteten. Die Items lassen sich zu zwei Dimensionen gruppieren. Während die erste Dimension die empfundene Nützlichkeit (Usefulness) des Systems adressiert, beschreibt die zweite die subjektive Zufriedenheit (Satisfaction). Des Weiteren wurden die Versuchspersonen gebeten beim Anschauen der Filmsequenzen ihre Gedanken laut zu äußern.

4. Ergebnisse

Von den 61 Studienteilnehmern konnten 56 vollständige Datensätze ausgewertet werden. 21 Versuchspersonen waren weiblich und 35 männlich. Alle Teilnehmer waren Mitarbeiter der Volkswagen AG und das durchschnittliche Alter betrug 33 Jahre ($SD^1 = 9,16$). Die Ergebnisse der Akzeptanzbewertung sind in Bild 4 grafisch dargestellt.

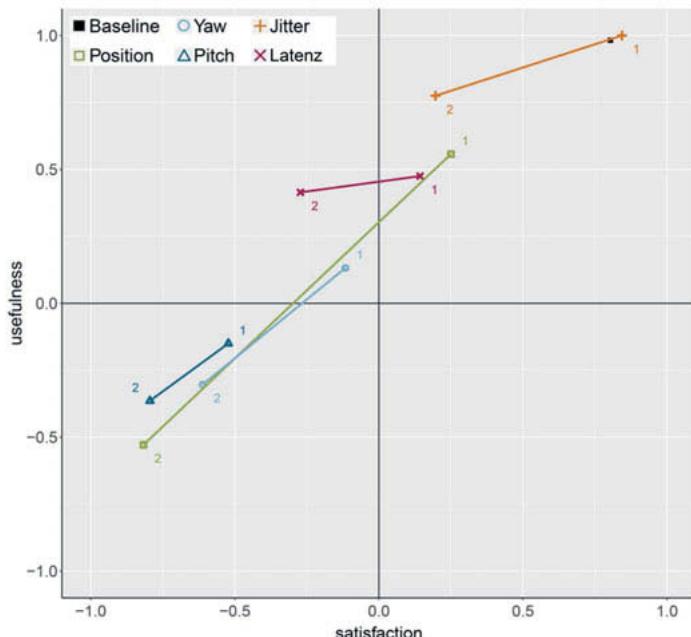


Bild 4: Ergebnisse der Akzeptanzbewertung nach [18].

¹ Standardabweichung (engl.: standard deviation)

Über alle Fehlerarten hinweg ist ein eindeutiger Abwärtstrend in der Bewertung zwischen den Fehlerausprägungen zu sehen. Jitter und Swimming wurden insgesamt besser bewertet als die konstanten und entfernungsabhängigen Offsets. Die größte Auswirkung zeigte dabei der Pitch-Orientierungsfehler. Die Kurve des Latenzfehlers fällt außerdem auffallend flach ab. Eine höhere Ausprägung des temporären Fehlers hat somit die Zufriedenheit gemindert, jedoch nur geringe Auswirkungen auf die empfundene Nützlichkeit gehabt. Permanent sichtbare Fehler beeinflussten beide Dimensionen hingegen gleichermaßen.

Die Ergebnisse wurden mittels einer Regressionsanalyse auf Basis eines linearen Strukturgleichungsmodells hinsichtlich durchschnittlicher und bedingter Effekte statistisch analysiert. Folgendes Regressionsmodell wurde für die Berechnungen eines Wald-Tests ($\alpha = .05$) mit dem grafischen Interface *EffectLiteR* [19] verwendet:

$$\begin{aligned} E(Y|X, K) &= g_0(K) + g_1(K) * I_{X=1} + g_2(K) * I_{X=2} \\ g_0(K) &= g_{000} + g_{010} * I_{K=1} + g_{020} * I_{K=2} + g_{030} * I_{K=3} + g_{040} * I_{K=4} \\ g_1(K) &= (g_{100} + g_{110} * I_{K=1} + g_{120} * I_{K=2} + g_{130} * I_{K=3} + g_{140} * I_{K=4}) * I_{X=1} \\ g_2(K) &= (g_{200} + g_{210} * I_{K=1} + g_{220} * I_{K=2} + g_{230} * I_{K=3} + g_{240} * I_{K=4}) * I_{X=2} \\ \text{mit } Y &= \text{Outcomevariable: Satisfaction / Usefulness,} \\ X &= \text{Treatmentvariable: Fehlerausprägung (0 = Baseline, 1 = Schwach, 2 = Stark),} \\ K &= \text{Kovariate: Fehlerart (0 = Jitter, 1 = Latenz, 2 = Pitch, 3 = Position, 4 = Yaw).} \end{aligned}$$

4.1 Satisfaction

Es wurde ein durchschnittlicher Effekt des Treatments (Fehlerausprägung) auf die Bewertung der Satisfaction beobachtet ($\chi^2 = 713$, $df = 2$, $p = .000$). Sowohl die erste ($p = .000$, $ES = -0.90$) als auch die zweite Fehlerausprägung ($p = .000$, $ES = -1.67$) zeigten im Durchschnitt einen großen signifikanten Effekt ($ES^2 > |0.8|$). Ebenso wies die Kovariate (Fehlerart) einen signifikanten durchschnittlichen Effekt ($\chi^2 = 857$, $df = 10$, $p = .000$) auf die Akzeptanzbewertung auf.

Neben den durchschnittlichen Effekten zeigte sich eine signifikante Interaktion ($\chi^2 = 132$, $df = 8$, $p = .000$) zwischen Fehlerausprägung und Fehlerart. Jitter hatte als einzige Fehlerart in der ersten Fehlerausprägung keinen Effekt auf die empfundene Zufriedenheit ($p = .662$). Der Positionsfehler (konstanter Offset) hingegen erzielte in der ersten Fehlerausprägung einen moderaten signifikanten Effekt ($ES = -0.73$) und die restlichen Fehlerarten sogar

² Effektstärke (engl.: effect size)

große Effekte (Latenz: $ES = -0.87$, Pitch: $ES = -1.75$, Yaw: $ES = -1.21$). Unter der zweiten Fehlerausprägung zeigten alle Fehlerarten einen großen Effekt ($ES \geq 0.8$) auf die Satisfaction (Jitter: $ES = -0.80$, Latenz: $ES = -1.42$, Yaw: $ES = -1.87$, Pitch: $ES = -2.11$, Offset: $ES = -2.14$).

4.2 Usefulness

Sowohl die Fehlerausprägung ($\chi^2 = 649, df = 2, p = .000$) als auch die Fehlerart ($\chi^2 = 807, df = 10, p = .000$) wirkten sich signifikant auf die empfundene Nützlichkeit des AR-HUD aus. Zudem konnte eine Interaktion zwischen den beiden Variablen festgestellt werden ($\chi^2 = 240, df = 8, p = .000$).

Die bedingten Effekte der Usefulness-Bewertung unterschieden sich in nur zwei Aspekten von den Ergebnissen der Satisfaction-Dimension. So wies Jitter in der ersten Fehlerausprägung keinen Effekt ($p = .811$) und in der zweiten Ausprägung nur einen kleinen Effekt ($p = .000, ES = -0.35$) statt eines großen Effektes auf. Zudem wurde erneut nur ein moderater Effekt des konstanten Offsets in der ersten und ein starker in der zweiten Fehlerausprägung beobachtet, während die restlichen Fehlerarten in beiden Ausprägungen starke Effekte hatten. Jedoch fällt auf, dass der negative Effekt von Latenz (Swimming) lediglich um $ES = 0.10$ zunimmt. Bei den restlichen Fehlerarten sind die Differenzen zwischen den beiden Ausprägungen hingegen allesamt höher (Position: $ES = -1.81$, Yaw: $ES = -0.73$, Pitch: $ES = 0.36$).

4.3 Ableitung von Genauigkeitsanforderungen

Die Studienergebnisse ermöglichen eine Ableitung von Genauigkeitsanforderungen für die Registrierung virtueller Inhalte im Augmented Reality Head-up-Display. Hierzu wurden die berichteten VdL-Ergebnisse in ein binäres Format (0: Ablehnung des Systems, 1: Akzeptanz des Systems) kodiert, um auf dieser Grundlage binäre logistische Regressionen zur Aufstellung separater Wahrscheinlichkeitsfunktionen³ für die Akzeptanz verschiedener Fehlerarten zu berechnen. Jitter wurde dabei nicht weiter berücksichtigt, da sich die Parameter aufgrund der durchweg positiven Bewertungen nicht für diese Methode eigneten.⁴

³ Nach $f(x) = \frac{1}{1+e^{-(mx+b)}}$, mit

Position: $m_{\text{satisfaction}} = -3.24, b_{\text{satisfaction}} = 2.17, m_{\text{usefulness}} = -5.41, b_{\text{usefulness}} = 4.52$

Yaw: $m_{\text{satisfaction}} = -1.55, b_{\text{satisfaction}} = 1.39, m_{\text{usefulness}} = -2.02, b_{\text{usefulness}} = 2.38$

Pitch: $m_{\text{satisfaction}} = -4.07, b_{\text{satisfaction}} = 1.53, m_{\text{usefulness}} = -5.41, b_{\text{usefulness}} = 3.04$

Latenz: $m_{\text{satisfaction}} = -0.01, b_{\text{satisfaction}} = 1.48, m_{\text{usefulness}} = -0.01, b_{\text{usefulness}} = 3.10$

⁴ Hosmer Lemeshow Goodness of Fit Test: $p_{\text{usefulness}} = 1.000, p_{\text{satisfaction}} = 0.180$

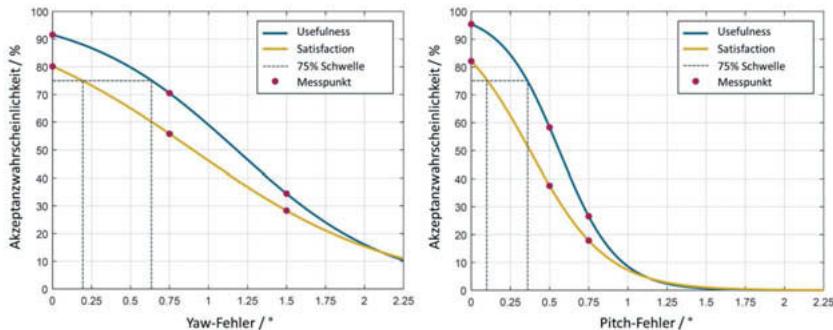


Bild 5: Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Akzeptanz von Yaw- und Pitch-Fehlern.

In Bild 5 sind die Funktionen der entfernungsabhängigen Offsets Yaw und Pitch aufgeführt. Diese Fehlerkategorie zeigte den stärksten Einfluss auf die Akzeptanzbewertung des Systems. Eine akzeptable Nützlichkeit des Systems wird bei geringeren Genauigkeiten erzielt als eine akzeptable Zufriedenheit. Jedoch wird selbst bei der Nullausprägung der Fehler keine 100 prozentige Wahrscheinlichkeit einer Systemakzeptanz erreicht. Ursache dafür ist vermutlich die Umsetzung der Filmaufnahmen. So wurden sehr simple Visualisierungen verwendet und eine geringe, aber wahrnehmbare Latenz ließ sich nicht vollständig vermeiden. Die Versuchspersonen waren außerdem im direkten Vergleich toleranter gegenüber Yaw- als Pitch-Orientierungsfehlern.

Zur Ableitung von Genauigkeitsanforderungen kann ein Schwellwert für die Akzeptanzwahrscheinlichkeit definiert werden, der in der Darstellung exemplarisch bei 75 % liegt (vgl. Bild 5). Nach dem konservativeren Maß Satisfaction ergeben sich auf diese Weise maximal akzeptierbare Orientierungsfehler von Yaw = 0,19° und Pitch = 0,10°. Ferner wurden mit dieser Methodik Grenzwerte von 33 cm für eine konstante laterale Positionsabweichung und 35 ms als maximale Latenz abgeleitet.

5. Zusammenfassung und Diskussion

Auftretende Registrierungsfehler stellen eine wesentliche Problemstellung bei der Umsetzung von Augmented Reality Anwendungen dar. Im Fahrkontext konnten Auswirkungen auf die subjektive Systemakzeptanz sowie die Fahrleistung beobachtet werden [2, 4, 13]. Bisher fehlt jedoch eine differenzierte Betrachtung verschiedener Fehlerarten. Aus diesem Grund wurde eine ganzheitliche Taxonomie zur Beschreibung von Fehlerquellen und Fehlerkategorien entwickelt. Am Beispiel einzelner Fehlerarten, die in einem AR-HUD auftreten, wurden

die vier Fehlerkategorien (konstanter sowie entfernungsabhängiger Offset, Swimming und Jitter) hinsichtlich ihres Einflusses auf die subjektive Systemakzeptanz in einer Filmstudie untersucht.

Eine für den Fahrer sichtbare Erhöhung der Fehlerausprägung führte stets zu einer signifikanten Reduktion der subjektiven Akzeptanz. Die Fehlerkategorie Jitter hatte dabei den geringsten Effekt. Dies widerspricht der Tatsache, dass die visuelle Wahrnehmung des Menschen sehr sensibel für schnelle Bewegungen im Sichtfeld ist, da evolutionsbedingt dadurch Orientierungsreaktionen ausgelöst werden [20]. Im Gegensatz zu anderen Augmented Reality Untersuchungen mit Head-mounted-Displays, in denen Jitter durchaus als störend empfunden wurde [14], scheinen Fahrzeugaufbaubewegungen und Vibrationen eine kompensierende Wirkung auf die Wahrnehmung von Jitter im AR-HUD gehabt zu haben. Des Weiteren wirkte sich die Fehlerkategorie Swimming primär auf die empfundene Zufriedenheit und somit eher die ästhetische Wirkung der Anzeige aus. Offsets hinsichtlich der lateralen Position (konstant) sowie Yaw- und Pitch-Orientierung (entfernungsabhängig) hatten zusätzlich auch einen starken Einfluss auf die empfundene Nützlichkeit und somit funktionale Wirkung der Anzeige. Die freien Kommentare der Versuchspersonen lieferten eine plausible Erklärung. So verursachten permanent sichtbare Fehler Interpretationsschwierigkeiten, während die Augmentierung bei nur temporär auftretenden Swimming-Effekten trotz des Fehlers eindeutig war. Die ästhetische Wirkung litt jedoch unter beiden Arten von Registrierungsfehlern.

Orientierungsfehler wurden negativer bewertet als Positionsfehler. Die Taxonomie zeigt, dass Positionsfehler in einem konstanten Offset sichtbar werden, während der Offset bei Orientierungsfehlern entfernungsabhängig ist. Damit vereint die Kategorie die negative Wirkung einer permanent sichtbaren Abweichung mit zusätzlichen Störbewegungen durch Abweichungsänderungen. Yaw-Orientierungsfehler wurden außerdem eher akzeptiert als Pitch-Fehler. Dies kann daran liegen, dass rotatorische Abweichungen zu größeren absoluten Diskrepanzen in der longitudinalen als lateralen Ausrichtung führen. So wird eine auf dem Boden liegende Augmentierung in 50 m Entfernung mit einem Orientierungsfehler von -0,1°, lateral um 0,09 m und longitudinal sogar um 4 m verschoben wahrgenommen (siehe hierzu auch [4]). Zudem bewirken Pitch-Fehler, durch die Anhebung der virtuellen Anzeige, bei großflächigen Darstellungen (z.B. Navigationsteppich) eine Verdeckung der Umgebung.

Auf Basis der Akzeptanzbewertungen wurden mithilfe einer binären logistischen Regression Genauigkeitsgrenzwerte definiert, die in einem AR-HUD erzielt werden sollten, um eine positive Nutzerakzeptanz zu erreichen. Demnach sollten laterale Positionsfehler nicht höher als 33 cm und die Latenz maximal 35 ms betragen. Für rotatorische Fehlerarten wurden Grenz-

werte von $0,19^\circ$ (Yaw) und $0,10^\circ$ (Pitch) abgeleitet. Diese empirisch ermittelten Grenzwerte entsprechen ungefähr den analytisch hergeleiteten Anforderungen von Jachens et al. ($\sim 0,06^\circ$ und $< 33 \text{ ms}$) [9].

6. Ausblick

Aus ökonomischen Gründen konnten in dieser Studie die Akzeptanzbewertungen nur für jeweils drei Messpunkte pro Fehlerart erhoben werden. Für eine höhere Validität bei der Ableitung von Genauigkeitsanforderungen ist zukünftig eine höhere Anzahl anzustreben. Zudem wäre es sinnvoll zu erheben, welchen Einfluss der Beanspruchungsgrad auf die subjektive Bewertung hat. So konnten sich die Probanden in der vorliegenden Studie ausschließlich auf die Bewertung der Anzeige konzentrieren, während in einer realen Fahrt kognitive Ressourcen mit konkurrierenden Aufgaben geteilt werden müssen. Die empfundene Genauigkeit wird außerdem auch von den verwendeten Anzeigehalten und -visualisierungen beeinflusst [9]. Daher ist es sinnvoll potenziell fehlertolerante Gestaltungsmaßnahmen zu konzipieren und zu untersuchen, inwiefern die Art der Visualisierung zur Erhöhung der empfundenen Registrierungsgenauigkeit beitragen kann.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Gabbard, J. L., Fitch, M., Kim, H.: Behind the Glass: Driver Challenges and Opportunities for AR Automotive Applications. Proceedings of the IEEE, 102 (2014) 2, S.124-136.
- [2] Pfannmüller, L., Walter, M., Bengler, K.: Lead me the right way?! The impact of position accuracy of augmented reality navigation arrows in a contact analog head-up display on driving performance, workload and usability. 19th Triennial Congress of the IEA. Melbourne, Australia 2015
- [3] Abel, H. B., Blume, H. J., Skabrond, K.: Integration der Anzeigegeräte ins Fahrzeug. In: Gevatter, H. J.; Grünhaupt, U. (Hrsg.): Handbuch der Mess- und Automatisierungs-technik im Automobil. Berlin: Springer 2006, S. 387-389.
- [4] Schneid, M.: Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug. TU München Dissertation, 2009.
- [5] Gish, K., Staplin, L.: Human Factors Aspects of Using Head Up Displays in Automobiles: A Review of the Literature. Department of Transportation. Washington D.C. 1995.
- [6] Ablaßmeier, M.: Multimodales, kontextadaptives Informationsmanagement im Automobil. TU München Dissertation, 2009.
- [7] Bengler, K., Götz, M., Pfannmüller, L., Zaindl, A.: To See or not to See - Innovative Display Technologies as Enablers for Ergonomic Cockpit Concepts. Electronic displays Conference. Nürnberg 2015.

- [8] Bergmeier, U., Bubb, H.: Augmented Reality in Vehicle – Technical Realisation of a Contact Analogue Head-Up Display Under Automotive Capable Aspects. Usefulness Exemplified through Night Vision Systems. FISITA 2008 World Automotive Congress. München 2008.
- [9] Jachens, A., Zühlksdorf, M., Kern, T., A., Abel, H.: Augmented Reality Head-up display. System requirements and solutions concerning precise augmentation of information within the road scene. ELIV - Electronic in Vehicles. Bonn 2017.
- [10] Blume, J., Kern, T. A., Richter, P.: Head-up-Display. Die nächste Generation mit Augmented-Reality-Technik. In: Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): Vernetztes Automobil. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014, S. 137–143.
- [11] Holloway, R. L.: Registration errors in augmented reality systems. University of North Carolina at Chapel Hill Dissertation, 1995.
- [12] Azuma, R. T.: A survey of augmented reality. Teleoperators and Virtual Environments, 6 (1997) 4, S. 355–385.
- [13] Jansen, A.: Augmented Reality Navigation in zukünftigen Head-Up Displays. Prototypische kontaktanaloge Navigationsdarstellung im Versuchsfahrzeug. Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit. 7. Tagung. Der VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Braunschweig 2013.
- [14] Livingston, M. A., & Ai, Z.: The effect of registration error on tracking distant augmented objects. 7th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (SIMAR). Cambridge, UK 2008.
- [15] Kruijff, E., Swan II, J. E., Feiner, S. (2010): Perceptual issues in augmented reality revisited. 9th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). Seoul, South Korea 2010.
- [16] Wickens, C. D., Horrey, W.: Models of Attention, Distraction, and Highway Hazard Avoidance. In: Regan, M., Lee, J., Young , K.(Hrsg.): Driver distraction: Theory, effects, and mitigation. Boca Raton: CRC Press 2009, S. 57–69.
- [17] Simon, C. R.: Straßenmodellierung durch Fusion und Interpretation von Sensordaten zur spurgenauen Positionierung des Fahrzeugs. TU München Dissertation, 2012.
- [18] Van der Laan, J.D., Heino, A., Waard, D.D.: A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. Transportation Research - Part C: Emerging Technologies, 5 (1997), S. 1–10.
- [19] Mayer, A., Dietzfelbinger, L., Rosseel, Y., Steyer, R. (2016): The EffectLiteR approach for analyzing average and conditional effects. Multivariate behavioral research, 51 (2016) 2, S. 374–391.
- [20] Schönhammer, R.: Einführung in die Wahrnehmungspsychologie. Sinne, Körper, Bewegung. Uni Taschenbücher GmbH 2009.

Langnachleuchtende Luminophore zur Anwendung im Bereich des hochautomatisierten Fahrens

Long Persistent Luminescence Materials for Piloted Driving Applications

Dr. Janet Arras, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Abstract

Before widespread use of piloted driving the common machine environment- and machine people-sensing systems of present driver assistance systems have to be optimized and substantially increased in function. Above all, environment and people sensing at night and under conditions of moisture, fog and snow have to be substantially improved. But also, construction sites on roads and potential wrong-way driving are to date unsolved problems for piloted driving. To address these problems and requirements, chemistry can be very helpful. An intelligent adaptation of road markings or other kinds of guiding marking for roads (and also cars) can be a significant contribution. Here designed near-infrared (NIR) and short-wave infrared (SWIR) emitters will play an emerging role in future. Therefore, we recommend the use of afterglow materials for traffic applications.[1-3] However, to make their use affordable for widespread application in all parts of the country, we suggest the use of inorganic-organic hybrid materials (class II) and a special kind of pigment technology to enhance the lifetime, reduce the costs and increase the quality of the marking material.[3]



Fig. 1: Photo of the “glowing lines” on the highway N329 in the Netherlands (© Studio Roosegarde).[4]

- [1] DE102015015985A1.
- [2] DE102016003526A1.
- [3] Arras, J.; Bräse, S.: The World Needs New Colors: Cutting Edge Mobility Focusing on Long Persistent Luminescence Materials. *ChemPhotoChem*, 2, 2018, 55–66.
- [4] Homepage des Studios Roosegaarde, Rotterdam, Niederlande,
<https://www.studioroosegaarde.net>.

Messmethoden zur Bewertung dynamischer Blendsituationen

Measuring methods to evaluate dynamic glare situations

Dipl.-Ing. **Melanie Helmer**, Prof. Dr. rer. nat. **C. Neumann**,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)

Abstract

Lighting situations in road traffic can change permanently and quickly, caused by stationary lighting such as street lights or non-stationary lighting such as headlights of oncoming vehicles. The human eye automatically adjusts to these changes in lighting situations. From dark to light, this process is very fast and from light to dark rather slow. Observers experience a reduction in visual performance during the delay required for an eye to adjust to a new lighting situation. To measure the influence of glare on visual performance, different methods have already been developed. But these methods are neither practical for dynamic glare situations nor practically implementable in dynamic studies in real traffic.

To solve this problem, a new method has been developed. This method enables measurement of visual performance for any type of glaring situation. Furthermore the method can describe the influence of glare on the adaptation process in a time-discreet manner.

1. Einleitung/Motivation

Ob aufgrund stationärer Beleuchtung wie bspw. Straßenleuchten oder durch das Scheinwerferlicht entgegenkommender Fahrzeuge, die Lichtsituationen im Straßenverkehr ändern sich permanent und schnell. Die Adaptation an die unterschiedlichen, sich verändernden Lichtsituationen erfolgt automatisch und ist ein Vorgang, der von dunkel zu hell sehr schnell und von hell zu dunkel sehr langsam erfolgt. In der Zeit, die für die Adaptation benötigt wird, steht dem Beobachter jedoch nicht die maximale Leistung des visuellen Systems zur Verfügung. Ist dies der Fall, kann es passieren, dass der Beobachter relevante Informationen aus der Straßenszene nicht vollständig oder im schlimmsten Fall gar nicht wahrnimmt. Aus diesem Grund ist die visuelle Leistungsfähigkeit unter Einfluss dieser lichttechnisch hochdynamischen Situationen messtechnisch zu erfassen um ein mögliches Sicherheitsrisiko abzuleiten oder auszuschließen. Bisher stehen allerdings keine geeigneten Methoden zur Verfügung,

die unter den Randbedingungen im hochdynamischen Straßenverkehr angewendet werden können.

Aufgrund dessen wurde auf Basis der bisher etablierten Messmethoden eine neue Methode entwickelt, die das Messen der Sehleistungsreduzierung für beliebige Blendsituationen ermöglicht und gleichzeitig deren Einfluss auf den Adaptationsprozess zeitdiskret beschreibt.

2. Einschränkung des Untersuchungsgegenstandes

Aus eigenen Messreihen und der Literatur wurden Parameter bestimmt, für die die neue Messmethodik anwendbar sein muss. Als Use-Case wird eine Begegnungssituation zweier Fahrzeuge bei Nacht angenommen. Die zu bestimmenden Parameter sind in diesem Fall die Blendbeleuchtungsstärke am Fahrerauge sowie die Zeit, die der Fahrer durch das Scheinwerferlicht des entgegenkommenden Fahrzeugs geblendet wird. Hier spielen sowohl die gesetzlichen Regelungen als auch die systembedingte Funktionsweise von Scheinwerfersystemen zur Blendreduzierung eine wichtige Rolle.

Die wichtigsten Einflussgrößen zur Parameterbestimmung sind:

- Einstellgenauigkeit der Hell-Dunkel-Grenze
- Fahrdynamik
- Schaltzeiten (Fernlicht/Abblendlicht, Fernlicht/Blendfreies Fernlicht)

Aus gesetzlicher Sicht sind an dieser Stelle die Hell-Dunkel-Grenze bzw. vielmehr verschiedene Messpunkte eines typischen Abblendlichts, wie in **Bild 1** zu sehen, zu betrachten. Der Messpunkt B50L repräsentiert die zu erwartende Position des Fahrerauges eines entgegenkommenden Fahrzeugs. Der zulässige Lichtstärkebereich liegt zwischen 50 cd und 350 cd. Der Bereich der Zone III, der u.a. den Punkt B50L einschließt, ist begrenzt durch eine maximale Lichtstärke von 625 cd je Scheinwerfer. An Punkt 50L, sind nach ECE Regelung 123 sogar Lichtstärken von 3.550 cd bis zu 13.200 cd vorgeschrieben. Sofern der Scheinwerfer richtig eingestellt ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Messwerte eingehalten werden. Bei falscher Justage können die zulässigen Werte jedoch deutlich überschritten werden. Messfahrten von Matschke [2] und Dannenmeier [3] sowie eine Studie von Kosmas [4] bestätigen die Relevanz falsch justierter Scheinwerfer im Straßenverkehr. Lehnert konnte Schwankungen von bis zu 1,7° aufgrund der Fahrzeugdynamik nachweisen [5]. In solchen Fällen erhöht sich die Beleuchtungsstärke am Fahrerauge des entgegenkommenden Fahrzeugs im Vergleich zu den eigentlich zulässigen Werten (Vgl. Punkt B50L) für kurze Zeit um ein Vielfaches.

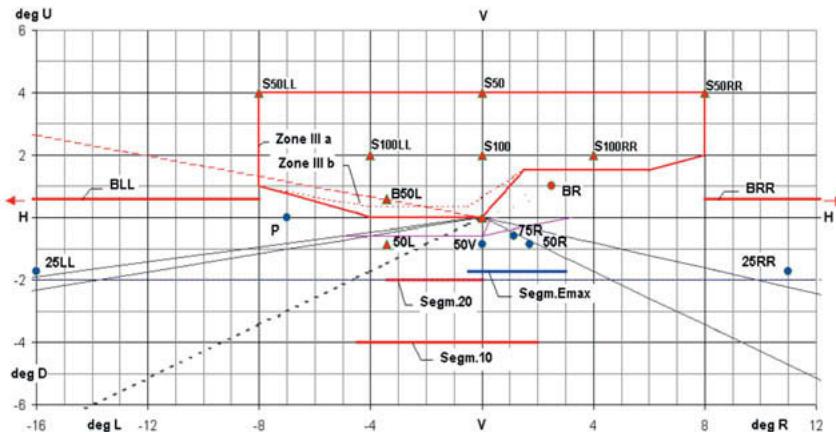


Bild 1: Winkelpositionen für die vorgeschriebenen photometrischen Werte des Abblendlichts für Rechtsverkehr [1]

Dannenmeier [3] und Steinborm [6] sind in ihren Messfahrten der Frage nachgegangen, mit welcher Dauer bei solche Situationen mit Überschreitung der gesetzlichen Maximalwerte gerechnet werden muss. Im Mittel werden die zulässigen Werte für 300 ms überschritten. Die maximale Beleuchtungsstärke am Fahrerauge beim Überfahren einer Bodenschwelle, die zu einer Erhöhung der Hell-Dunkel-Grenze um 1,7° führt, hat Steinborm in einer Entfernung von 25 m 23,7 lx gemessen. Vergleichbare Werte können auch im alltäglichen Straßenverkehr auftreten, da es sich bei dem vermessenen Fahrzeug um einen gebrauchten Audi A6 Avant der Baureihe C6 mit einem Xenon-Scheinwerfer handelte. Am Lichttechnischen Institut (LTI) wurden zusätzlich verschiedene typgeprüfte Scheinwerfer im Bereich der Hell-Dunkel-Grenze und darunter vermessen. Nach Überlagerung der Scheinwerferlichtverteilung unter Berücksichtigung der Anbauposition am Fahrzeug ergaben sich hier maximale Beleuchtungsstärken von bis zu 60 lx in 25 m Entfernung.

Zur weiteren Abschätzung/Einschränkung realer Blendzeiten im Straßenverkehr wurde auf Literatur zurückgegriffen, wobei im Folgenden zum einen manuelle und zum anderen automatische Umschaltvorgänge zwischen Fern- und Abblendlicht bzw. Fern- und blendfreiem Fernlicht betrachtet wurden.

Manuelle Schaltzeiten sind maßgeblich auf die Reaktionszeit des Fahrers zurückzuführen. Eine Probandenstudie von Sprute [7] zeigte, dass etwa ein Drittel der Abblendvorgänge län-

ger als eine Sekunde dauern. Schmidt-Clausen, Rosemann (beide zitiert in [8]) und Derich [9] schlussfolgerten aus ihren Studien Reaktionszeiten im Bereich von 600 ms bis 800 ms. Sofern das Abblenden nicht vom Fahrer übernommen wird und hierfür ein Assistenzsystem bzw. ein blendfreies Fernlicht zur Verfügung steht, ist hier die Latenzzeit der Systeme zu berücksichtigen. Das Gesamtsystem betrachtend, ermittelte Hummel [10] messtechnisch eine mittlere Latenzzeit von 196 ms ± 21 ms. Messungen von Totzauer [11] ergaben 288 ms mit einer Standardabweichung von 17,4 ms. In einem bei „Elektronik automotive“ erschienenen Artikel [12] wird von Latenzzeiten von maximal 200 ms gesprochen.

Insgesamt lässt sich für die zu untersuchenden Blendsituationen ableiten, dass die Methode für Blendzeiten im Bereich von weniger als 500 ms und für Blendbeleuchtungsstärken bis zu 60 lx anwendbar sein muss.

2. Etablierte Messmethoden und deren Einschränkungen in Bezug auf dynamische Blendsituationen

Die Grundlage aller etablierten Messmethoden ist das nach DIN EN ISO 8596 definierte Normsehzeichen Landolttring. Hierbei handelt es sich um einen Kreisring mit Öffnung. Die Öffnung und Strichbreite müssen 1/5 des Gesamtdurchmessers betragen. Die Sehaufgabe des Probanden besteht darin die Orientierung der Öffnung anzugeben. Insgesamt ergeben sich acht Öffnungsmöglichkeiten und eine Ratewahrscheinlichkeit von 12,5%. Der Landoltring hat im Vergleich zu anderen Optotypen (Sehzeichen) den Vorteil, dass kognitives Erkennen oder Ähnlichkeitsmuster nur eine untergeordnete Rolle spielen, sodass alle Öffnungen ähnlich gut erkannt werden können. [13]

Die individuelle Sehleistung der Probanden kann über den Schwellenkontrast des Landoltrings gemessen werden. Der Schwellenkontrast K_s ist der (individuelle) Mindestkontrast (die absolute Wahrnehmungsschwelle) (Siehe Formel (1)), der erreicht werden muss, um ein Objekt zu 50% identifizieren zu können. L_o beschreibt hierbei die Objektleuchtdichte des Landoltrings und L_u die Umgebungsleuchtdichte.

$$K_s = \frac{L_o - L_u}{L_u} \quad (1)$$

Bisher haben sich drei Methoden zur Schwellenkontrastbestimmung nach Fechner bewährt, um die physische Reizstärke in die psychische Wahrnehmungsstärke zu überführen. Für

Informationen zur Konstanz-, Grenz- und Herstellungsmethode sei an dieser Stelle auf entsprechende Literatur verwiesen. [14],[15]

Im Folgenden werden die Schwellenkontrast- und die Readaptationsmethode beschrieben um den Einfluss von Blendung auf die Sehleistung zu bestimmen. Grundlegend für beide Methoden ist die Bestimmung des individuellen Schwellenkontrastes nach einer der drei oben genannten Methoden.

2.1 Schwellenkontrastmethode

Wie in **Bild 2** zu sehen, ist im ersten Schritt der personenbezogene Schwellenkontrast K_{Sob} ohne Blendlichtquelle bestimmt. Als visueller Reiz wird dem Probanden der Landoltring für eine bestimmte Zeit dargeboten. Die Öffnungsdarbietung wird für unterschiedliche Kontraste mehrfach und randomisiert wiederholt. Aus den richtig erkannten Öffnungsrichtungen ist der personenbezogene Schwellenkontrast nach einem der drei Methoden (Konstanz-, Grenz- und Herstellungsmethode) abzuleiten.

Dem Probanden wird nun ein Landoltring mit einer zufällig ausgewählten Öffnungsrichtung unter Einfluss der Blendlichtquelle dargeboten und der Schwellenkontrast erneut bestimmt.

Durch Differenzbildung der beiden ermittelten Schwellenkontraste kann der Einfluss auf die Sehleistung gemessen werden.

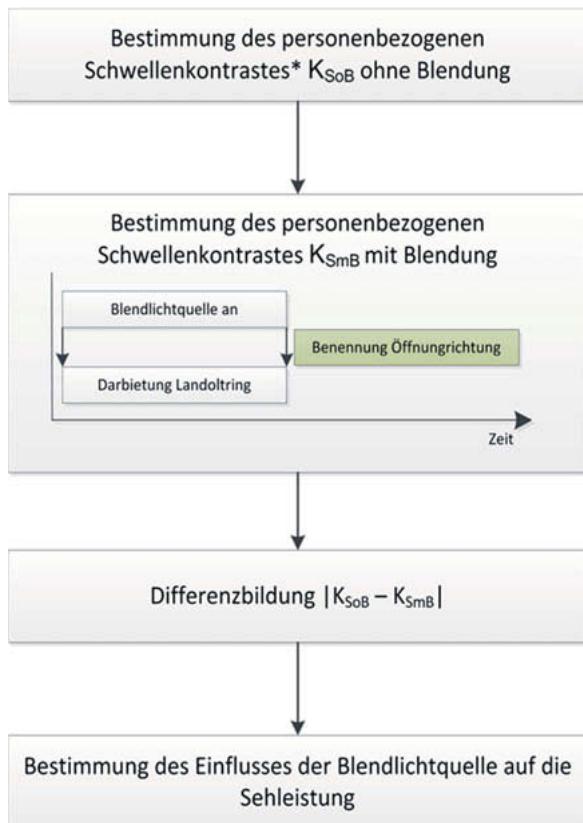


Bild 2: Ablaufdiagramm der Schwellenkontrastmethode; *) mithilfe der Grenz-, Herstellungs- oder Konstanzmethode; grün markiert: Probandenaktion

2.2 Readaptationsmethode

Mithilfe der Readaptationsmethode wird die Zeit t_R bestimmt, die das visuelle System benötigt um die ursprüngliche Sehleistung nach einem Lichtreiz wieder zu erreichen. Auf den hier beschriebenen Anwendungsfall bedeutet das, dass zunächst der personenbezogene Schwellenkontrast unter Verwendung des Landoltrings ohne den Einfluss einer Blendlichtquelle bestimmt wird. Der Proband wird nun für eine bestimmte Zeit dem Einfluss der Blendlichtquelle ausgesetzt und hat die Aufgabe einen Taster zu betätigen, sobald er die Öffnung des Landoltrings (im zuvor bestimmten persönlichen Schwellenkontrast) wieder erkennen und benennen kann. Dieser Vorgang wird mehrfach wiederholt und aus dem Mittelwert die Readaptionszeit ermittelt [16]. Die Darbietungszeit des Landoltrings muss länger sein als die Readaptationzeit. Der Ablauf ist in Bild 3 dargestellt.

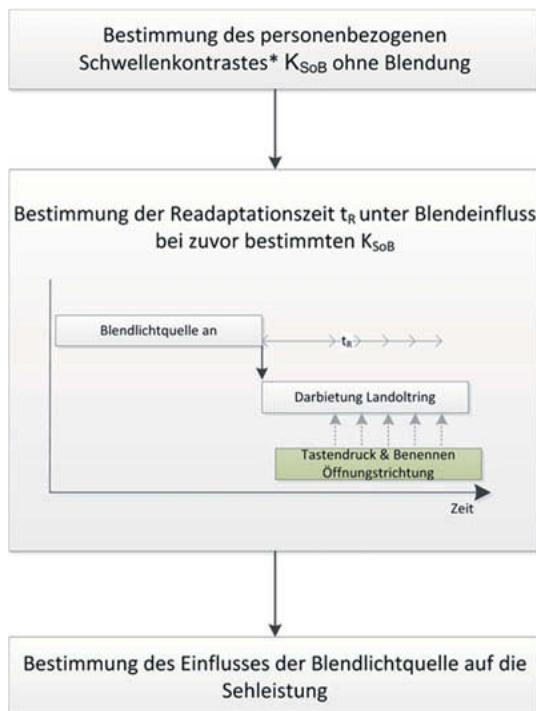


Bild 3: Ablaufdiagramm der Readaptionsmethode; *) mithilfe der Grenz-, Herstellungs- oder Konstanzmethode; grün markiert: Probandenaktion

2.3 Übertragbarkeit der beiden Methoden auf (sehr kurze) dynamische Blendsituationen

Unter einer dynamischen Blendsituation ist eine solche zu verstehen, bei der sich der Blend-eindruck für den Probanden über die Zeit ändert. Die Blendlichtquelle ist zu Beginn der zu untersuchenden Situation beispielsweise an und wird nach einer bestimmten Zeit abgeschaltet. Das Schalten bzw. die Regelkurve kann Berücksichtigung finden, wird in diesem Paper der Einfachheit halber jedoch nicht betrachtet

Eine direkte Anwendung der Schwellkontrastmethode für dynamische Blendsituationen ist nicht möglich, da aufgrund der methodenbedingten zeitlichen Abfolge der Einfluss der Blendlichtquelle nur direkt während der Blendung gemessen werden kann. Eine Anpassung an dynamische Blendsituationen ist mit deutlichen Einschränkungen und erhöhtem experimentellen Aufwand verbunden, sodass diese Messmethode nicht weiter betrachtet wird.

Prinzipiell eignet sich die Readaptionsmethode gut um den Einfluss dynamischer Blendsituationen auf das Sehleistungsvermögen zu bestimmen. Allerdings kommt diese bei sehr kurzen Blendzeiten und bei geringem Störpotential der Blendlichtquelle an ihre Grenzen. Dies hängt maßgeblich mit der Verwendung des Landoldrings als Sehzeichen und der Reaktionszeit des Probanden zusammen.

Der Faktor Mensch hat bei der Durchführung von Probandenstudien den größten Einfluss, der je nach Versuchsziel in der Versuchsplanung Beachtung finden muss. In Bezug auf die Anwendung der Readaptionsmethode bedeutet dies, dass der Proband aufgrund seiner benötigten Reaktionszeit zur Tasterbetätigung den Messbereich der Readaptionszeit limitiert. Die Reaktionszeit beschreibt die Zeit zwischen dem Zeitpunkt der Reizdarbietung und der Reaktion des Probanden. Neben der Zeit, die notwendig ist um den Reiz sensorisch zu erfassen, spielen auch kognitive Prozesse sowie die motorischen Reizleistungszeiten als Teiltorgänge eine wichtige Rolle. In Summe ergeben sich für die Reaktionszeit durchschnittlich 350 ms. Die Zeiten für die Teiltorgänge sind je nach Schwierigkeit/Zeichenumfang der Probandenaufgabe von unterschiedlicher Dauer und können deutlich über den 350 ms liegen [17, 18]. Es muss bei der Messung der Readaptionszeit folglich mit einem Offset von mindestens 350 ms gerechnet werden.

Darüber hinaus ist die Menge der möglichen Antworten auch limitiert: Entweder wird die Öffnungsrichtung nach Störeinfluss richtig bekannt (Aufnahme eines Messwertes) oder nicht (Kein Messwert).

3. Methodenentwicklung

Die größte Herausforderung bei der Methodenentwicklung ist die Reduzierung der Reaktionszeit- im Besonderen die beiden Teilvergänge kognitive Verarbeitung und motorisches Feedback. Andererseits wäre es wünschenswert auch die Menge an möglichen Antworten zu erhöhen um Unterschiede im Messintervall präziser abbilden zu können. Darüber hinaus sollte die Aufgabe des Probanden für diesen intuitiv und die Methode an sich mit geringem (zeitlichen) Aufwand umsetzbar sein.

Mithilfe der neuen Methode soll zwar der Einfluss kurzer Blendlichtzeiten auf die Sehleistung gemessen werden, allerdings ist von der Verwendung des Landoltrings abzusehen, da nur Messwerte zur Auswertung verwendet werden können, bei welchen der Proband die Öffnungsrichtung erkannt hat. Ist die vom Probanden genannte Öffnungsrichtung nicht korrekt, liegt für die jeweilige Blendsituation kein Messwert vor.

Der Landoltring ist nach DIN EN ISO 8596 zwar das einzige Normsehzeichen, dass zur Sehleistungsbestimmung verwendet werden darf [19], allerdings bezieht sich der Begriff „Sehleistung“ in diesem Zusammenhang primär auf die Visusbestimmung. Diesbezüglich ist zu überlegen, ob der Landoltring durch andere gleichwertige Optotypen, welche nach ISO 8597 (früher DIN 58220, Teil 2) an das Normsehzeichen angeschlossen wurden, ersetzt werden kann. Als Beispiel können hier Zahlen oder Buchstaben genannt werden. Diese sind den Probanden bekannt und intuitiv erkennbar.

Verfolgt man die Idee der Buchstabenpräsentation weiter, kann eine Veröffentlichung von George Sperling aus dem Jahr 1960 mit Experimenten zum Thema „Visuelles Kurzzeitgedächtnis“ bzw. „Kapazität des sensorischen Speichers“ herangezogen werden. Sperling präsentierte eine 3x4 Buchstabenmatrix für 50ms, wobei die Aufgabe der Versuchspersonen darin bestand unmittelbar nach der Präsentation so viele Buchstaben wie möglich wiederzugeben. Er konnten dieser Studie zeigen, dass es trotz der sehr geringen Darbietungszeit möglich ist im Mittel 4,3 Buchstaben wiederzugeben. Folglich ergibt sich hinsichtlich der richtigen Antwortmöglichkeiten (richtig genannte Buchstaben) im Vergleich zur Verwendung des Landoltrings ein mehrstufiges Messsystem. [20]

4. Die MeLLI-Methode

Wenn es also möglich ist, innerhalb kürzester Zeit (≤ 50 ms) mehrere Buchstaben sensorisch zu erfassen und kognitiv zu verarbeiten, spricht dies für die Verwendung von Buchstaben statt der bisher verwendeten Landoltringe. Auch eine motorische Reaktion der Probanden ist

in diesem Fall nicht notwendig, sodass zeitliche Messunsicherheiten von ursprünglich mind. 350 ms auf konkret 50 ms reduziert werden können.

So ist die Idee entstanden, diesen Ansatz in die sogenannte MeLLI-Methode (**M**easurement of glaring **L**ight stimuli with **L**etter **I**dentification) zu überführen, die sich die Ergebnisse von Sperling in Bezug auf den Einfluss von Störlichtquellen zu Nutze macht.

Eine Variation der sogenannten Interstimulusintervalle (kurz: ISI; also der Zeit zwischen Ausschalten der Blendlichtquelle und Darbietung der Buchstabenmatrix) ermöglicht zudem eine zeitaufgelöste Messung der visuellen Leistungsfähigkeit.

Folglich ist die Messung der visuellen Leistungsfähigkeit objektiv (konkreter Messwert: Anzahl der erkannten Buchstaben), zeitaufgelöst, in dynamischen Situationen und sowohl für (sehr) kurze als auch für lange Blendzeiten theoretisch möglich.

Im nächsten Schritt ist eine Validierung der MeLLI-Methode mittels Probandenstudien notwendig, deren erste Ergebnisse im Vortrag vorgestellt werden.

Literaturangaben

- [1] UNECE: Regulation No. 123 Revision 2. ECE R123. 2013
- [2] Josephine Matschke: Nächtliche Blendsituationen auf der Landstraße, Fachhochschule Köln Bachelorarbeit. Jena 2010
- [3] Dannenmaier, M.: Evaluierung realer Blendsituationen im Straßenverkehr, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2017
- [4] Kyriakos Kosmas: Entwicklung eines Gerätes zur Einstellung der Lage der Lichtstärkeverteilung von Kfz Scheinwerfern, Technische Universität Darmstadt Bachelorarbeit. Darmstadt 2013
- [5] DE19944369B4
- [6] Steinborm, W.: Evaluation realer Blendzeiten im Straßenverkehr, Karlsruher Institut für Technologie Bachelorarbeit. Karlsruhe 2017
- [7] Sprute, J. H.: Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen, Technische Universität Darmstadt Dissertation. Darmstadt 2012
- [8] Eckert, M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr. Berlin: Verl. Technik 1993
- [9] Derich, H.: Vergleich statistischer Auswerteverfahren der experimentell ermittelten Reaktionszeiten von PKW-Fahrern im Straßenverkehr, Fachhochschule Köln Diplomarbeit. Köln 1998
- [10] Hummel, B.: Blendfreies LED-Fernlicht. Audi Dissertationsreihe, v.30. Göttingen: Cuvillier Verlag 2010
- [11] Totzauer, A.: Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2013. Darmstädter Lichttechnik. München: Utz 2013
- [12] Andreas Pfeffer: Digitalisierung der Beleuchtungstechnik. Hella setzt LCDs im LED-Scheinwerfer ein. Funktionsprinzip, 2017. <http://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/assistentenzsysteme/hella-setzt-lcds-im-led-scheinwerfer-ein-143038-Seite-3.html>, abgerufen am: 08.01.2018
- [13] Wesemann, W.: Die Grenzen der Sehschärfe, Teil 4. Wie misst man die Sehschärfe richtig? Regeln und Probleme. DOZ (2002) 2, S. 32–38
- [14] Schierz, C.: Die Psychophysik der Wahrnehmungsschwelle: Von Weber und Fechner zur Signaldetektionstheorie. Tagungsband Lux Junior 2013. 2013
- [15] Freyer, M.: Einfluss der Blendbeleuchtungsstärke und der Leuchtdichte auf die Blendung und den Schwellenkontrast bei homogenen und inhomogenen Umfeld, Hochschule Anhalt Diplomarbeit 2004

- [16] Hamburger, F. A.: Das Sehen in der Dämmerung. Physiologie und Klinik. Vienna: Springer Vienna 1949
- [17] The Interpretation of Reaction Time in Information Processing Research Nr. 45, Pachel-la, R. G., 1973
- [18] Solso, R. L. u. Reiss, M.: Kognitive Psychologie. Mit 14 Tabellen. Springer-Lehrbuch. Heidelberg: Springer 2005
- [19] W. Wesemann, U. Schiefer, M. Bach, Wesemann, W., Schiefer, U. u. Bach, M.: Neue DIN-Normen zur Sehschärfebestimmung. Ophthalmologe 2010 107 (2010) 9, S. 821–826
- [20] Sperling, G.: The information available in brief visual presentations. Psychological Monographs: General and Applied 74 (1960) 11, S. 1–29

Durchgängige simulative Evaluierung von Lichtfunktionen

Consistent Simulative Evaluation of Light Functions

M.Sc. **Steffen Strelbel**, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach;
Prof. Dr. rer. nat. **Cornelius Neumann**, KIT – Lichttechnisches Institut,
Karlsruhe

Kurzfassung

Blendfreie Fernlichtsysteme stellen bei korrekter Funktion einen hohen Sicherheits- und Komfortgewinn für den Fahrer dar. Durch die steigende Systemkomplexität wird jedoch eine Validierung im realen Fahrbetrieb zunehmend schwieriger. Die zur Absicherung notwendigen Tests zur Validierung der Wirkkette erfordern die Integration in eine virtuelle Umgebung. In diesem Beitrag wird ein durchgängiger Ansatz zur simulativen Evaluierung von Lichtfunktionen im Entwicklungsprozess am Beispiel des LED Matrix Beam vorgestellt. Als Umgebungssimulation dient dabei Virtual Test Drive der Firma VIRES Simulationstechnologie GmbH, welches Lichtverteilungen basierend auf vermessenen Scheinwerfern visualisiert. Die Wirkkette ist modular durch ideale Sensormodelle oder reale Sensoren durch die Einspeisung eines Videodatenstroms direkt aus der Simulation geschlossen.

Die Umsetzung eines Konzepts in Software-in-the-Loop, Hardware-in-the-Loop und Driver-in-the-Loop wird vorgestellt sowie dessen Vorteile und Limitierungen aufgezeigt. Die Anforderungen für eine objektive und reproduzierbare Validierung, wie z.B. die Überprüfung der korrekten Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer, werden abgeleitet und eine entsprechende Erweiterung des bestehenden Konzepts vorgeschlagen.

Abschließend erfolgt ein Ausblick auf zukünftige Verbesserungen der Absicherungstoolkette und Methodenarbeit.

Abstract

When functioning correctly, glare-free high-beam systems provide increased safety and comfort during night drive. Validation in real driving becomes increasingly difficult due to growing system complexity. The needed objective and reproducible tests require an integration in a virtual environment. This article presents a concept for the simulative evaluation of light functions using the example of the LED Matrix Beam Headlights. Virtual Test Drive from VIRES Simulationstechnologie GmbH serves as environment simulation in which corresponding light

distributions are visualized based on measured headlamps. The functional chain is modular closed by an ideal camera sensor model or a real sensor into which a video stream is fed directly from the simulation.

An implementation in Software-in-the-Loop, Hardware-in-the-loop and Driver-in-the-loop is presented as well as current advantages and limitations will be discussed. The requirements for objective and reproducible validation, such as the validation of the correct out-fading of other road users in dynamic scenes, are derived and an extension of the existing concept will be proposed.

Finally, an outlook on future improvements of the tool chain and necessary methods will be shown.

1. Motivation

LED Matrix Beam ist als Technologie für blendfreies Fernlicht etabliert. Neue Systeme mit deutlich höheren Auflösungen wie beispielsweise LCD¹, DMD² oder μAFS³ sind Stand der Forschung oder werden gerade auf dem Markt eingeführt. Die zukünftig vorhandenen Freiheitsgrade und Möglichkeiten von lichtbasierten Fahrerassistenzfunktionen nehmen damit weiter zu. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Algorithmen und Sensorinformation. Dies führt zu größeren Aufwänden in der Applikation, sowie der funktionalen und qualitativen Absicherung der gesamten mitverbundenen Wirkkette.

Die Erprobung aktueller lichtbasierten Fahrerassistenzfunktionen findet zu großen Teilen mit Prototypen im Straßenverkehr oder auf dem Prüfgelände statt. Statische und einzelne dynamische Szenen können mit steigendem Aufwand nachgestellt und getestet werden, jedoch fehlt die Vielfältigkeit und Dynamik des Straßenverkehrs und schließlich dort die Referenz für eine objektive und reproduzierbare Bewertung.

Aus diesem Grund wird die Wirkkette bestehend aus Sensorik, Steuergerät/Algorithmus und Aktor in eine virtuelle Umgebungssimulation eingebettet. Darin sind alle Umgebungsbedingungen der Szene steuerbar und das Gesamtsystem ist objektiv und gegebenenfalls automatisiert evaluierbar. Ebenfalls können Methoden implementiert werden, die die einzelnen Sub-Funktionen des Lichtalgoritmus überwachen. Entwicklungsbegleitend ermöglichen Qualitätskennzahlen ein objektives Benchmarking verschiedener Versionsstände und Technologien. Durch

¹ Liquid Crystal Display

² Digital Mirror Device

³ micro-structured Adaptive Front-lighting System

die Anbindung einer Umgebungssimulation auf verschiedenen Ebenen des V-Modells wie Software/Model-in-the-Loop (SiL/MiL), Hardware-in-the-Loop (HiL) und Driver-in-the-Loop (DiL), wird zudem eine Durchgängigkeit erreicht, die u.a. die Wiederverwendung von Sensor-/Aktormodellen und Testfällen ermöglicht.

2. Bestehende Absicherungskonzepte

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Übertragung bekannter Konzepte der Absicherung von Fahrerassistenzsystemen mittels einer Umfeldsimulation, siehe [1] [2], auf Lichtfunktionen und stellt die durchgängige Integration in X-in-the-Loop (XiL) Testumgebungen dar. Auf Vehicle-in-the-Loop-Systeme (ViL) wird in diesem Artikel nicht eingegangen. Eine mögliche Umsetzung wird in [3] vorgestellt.

Wenige vorangegangene Arbeiten wie [4] präsentieren einen durchgängigen Lösungsansatz für einen virtuellen Fahrversuch mit einen adaptiven Fernlichtassistenten, ohne allerdings auf die Anforderungen an die Absicherungstoolkette einzugehen oder daraus abgeleitete Methoden näher zu erläutern.

Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf der durchgängigen Integration einer Matrix Beam Lichtfunktion, der Anbindung an einen Fahrsimulator und der Darstellung derzeitiger Limitierungen. Abschließend folgt die Ableitung eines Konzepts für die Erweiterung der bestehenden Architektur, um zeitkritische kamerabasierte Funktionen wie die Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer testen zu können.

3. X-in-the-Loop Prüfstände

Die Entwicklung elektrischer und elektronischer Systeme in der Automobilindustrie orientiert sich am V-Modell [5]. Mit der Veröffentlichung der Norm ISO26262 [6] im Jahr 2011 wird für die Sicherstellung der funktionalen Sicherheit dieser Systeme ebenfalls ein phasenorientiertes Vorgehensmodell definiert.

Das V-Modell (Abbildung 1) beschreibt auf der linken Seite die produktbezogenen Entwicklungs- und Spezifizierungsphasen, wobei das Abstraktionslevel in den tieferen Projektphasen stetig abnimmt und schließlich in der eigentlichen Komponentenentwicklung mündet. Den einzelnen Projektphasen der linken Seite, stehen auf der rechten Seite des Modells die Testphasen gegenüber. Aus den Modul- und Systemspezifikationen, die meist in Form von Lastenheften definiert werden, können die durchzuführenden Testfälle abgeleitet werden. Die dafür notwendigen Testplattformen sind üblicherweise SiL/MiL- und HiL-Prüfstände. Auch für die zunehmende Nutzung agiler Entwicklungsmethoden bilden diese Plattformen eine wichtige Grundlage.

DiL-Systeme sind auf der höchsten Abstraktionsebene angesiedelt und ermöglichen u.a. reproduzierbare Probandentests bei definierten Umfeldbedingungen oder die simulative Bewertungen neuer Technologien. Neben Studien im Verkehr oder Prüfgelände, können diese je nach Forschungsfrage ebenfalls an Fahrsimulatoren durchgeführt werden. Dieser bieten den Vorteil, neben Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit, auch potentiell gefährliche Situationen nachstellen zu können.

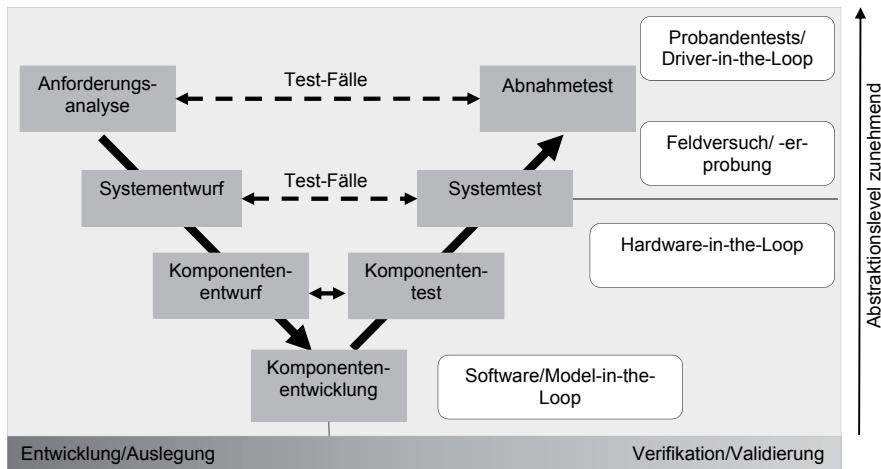


Bild 1: Vereinfachte Darstellung des V-Modells, nach [7]

Neben den genannten Eigenschaften liegen bei XIL-Simulationen, im Vergleich zur Fahrzeugerprobung oder dem Test mit aufgezeichneten Testfahrten, fehlerfreie Referenzdaten vor. Diese bilden die Grundlage für eine objektive Absicherung. Die Stärke von XIL-Simulationen liegt vor allem auf der funktionalen Validierung. Die Bewertung subjektiver Anteile, wie die Wirkung von Dimmkurven o.ä. ist ohne objektivierbare Gütermerkmale derzeit nur mit einem Scheinwerfer möglich. In Tabelle 1 werden die Vor- und Nachteile zusammenfassend aufgezeigt.

Eine durchgängige Integration der Lichtfunktion erfordert die Einbettung in ein virtuelles Umfeld. Um die Wirkkette geschlossen betreiben zu können, müssen dabei Sensoren und Aktoren an eine Umgebungssimulation angebunden werden. In diesem Beitrag wird die Umsetzung mit Virtual Test Drive (VTD) gezeigt. Eine ausführliche Beschreibung des Tools findet sich unter [8].

Tabelle 1: Vergleich zwischen verschiedenen Testmethoden in Bezug auf Lichtfunktionen

	Fahrzeugerprobung	aufgezeichnete Testfahrten	XiL-Simulation
Umweltbedingungen	+ real	+ real	o nicht real, aber ideal
Regelkreise	+ geschlossen	- offen	+ geschlossen
Ressource	o begrenzt verfügbar, nur bei Nacht möglich	+ skalierbar, automatisierbar	+ skalierbar, automatisierbar
Referenzdaten	- keine bzw. nur mit großem Aufwand	- keine bzw. nur mit großem Aufwand	+ fehlerfrei, alle Zustände bekannt
Schnittstellen-/Hardwareänderung	o Anpassung notwendig / Synergie FAS	- neue Aufzeichnungen notwendig	o Anpassung notwendig / Synergie FAS
Teststrecke und /-szenario	- schwer reproduzierbar	o reproduzierbar	+ reproduzierbar, skript-/triggerbasiert
Subjektive Bewertung	+ gut möglich	- keine bzw. nur mit neuen Methoden	- keine bzw. nur mit neuen Methoden

4. Die Integration von Lichtfunktionen

Die Berechnung blendfreier Lichtverteilungen basiert im Wesentlichen auf Objektlisten, die aus einem Videostrom einer Frontkamera während einer Nachtfahrt berechnet werden. Weitere Sensordaten wie Radar, Lidar oder Car2X-Kommunikationen können durch eine Objektfusion zu einer größeren Genauigkeit der Objektdaten führen, spielen jedoch zunächst eine untergeordnete Rolle und werden in diesem Beitrag nicht betrachtet.

Sonstige fahrzeugeigene Zustandsgrößen wie Geschwindigkeit, Lenkradwinkel oder Kartenposition werden durch das reale Fahrzeug bzw. die Steuergeräte oder ein Fahrzeug- und Fahrermodell zur Verfügung gestellt. Die Freiheitsgrade bei Matrix Beam Scheinwerfern sind die Dimmwerte der einzelnen LED Pixel, sowie der Parameter für eine eventuelle horizontale und vertikale Stellmotorik. Die Darstellung der Lichtfunktion wird in VTD OpenGL-basiert mittels IES⁴-Dateien [9] umgesetzt, die aus goniophotometrisch vermessenen Scheinwerferpixeln gewonnen wurden. Darin werden für jeden Simulationsschritt die Dimmwerte der einzelnen Pixel der Lichtfunktion mit den korrespondierenden IES-Dateien multipliziert, anschließend zu einer gemeinsamen Lichtverteilung addiert und in der Umgebungssimulation visualisiert (Abbildung 2).

⁴ Standardisiertes Dateiformat der Illuminating Engineering Society zur winkelabhängigen Beschreibung von Lichtstärkeverteilung von Lichtquellen



Bild 2: Visualisierung einer Ausblendungssituation mit der Matrix Lichtfunktion in VTD.

Die SiL/MiL-Umgebung

In dieser Testplattform liegt der Testfokus auf dem Modell der Lichtfunktion bzw. der bereits kompilierten Softwarekomponente. Die umgebenden Module liegen dabei als Simulationsmodelle vor. Im ersten Fall sind Methoden des White-Box-Tests anwendbar, da interne Zustände abgegriffen und validiert werden können. Im zweiten Fall sind lediglich Black-Box- und im Falle von Systemwissen über die innere Struktur Grey-Box-Tests möglich.

Abbildung 3 zeigt die Architektur dieser Testumgebung. Dabei sind zwei verschiedene Modi möglich: Ein closed-loop-Betrieb ist durch die Integration eines Kameramodells möglich, das die vorliegenden Zustände der Umgebungssimulation in Objektlisten transformiert und in die Lichtfunktion einspeist. Durch die virtuellen Scheinwerfer ist der Regelkreis geschlossen.

Mittels aufgezeichneter Daten oder Testvektoren kann die Lichtfunktion ebenfalls stimuliert werden. Allerdings ist dann kein geschlossener Regelkreis mehr möglich. Zudem sind bei Schnittstellenänderungen oder -erweiterungen aufwändige Nacharbeiten oder die erneute Aufzeichnung der Sequenzen notwendig.

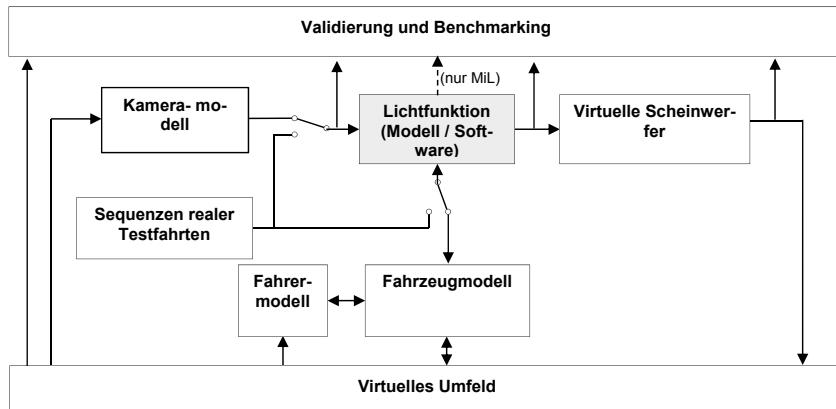


Bild 3: Architektur einer SiL-Plattform für Lichtfunktionen

In Tabelle 2 werden die derzeitigen Vorteile und Limitierungen im Vergleich zur HiL-Plattform dargestellt. Durch Eigenschaften wie Skalierbarkeit ist die SiL-Umgebung besonders geeignet für Methoden des modellbasierten Testens und ermöglicht im gesamten Validierungsprozess eine hohe Testtiefe und Testabdeckung. Testfälle die die gesamte Wirkkette betreffen sind nicht möglich.

Tabelle 2: Vorteile und Limitierung von SiL und HiL im Vergleich

	Software/Model-in-the-Loop	Hardware-in-the-Loop
Testtiefe	+ hohe Testtiefe mit modellbasierten Ansatz	o Tests von ausgewählten Spezifikationen
Zeitverhalten	+ größer / kleiner / (gleich) Echtzeit	+ Echtzeit
Tests mit realer Signallaufzeit	- nicht möglich	o durch Erweiterung möglich
Reale Sensoren	- nicht möglich	+ kamerabasierte Sensoren möglich
Reale Scheinwerfer	- nicht möglich	+ möglich
Schnittstellen-/ Kommunikations-/ End2End-Testfälle	- nicht möglich	+ möglich
Testfokus	Softwarekomponente	Softwarekomponente / gesamte Wirkkette

Integration in einen HiL-Prüfstand

Das Ziel an einem HiL-Prüfstand ist, den größtmöglichen Teil der an der Wirkkette der Lichtfunktion beteiligten Steuergeräte und Bussysteme durch reale Hardware darzustellen. Einerseits entfallen damit an Schnittstellen notwendige Modellierungsaufwände für die oft Expertenwissen notwendig ist und zu jeder Hardware- und Schnittstellenänderung wieder angepasst werden müssen. Andererseits werden prinzipiell Tests ermöglicht, bei denen die Signallaufzeit innerhalb der Wirkkette eine große Rolle spielt.

Nicht vorhandene Steuergeräte, sowie das Fahrermodell und andere benötigte Restbussignale werden auf einem Echtzeitrechner berechnet und den entsprechenden Schnittstellen zur Verfügung gestellt.

Um die Fahrerassistenzkamera in den Prüfstand zu integrieren wird eine direkte Bilddateneinspeisung⁵ umgesetzt. Der aus Sicht der Fahrerassistenzkamera gerenderte Videodatenstrom aus der Umgebungssimulation wird in der Kamera zwischen Bildsensor und Bildprozessor eingespeist. Im Vergleich zu einer Dunkelkammer, bei der das Verkehrsgeschehen mit einem Beamer vor die Fahrerassistenzkamera projiziert wird, können die bei Nacht auftretenden hohe Leuchtdichten, wie sie bei Scheinwerfern und Rücklichtern von Verkehrsteilnehmern oder Retroreflektionen an Verkehrsschildern vorkommen, simuliert werden. Ebenfalls sind Kalibrierung und Synchronisation der Kamera softwareseitig umsetzbar. Weitere Details zur technischen Umsetzung kann [10] entnommen werden.

Der eingespeiste Videodatenstrom berücksichtigt bei der Bildsynthese auch Information wie spektrale Empfindlichkeit, Belichtungszeit und Bittiefe des Kamerasensors. Für den experimentellen Nachweis zur Eignung virtueller Umgebungen für Klassifikationsalgorithmen und die möglichen Optimierungen wird auf die folgende Literatur verwiesen [11].

Auf eine Nutzung des realen Aktors wird zunächst verzichtet und für die Rückkopplung werden virtuelle Scheinwerfer integriert (Abbildung 4). Im Vergleich zum SiL-Prüfstand (Tabelle 2) ist die Wirkkette nahezu identisch zu der im Erprobungsfahrzeug, kann aber objektiv, reproduzierbar und automatisiert getestet werden. Der Fokus liegt dabei auf funktionalen Tests. Die Anforderung bei der Validierung der Ausblendung geht über funktionale Tests hinaus, da die Laufzeit der Signale in der Wirkkette eine große Rolle spielt. In Kapitel 4 wird eine Erweiterung der bestehenden Architektur vorgestellt.

⁵ engl. Digital Signal Injection (DSI)

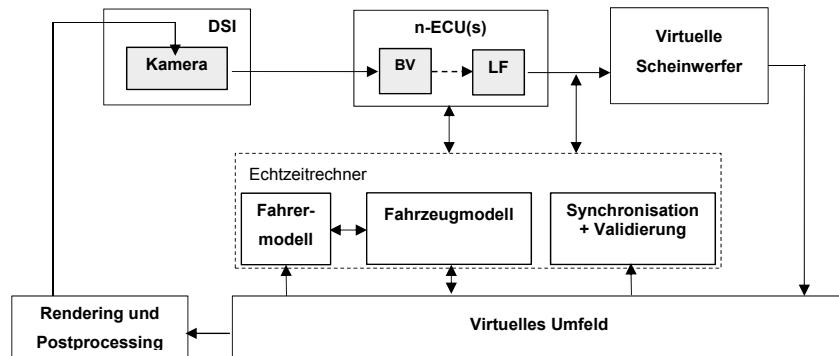


Bild 4: Vereinfachte Darstellung der HiL-Prüfstands Architektur

Integration in den Fahrsimulator

An den bestehenden virtuellen Fahrerarbeitsplatz der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG wird die Wirkkette des HiL-Prüfstands übertragen. Der Fahrsimulator ist quaderförmig aufgebaut und es sind mittels Rückprojektion auf bis zu sechs Seiten dreidimensionale Darstellungen der virtuellen Umgebung möglich. Ein Hexapod mit sechs Bewegungsfreiheitsgraden und aufgebaute Sitzkiste ermöglicht die Simulation der Beschleunigungskräfte im Fahrzeug (s. Abbildung 5). Für detailliertere Informationen zum Fahrsimulator wird auf die entsprechende Veröffentlichung verwiesen [12].



Bild 5: Virtueller Fahrerarbeitsplatz der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG [6]

Für die Lichtfunktion nicht benötigte Steuergeräte werden bei der Integration durch vereinfachte Simulationsmodelle ersetzt oder entfernt. Das Fahrermodell wird durch einen realen Fahrer ersetzt. Die verbauten Bedienelemente wie Lenkradwinkel, Gas- und Bremspedal werden direkt vom Fahrer bedient und in das Fahrzeugmodell gespeist und damit der Fahrdynamiksimulation, dem Steuergerät und der Lichtfunktion zur Verfügung gestellt.

Die Umgebungssimulation basiert analog zu den anderen Testplattformen ebenfalls auf Virtual Test Drive wodurch die funktionale Erlebbarkeit der Lichtfunktion gegeben ist. Durch die Integration der Kameraeinspeisung und des Steuergeräts sind virtuelle Erprobungsfahrten mit Seriensoftwareständen in vielerlei definierbaren Verkehrsszenarien durchführbar.

Limitierungen sind vor allem durch den eingeschränkten Dynamikumfang und Lichtstrom von Projektoren gegeben. Im Fall von Rückprojektionen und bei einem exemplarischen Lichtstrom im Bereich von $\sim 2000 \text{ lm}$ auf eine Fläche von 5 qm , einem Kontrast von ca. $1000:1$ sowie Rückprojektionsscheiben mit einem Gainfaktor von ~ 1 , sind Leuchtdichten in den Größenordnungen etwa 0.1 bis $100 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ darstellbar. Real auftretende Leuchtdichten und hohe Kontraste, wie dynamische Blendungssituationen können lichttechnisch nicht nachgestellt werden.



Bild 6: Fotos einer Nachtfahrt im Porsche Fahrtsimulator mit Serien-Steuergerät.

Ein weiteres wesentliches Kriterium für eine Vergleichbarkeit von Erprobungsfahrt und Fahrsimulator ist das identische Zeitverhalten. Im Fahrsimulator ist kein realer Scheinwerfer verbaut. Die wesentlichen Parameter für die simulierte Lichtverteilung werden direkt den Bussignalen entnommen. Durch die im Vergleich zum Fahrzeug verkürzte Toolkette, wird eine Zeit dt_1 eingespart, die von der Umfeldsimulation und Kameraeinspeisung nicht über- oder unterschritten werden darf.

Um eine weitere Verbesserung der Erlebbarkeit zu erhalten, konzentrieren sich zukünftige Forschungen auf Methoden der kontrastgetreuen Darstellung der eigenen Lichtverteilung und auf die dynamische Darstellung hoher Kontraste.

5. Absicherung der Ausblendungsfunktion

Mit der in Abschnitt vier vorgestellten Hardware-in-the-Loop Architektur ist eine Überprüfung der Ausblendfunktion in Bezug auf direkte (Eigen-)Blendung nicht möglich.

Der für die Wirkkette im Moment der Einspeisung vorherrschende Umfeldzustand ist derjenige der durch die Bildeinspeisung der Kamera präsentiert wird. Dieser kann durch Rendering, Postprocessing und Synchronisationspuffer deutlich von dem Zustand in der Umfeldsimulation abweichen. Der bestehende direkte Zugriff auf die Umfeldsimulation ist somit nicht ausreichend, da die Laufzeit des Signals in der Wirkkette verfälscht wird. Wünschenswert für eine Validierung ist wie in Abbildung 7 dargestellt, der synchrone Abgriff an Einspeisung und Ausgang der Wirkkette. Zu berücksichtigen ist zudem, dass der Zustand der Objekte im gerenderten Bild nur noch implizit enthalten ist.

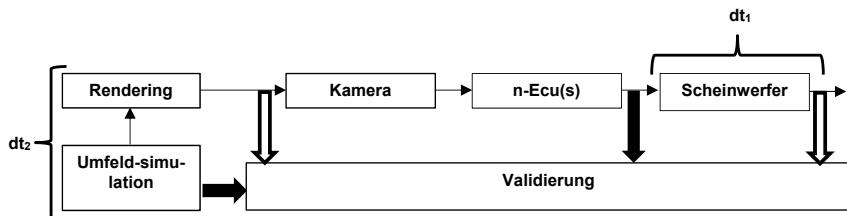


Bild 7: Tatsächlicher (schwarz) und gewünschter (weiß) synchroner Abgriff von Daten zur Absicherung der Ausblendung.

Im Folgenden werden drei mögliche Lösungen für die Einspeiseseite vorgestellt:

a. Abschätzung der zusätzlichen Berechnungszeit bis zur Bildeinspeisung

Die Berechnungszeit dt_2 kann nach Fertigstellung der Toolkette empirisch bestimmt und in der Bewertung durch einen Offset in der Validierung synchronisiert und berücksichtigt werden. Diese Möglichkeit hat den Nachteil, dass auftretende zeitliche Schwankungen in der Berechnungskette nicht erkannt und berücksichtigt werden.

b. Laufende Messung der Berechnungszeit und Synchronisation in nachgelagerter Instanz

Die Berechnungszeit dt_2 der einzelnen Komponenten kann mit jedem Rechenzyklus lokal gemessen und in einer nachgelagerten Instanz synchronisiert werden. Diese Methode erfordert größere Anpassungen in der gesamten Toolkette. Das Problem der lokalen asynchronen Uhren wird damit nicht abschließend gelöst.

c. Validierung durch ein zentrales Messsystem

In dieser Methode sollen Ein- und Ausgänge der Wirkkette physikalisch mit einer Validierungsinstanz verbunden werden. Die notwendigen Zustandsinformationen sollen dabei mittels einer eindeutigen ID in einen Bildpixel codiert werden. Zur Umsetzung sind Hardware- und Softwareanpassungen notwendig.

Lösungsvorschlag (c) befindet sich derzeit in der Umsetzung. Die verkürzte Signallaufzeit dt_1 durch den fehlenden Scheinwerfer kann durch eine empirische Messung bei der Synchronisation berücksichtigt werden.

Zukünftige Forschungen konzentrieren sich auf die Validierung und Bewertung der Leistungsfähigkeit des vorgestellten Konzepts.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Konzepte zur durchgängigen simulativen Absicherung von Lichtfunktionen anhand des V-Modells abgeleitet, sowie derzeitige Vorteile und Limitierungen dargestellt. Für die Absicherung der Ausblendung wird eine Erweiterung der bestehenden HiL-Architektur vorgeschlagen.

Der vorgestellte Prüfstand erlaubt die vorteilhafte Integration von Lichtfunktionen in Software- und Hardware-in-the-Loop und damit die Evaluation der Komponenten und des Systems in verschiedenen Entwicklungsständen. Gütemerkmale zum Benchmarking von Lichtfunktionen, sowie Algorithmen zur Validierung neuer möglicher Funktionen wie Symbolprojektion o.ä. können abgeleitet und evaluiert werden.

Zur Simulation von dynamischen Blendungssituationen an Fahrsimulatoren erarbeiten wir Methoden, welche die lichttechnische Darstellung hoher Kontraste ermöglichen.

- [1] Nentwig, M.; Schieber, R.; Miegler, M.: Hardware-in-the-Loop-Test für vernetzte Fahrerassistenzsysteme, ATZelektronik Nr.6 (04/2011), S.20-25
- [2] Feilhauer, M.; Haering, J.; Wyatt, S.: Current Approaches in HiL-Based ADAS Testing, SAE International Journal of Commercial Vehicles. 9., 2016, S.63-69
- [3] Gerbeth, B.; Schonlau, B.; Wehner, U.: Absicherung von kamerabasierten Fahrerassistenzsystemen im Fahrzeuglabor, ATZelektronik Nr.11 (03/2016), S.42-45
- [4] Schneider, Dr. S.-A.; Frimberger, J.; Folie, M.: Reduzierter Aufwand für dynamische Lichtfunktionen, ATZelektronik Nr.9 (4/2014), S.42-47
- [5] Dröschel, W. (Hrsg.): Das V-Modell 97. Oldenbourg Verlag, München, 1999
- [6] ISO 26262 - Road vehicles - Functional safety. International Organization for Standardization, 2012
- [7] Weitzel, A.; Winner, H.; Peng, C.; Geyer, S.; Lotz, F.; Sefati, M.: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Fahrzeugtechnik (F), vol. 98. Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 2014
- [8] VIRES Simulationstechnologie GmbH: Virtual Test Drive, User Manual. O, 09/2017
- [9] Illuminating Engineering Society, <http://www.ies.org> – 16.03.2018
- [10] Gester, D.; Meyer, J.; Schütze, O.: Optische Assistenzsysteme im HiL-Test. Schärfer testen mit digitaler Brille, ATZextra Simulation und Berechnung Nr.1 (5/2015), S.60-63
- [11] Nentwig, M.: Untersuchungen zur Anwendung von computergenerierten Kamerabildern für die Entwicklung und den Test von Fahrerassistenzsystemen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Diss. 2013
- [12] Bernhard, R.; Krems, I.: Virtueller Fahrerplatz Simulation optimiert Weiterentwicklung von Ergonomie und Nutzerfreundlichkeit, Porsche Engineering Magazin, 02/2016, S.30-35

Systemverifikation hochkomplexer Lichtquellen – Ein notwendiger Schritt auf dem Weg zu hochauflösenden Scheinwerfersystemen

System verification of High Complex Light Sources – A Necessary Step towards High Resolution Headlamps

Dr.-Ing. **B. Kleinert**, Dr.rer.nat. **M. Marutzky**, M.Sc. **T. Uekermann**,
Dipl.-Ing. **S. Bogdanow**, IAV GmbH, Gifhorn;
Dipl.-Ing. **T. Liebetrau**, Dipl.-Ing. **S. Stögner**, Infineon Technologies AG,
Neubiberg

Kurzfassung

Hochkomplexe Lichtquellen werden in künftigen Scheinwerfersystemen immer häufiger zum Einsatz kommen. Sie sind erforderlich, um den gestiegenen Anforderungen zur Umsetzung neuartiger Lichtfunktionen gerecht zu werden. Eine frühzeitige Verifikation dieser Lichtquellen ist aus diesem Grund wünschenswert.

Der folgende Beitrag beleuchtet das Thema der Systemverifikation aus der Perspektive eines Entwicklungsdienstleisters. Zunächst wird auf die Anforderungen eingegangen. Des Weiteren wird der entwickelte Prüfstand beschrieben. Abschließend wird auf die Systemperformance der Lichtquelle eingegangen. Hierbei werden die Alleinstellungsmerkmale der Lichtquelle und der Elektronik, insbesondere die Energieeffizienz, aufgezeigt.

Abstract

High complex light sources will be used in headlamps more frequently in the future. They are necessary to fulfill the increasing requirements for the development of new lighting functions. Therefore, an early verification of these light sources is desirable.

The following paper shows the system verification topic out of the perspective of a development service supplier. First, the requirements are explained. Furthermore, the test bench is described. Finally, the system performance of the light source is set into focus. Here, the unique selling points of the light source and electronics, especially the energy efficiency, is shown.

1. Einleitung

Die Anzahl neuartiger Lichtfunktionen in Kfz-Scheinwerfern nimmt durch den technischen Fortschritt der Lichtquellen rasant zu. Im Jahr 2010 kam erstmals im VW Touareg das „blendfreie“ Fernlicht auf den Markt. [1] Die Umsetzung erfolgt hierbei zunächst mechanisch. Dank innovativer Lichtquellen konnte diese Lichtfunktion 2013 als „LED Matrixbeam“ im Audi A8 rein elektronisch umgesetzt werden. Der nächste Schritt in der Evolution der Lichtquellen führt zum „Multibeam“ Scheinwerfer von Daimler. Mit 84 Pixeln besitzt dieses System eine dreizeilige Matrix. Diese ermöglicht die Umsetzung weiterer Lichtfunktionen. Basierend auf dem Forschungsprojekt „μ-AFS“ wird unter dem Brand EVIYOS™ im nächsten Schritt eine Lichtquelle mit 1024 Pixeln Einzug in neuartige Scheinwerfer finden. [2] Aufgrund der Komplexität dieser Lichtquelle bringt die Systemverifikation für den Einsatz im Automotive-Bereich einige Herausforderungen mit sich.

Dieses Thema greift der folgende Beitrag auf. Zunächst wird auf die Komplexität der Lichtquelle eingegangen. Anschließend werden die Anforderungen und der entwickelte Prüfstand näher beschrieben. Abschließend ist ein Beispiel angeführt. Dieses spiegelt die Performance der Lichtquelle in Verbindung mit der Elektronik und des entwickelten Prüfstands wider.

2. Aufbau der Lichtquelle

Bei der Lichtquelle handelt es sich um eine Verschmelzung aus ansteuernder Elektronik und den lichtemittierenden Komponenten. Eine Fläche von 16mm² und 1024 lichtemittierenden Pixeln mit einem Mindest-Lichtstrom von 3lm pro Pixel bei 11mA sorgen für einen Gesamtlichtstrom größer 3000lm (siehe Abbildung 1). [3] Die gesamte Elektronik und Ansteuerung der einzelnen Pixel ist direkt mit der lichtemittierenden Schicht verbunden. Ein direkter Abgriff von Messgrößen ist daher nicht möglich. Aus diesem Grund werden an die Systemverifikation, bzw. an den dafür erforderlichen Prüfstand spezielle Anforderungen gestellt, die in Kapitel 3 aufgeführt werden.

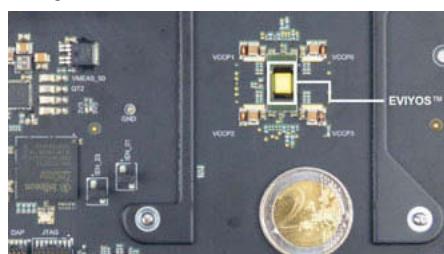


Bild 1: Eviyos™-Chip auf dem Evaluationboard – Zwei Euro Münze zum Größenvergleich

3. Anforderung an die Systemverifikation

Die Systemverifikation erfordert sowohl die Erfassung elektronischer als auch lichttechnischer Messgrößen. Daher muss gewährleistet sein, dass neben den elektronischen Ausgangssignalen der Lichtquelle ebenfalls die lichttechnische Performance überwacht wird. Dies muss sowohl visuell als auch messtechnisch möglich sein. Folglich müssen unterschiedliche Sensoren zum Einsatz kommen, um einen Abgleich von Eingangs- und Ausgangssignal mit der Lichtperformance zu erzielen.

Neben den zuvor genannten übergeordneten Anforderungen an die Systemverifikation muss sie unter den in Tabelle 1 aufgeführten Messbedingungen durchführbar sein.

Zur Gewährleistung der aufgestellten Anforderungen ist ein entsprechender Prüfstand erforderlich, der näher in Kapitel 4 beschrieben wird.

Tabelle 1: Messbedingungen

Kriterium	Vorgabe
Raumtemperatur	$T_{RT} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C} +/- 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Feuchtigkeit	$H_{rel} = 25\% \text{ bis } 75\%$ relative Feuchtigkeit
Testtemperatur	$T_{test}=T_{RT}$
Nominale Betriebsspannung	$V_B=13.5 \text{ V}$

4 Prüfstand zur Systemverifikation

Der entwickelte Prüfstand besteht aus den folgenden Bestandteilen, die nachfolgend näher beschrieben werden:

- Optomechanischer Aufbau
- Hardware
- Software
- Test-Spezifikation und durchführbare Tests

Optomechanischer Aufbau

Der optomechanische Aufbau des Prüfstandes ist in Abbildung 2 dargestellt. Bereich A (siehe Abbildung 1) entspricht dabei der Aufnahmeeinheit zur präzisen Positionierung der Lichtquelle. Zur Verifikation der Lichtperformance gibt es drei Strahlengänge. Diese sind anhand von drei Bereichen (B, C und D) separat markiert (siehe Abbildung 2). Bereich B und C dienen zur messtechnischen Erfassung der Lichtperformance mit Hilfe einer Photodiode (Bereich B) und einer Industriekamera (Bereich C). Bereich D dient zusätzlich zur visuellen Bewertung. Dazu wird das Bild der Lichtquelle auf einen Messschirm projiziert. Die einzelnen Bereiche sind

dabei durch Strahlenteiler getrennt. Zusätzlich sind optische Elemente, wie beispielsweise ein Polfilter und weitere Neutraldichtefilter eingebracht, um die Lichtleistung mit den Sensoren erfassen zu können.

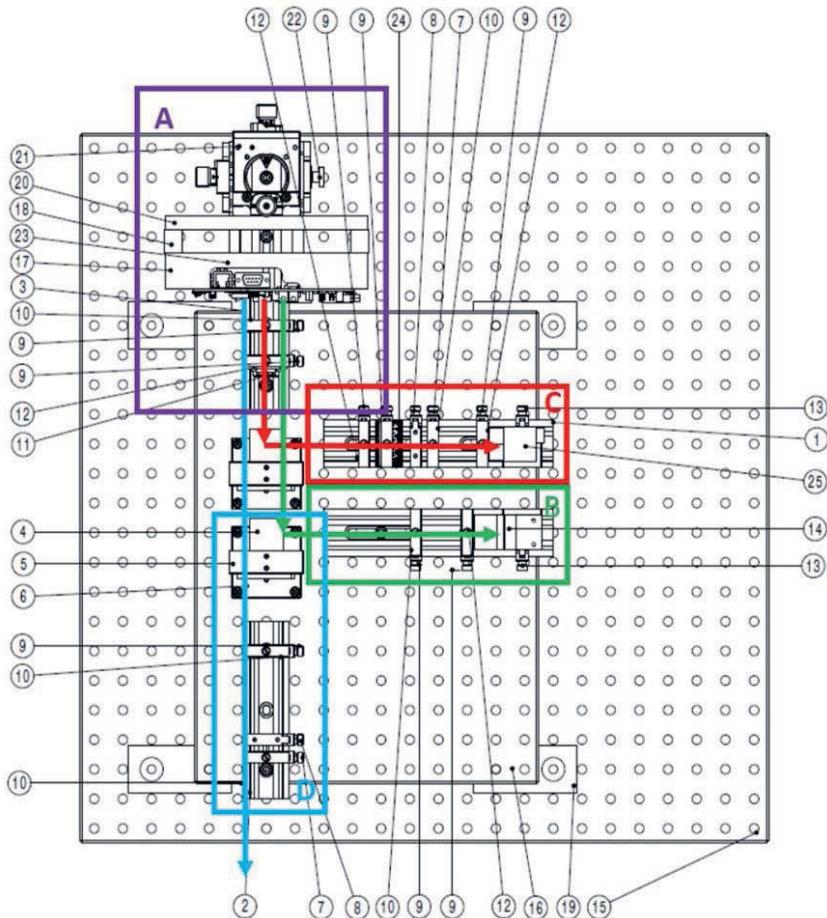


Bild 2: Optomechanischer Aufbau des Prüfstands mit den wesentlichen Bestandteilen (A: Aufnahmeeinheit Lichtquelle; B: Strahlengang zu Photodiode; C: Strahlengang zur Industriekamera; D: Projektion auf den Messschirm)

Hardware

Neben dem zuvor beschriebenen optomechanischen Aufbau werden weitere Komponenten zum Betreiben des Prüfstands benötigt. Insbesondere ist ein extra für die Systemverifikation entwickeltes „Evaluationboard“ erforderlich (siehe Abbildung 3). Das Board enthält einen Eviyos™-Chip, einen AURIX™ Mikrocontroller [4], einen DC-DC Controller (LITIX™) [5], mehrere Schnittstellen (USB, Ethernet, CAN, Debugging) und zusätzliche Komponenten zur flexiblen Konfiguration und Datenaufnahme. Da das Board die Spannungsversorgung für den LED-Chip beinhaltet, sind die Abmessungen deutlich größer als die eines Boards, das für den finalen Anwendungsfall in Licht- und Signaleinrichtungen zum Einsatz kommt. Des Weiteren sind zur Datenerfassung eine Karte von National Instruments und ein Leistungsnetzteil Bestandteil des Prüfstands. Darüber hinaus wurden Software-Komponenten entwickelt, die nachfolgend kurz beschrieben wird.

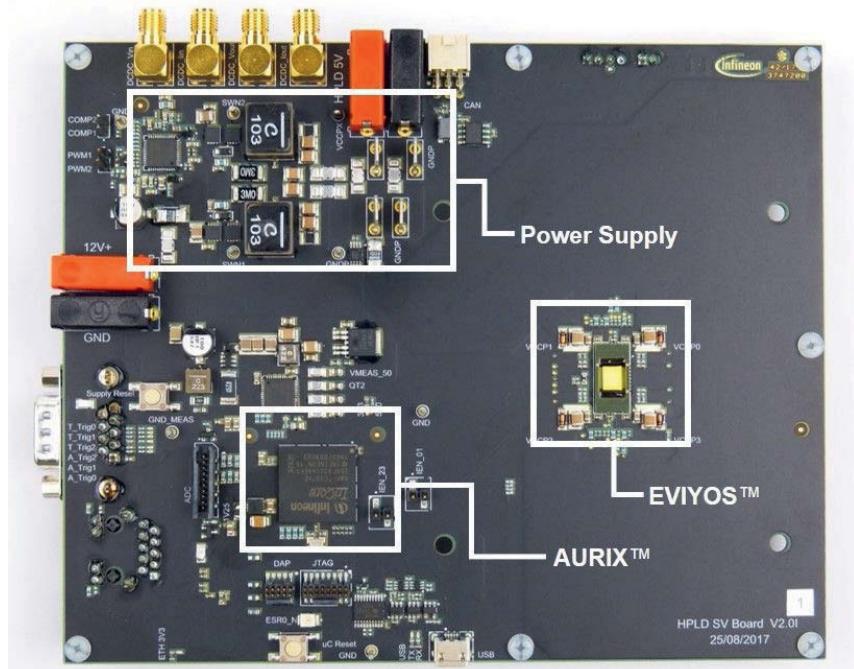


Bild 3: Evaluationsboard mit allen benötigten Schnittstellen und der Lichtquelle Eviyos™

Software

Für den Prüfstand wurden zwei Software-Komponenten entwickelt. Zum einen handelt es sich um eine spezifische Software für den eingesetzten Mikrocontroller der AURIX™-Familie der Firma Infineon. [4] Zum anderen wurde eine speziell darauf abgestimmte Prüfstands-Software unter Einsatz von LabVIEW entwickelt. Diese besitzt eine grafische Benutzeroberfläche, die den Bediener bei der Durchführung von Messungen im Rahmen der Systemverifikation unterstützt (siehe Abbildung 4).

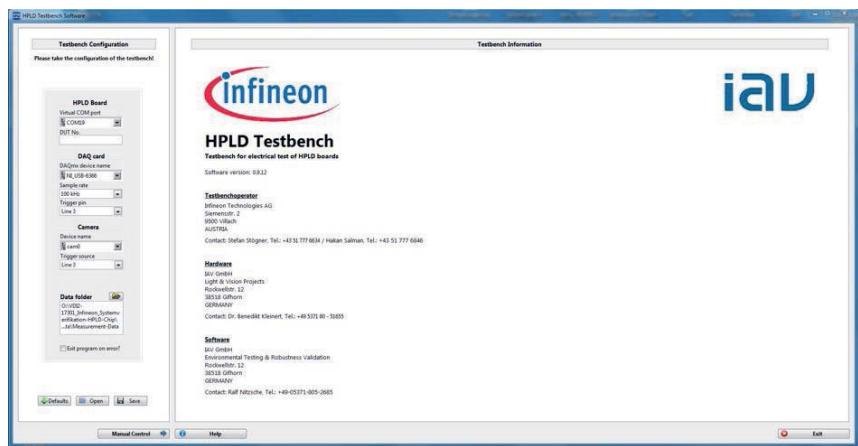


Bild 4: Bedienoberfläche der entwickelten Prüfstands-Software

Test-Spezifikation und durchführbare Tests

Der Prüfstand eignet sich für verschiedene Tests. Diese wurden speziell für die Systemverifikation des Evaluationboards spezifiziert.

Zunächst bietet der Prüfstand die Möglichkeit den Eviyos™-Chip zu charakterisieren. Mit Hilfe der eingesetzten Industriekamera (siehe Bild 3, Strahlengang C) kann eine ortsaufgelöste Aufnahme vom Chip gemacht werden. Die Projektion auf einen Messschirm ermöglicht zusätzlich eine visuelle Prüfung des Chips (siehe Bild 3, Strahlengang D). Fehlstellen der lichtemittierenden Fläche können somit vor den eigentlichen Tests detektiert und reproduzierbar dokumentiert werden. Dies dient zur Qualifizierung für die anderen Tests.

Des Weiteren können Load Step Tests durchgeführt werden. Ziel der Tests ist es, die maximale Anzahl an zuschaltbaren Pixel/Frame zu ermitteln. Somit stellt diese Größe die unabhängige Variable des Tests dar. Die Ripple Spannung des Spannungswandlers, für

welche ein Threshold definiert wurde, ist die abhängige Variable. Zusätzlich werden mit Hilfe der Datenerfassung alle weiteren Signale überwacht und auf Auffälligkeiten geprüft.

In Anlehnung an die Prüfvorschrift LV124 der Automobilindustrie können ebenfalls Transient Pulse Tests durchgeführt werden. Diese Tests dienen insbesondere zur Qualifizierung des Chips und des Mikrocontrollers für den späteren Einsatz im Automotive Bereich und dem vorgesehenen Anwendungsfall in Licht- und Signaleinheiten.

Darüber hinaus sind thermische Tests durchführbar. Durch gezielte Manipulation des Thermomanagements wird untersucht, welchen Effekt unterschiedliche thermische Grenzwerte und der Ausfall von Komponenten (z.B. Aktiv- und Passivkühlung) auf das Systemverhalten haben.

5. Beispiel der Systemverifikation

An dieser Stelle wird ein Beispiel zur Verifikation der Lichtquelle und deren Ansteuerelektronik gezeigt. Es wird ein durchgeführter Load Step Test (siehe auch Kapitel 3) aufgegriffen, der das Systemverhalten und den Bildaufbau des Chips näherbringt.

Der Bildaufbau erfolgt mäanderförmig, da ein gleichzeitiges Einschalten aller LED auf Grund des hohen di/dt sowohl für die Spannungsversorgung des Eviyos als auch aus EMI Sicht vermieden werden sollte. ist. Die Anzahl an Pixel/Frame ist über das Interface der Prüfstands-Software einstellbar. Wird eine niedrige Anzahl an Pixel/Frame gewählt, so kann es bei hohen Duty Cycles (DC) zu ungewünschten Effekten kommen. Daher sollte die optimale Anzahl an Pixel/Frame in Abhängigkeit des jeweiligen DC ermittelt werden. In einem theoretischen Fall in dem alle LEDs mit DC=75% und einer Auflösung von 8 Bit angesteuert werden, wird dies deutlich sichtbar. Um alle LED innerhalb der 256 Frames mit nur 2 Pixel/Frame mit 75% zu betreiben muss in diesem Fall nach 64 Frames die Zuschaltung der restlichen LED abrupt erfolgen. Dies ist am Ausgangstrom des Spannungswandlers, wie auch am Ausgangssignal des Photosensors deutlich erkennbar (siehe Abbildung 5). Beide Kurven haben einen qualitativ gleichen Verlauf. Die Markierungen zeigen in beiden Kurven den vertikalen Anstieg, der durch das plötzliche Zuschalten der restlichen Pixel bedingt ist.

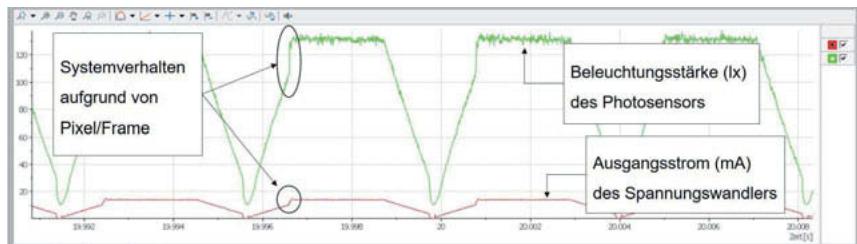


Bild 5: Graph eines Load Step Tests (DC=75%, Pixel/Frame=2) mit dem resultierenden Ausgangsstrom des Spannungswandlers und der gemessenen Beleuchtungsstärke am Photosensor, (Markierung: Steile Flanke aufgrund des plötzlichen Zuschaltens der restlichen Pixel)

6. Diskussion

Im Rahmen der Systemverifikation wurden alle unter Kapitel 3, Absatz „Test-Spezifikation und durchführbare Tests“ aufgelisteten Versuche durchgeführt. Bei keinem der Tests wurden Ausfälle des eingesetzten Evaluationboard detektiert. Vorrangig sind hiermit die Lichtquelle Eviyos™ und die eingesetzten Elektronikbausteine, wie der Mikrocontroller AURIX™ zu verstehen. Somit ist deren Tauglichkeit für den geplanten Einsatz in Licht- und Signaleinrichtungen unter den getesteten Bedingungen nachgewiesen. Zusätzlich zur Absicherung konnten anhand der erzielten Ergebnisse weitere Optimierungen abgeleitet werden. Durch die gezielte Wahl an Pixel/Frame in Abhängigkeit des jeweils erforderlichen Duty Cycles können ungewollte Spitzen des Ausgangsstroms am Eviyos™-Chip vermieden werden. Zudem belegen die erzielten Ergebnisse, dass sowohl über die elektrischen Ausgangssignale als auch über die photometrischen Größen eine Aussage über das Systemverhalten getroffen werden kann. Dies erbringt den Nachweis, dass sich der eingesetzte Prüfstand inklusive der Sensoren und der dafür entwickelten Softwarepakete eignet, um das Systemverhalten fein aufgelöst zu erfassen.

7. Zusammenfassung

Auf dem Weg zu hochauflösenden Scheinwerfern mit immer komplexeren Lichtquellen ist die Systemverifikation ein wichtiger Schritt.

Die Eignung der Lichtquelle und der zugehörigen Elektronik konnte anhand der durchgeföhrten Tests für den geplanten Einsatz in Licht- und Signaleinrichtungen unter den festgelegten Bedingungen nachgewiesen werden. Bei keinem der Tests, auch unter Extremsituationen

ohne thermische Abschaltung, kam es zu Ausfällen des Systems. Die eingesetzte Elektronik bringt dabei weitere Vorteile mit sich [6].

Der von IAV speziell dafür entwickelte Prüfstand mit den Software-Paketen ermöglicht es, gezielt das Systemverhalten von Elektronik und Lichtquelle zu untersuchen. Die Besonderheit ist der mögliche Abgleich von Eingangs- und Ausgangssignalen mit der resultierenden Lichtperformance. Somit kann frühzeitig analysiert werden, welchen Einfluss Änderungen der Eingangsparameter auf das spätere Lichtbild auf der Straße haben.

9. Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden in einem gemeinsamen Projekt mit der Infineon Technologies AG erzielt. Der Dank gilt daher allen beteiligten Projektmitgliedern, die zur erfolgreichen Umsetzung des Projektes beigetragen haben.

- [1] Amsel, Ch.; Florissen, G.; Pietzonka, S.: Die nächste Generation lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme, In: ATZ 112. Jahrgang (2010), Nr. 10/2010, S. 758–763.
- [2] BMBF-Verbundprojekt: Integrierte µ-strukturierte Leuchtdioden als intelligente Lichtquellen für neuartige adaptive Frontscheinwerfersysteme: Abschlussbericht: µ-AFS micro-structured Adaptive Front-lighting System, FK 13N12514, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg, 2017
- [3] OSRAM, LED-Prototyp der Eviyos revolutioniert intelligente Scheinwerfer, Pressemitteilung, 25.09.2017, (https://www.osram.com/os/press/press-releases/eviyos_led_prototype_revolutionizes_smart_headlights.jsp), aufgerufen am 25.04.208
- [4] Infineon Technologies AG, AURIX™ 2nd Generation – TC3xx, <https://www.infineon.com/cms/en/product/microcontroller/32-bit-tricore-microcontroller/aurix-safety-joins-performance/aurix-2nd-generation-tc3xx/>, aufgerufen am 25.04.2018
- [5] Infineon Technologies AG, LITIX™, <http://www.infineon.com/litix>, aufgerufen am 25.04.2018
- [6] Liebetrau, T.: Robust end efficient electrical system concept for high resolution ADB systems, 18th Intelligent Automotive Lighting 2018 (IQPC), Bonn

Animierte Leuchten-Funktionen: "Spielereien" als Vorreiter visueller Car-to-X Kommunikation

Animated Signal Functions: "Gimmicks" Paving The Way to Visual Car-to-X Communication

Dipl.-Phys.oec. **M. Ritter**, Dipl.-Ing. **C. Adikari**,
Dipl.-Phys. **M. Richter**, Automotive Lighting, Reutlingen

Kurzfassung

Animierte Blinker und Begrüßungs-Leuchten sind erfolgreich am Markt angekommen und unterstreichen dort den Anspruch der Automarken an Ästhetik und fortschrittliche Technik. Da der sequentielle Fahrtrichtungsanzeiger inzwischen durch das UN Regelwerk beschrieben ist, steht dessen Verbreitung im Massenmarkt nichts mehr im Wege. Gleichzeitig weisen immer mehr Show-Cars animierte Elemente in der Außenbeleuchtung auf.

Die LED als Lichtquelle spielt hierbei eine besonders wichtige Rolle, vor allem falls sich mehrere Farben ein optisches System teilen: Während beispielsweise eine DRL-Signatur möglichst homogen sein soll, möchte man den Blinker möglichst fein aufgelöst animieren können. In den Visions-Studien der Autohersteller werden komplexe Animationen dargestellt, welche Endkunden bislang primär in der Consumer-Elektronik vorfinden. Hier wird eine vermeintlich schnelle Evolution in Richtung Car-2-X Kommunikation aufgezeigt, welche tatsächlich noch weit von derzeitigen Regularien entfernt ist: was bei Signalleuchten über einen sequentiellen Blinker hinaus geht, kann derzeit nur außerhalb der Straßenverkehrsordnung genutzt werden.

Um visuelle Kommunikation mit der Außenwelt zu ermöglichen, könnten zukünftig neue, adaptive Leuchten-Funktionen entwickelt werden, welche sich in Echtzeit an die Verkehrssituation anpassen. Hierzu würden alle im Fahrzeug gebündelten Daten verwendet werden, die aus der Kombination von Sensoren aller Art (inkl. Kameras mit Bilderkennung) sowie Cloud-Anbindung zur Verfügung stehen. In einem Muster-Aufbau sollen die Aspekte zweifarbig leuchtende Lichtquelle sowie komplexe Animation dargestellt werden.

Die Herausforderung wird sein, Marketing-Features innerhalb eines gesetzlich sinnvollen Rahmens zu einer Sicherheitseinrichtung für autonomes Fahren weiterzuentwickeln, ohne eine Reizüberflutung der Verkehrsteilnehmer zu riskieren.

Abstract

Progressive turn signal lamps and animated “welcome light” elements have been successfully introduced into the market, with premium brands emphasizing their styling cues. Technological leadership is highlighted with ambient lighting and special lighting features. With UN regulations having been adapted regarding the sequential turn function, mass volume cars are now following this trend, and carmakers are realizing more and more animations in their show-cars.

Especially where DRL and TI share an optical system, there often are conflicting goals: Absolute homogeneity of a DRL signature vs. being able to animate many segments of the TI function.

By showcasing their visions of car-to-x communication, carmakers offer an outlook that seems to be an easy step forward. But as current regulations only accept very specific animations and colors, “welcome lights” and alike are only to be used outside legal constraints. Hence, the evolution from a marketing instrument to a regulated safety feature will be a challenging one: Can autonomous traffic be safer with additional visual signals whilst preventing sensory overload for road users?

1. Einleitung

Sequentielle Fahrtrichtungsanzeiger sind bereits seit 2013 in Rückleuchten am Markt, 2014 zogen erste Scheinwerfer nach. Seither wurden die gesetzlichen Rahmenbedingungen für solche Leuchten innerhalb der UN-Regelungen [2] klar definiert, was deren Einsatz zur Produktaufwertung für immer mehr Hersteller attraktiv macht.

Gleichzeitig werden die verbauten Steuergeräte immer leistungsfähiger, was ausgefeilte Zusatzfunktionen ermöglicht, wie markenspezifische Coming-/Leaving-Home-Animationen in unterschiedlichen Farben.

Wir erleben einen generellen Trend hin zur Digitalisierung und Personalisierung, der im Fahrzeug-Innenraum durch die Verschmelzung von Unterhaltungselektronik und Fahrzeug-Steuerung bereits spürbar wird. Entsprechende technische Ansprüche werden auch für die Exterieur-Beleuchtung gelten, auch wenn dort andere Rahmenbedingungen gelten.

Dabei steigen die Anforderungen an die optischen Bauteile entsprechend: Die Hersteller erwarten mindestens die gewohnte Effizienz und Homogenität, wollen dabei aber möglichst viele Segmente möglichst frei animieren. Auch farblich wird Vielfalt gewünscht - wobei der Kombination aus Weiß und Gelb natürlich die bedeutendste Rolle zukommt, um die Lichtsignatur des Fahrzeugs in möglichst vielen Lichtfunktionen darstellen zu können und um den

funktionell benötigten Bauraum zu minimieren. Zur Entschärfung des vorgenannten Zielkonfliktes können mehrfarbige LEDs einen Beitrag leisten, da dort der Abstand zwischen den Brennpunkten der jeweiligen Lichtquelle am geringsten ist [vgl. 4].

Mehr Freiraum für Designer lässt sich außerhalb gesetzlicher Funktionen finden, z.B. in Form von Begrüßungs-Leuchten, deren subtile Animationen beim Auf- und Zuschließen des Fahrzeugs einen hochwertigen Eindruck beim Nutzer hinterlassen.

Car-to-X-Kommunikation könnte nun ganz neue Leuchten benötigen, mit denen raffinierte Animationen auch im öffentlichen Straßenverkehr denkbar werden. Dementsprechend zeigen viele Show-Cars der großen Hersteller Visionen hierzu, mit farbenfrohen Signaturen, über komplexe Animationen bis hin zu komplett animierten, Display-ähnlichen Animationsflächen, die mit dem Umfeld interagieren. Einige Beispiele hierzu sind im Bild 1 dargestellt.



Bild 1: Konzept-Studien [5], von oben links nach unten rechts:

Mercedes F 015, BMW Vision Next 100, Audi e-tron concept, Volkswagen Sedric

Auch wenn solche Ideen mit den derzeitigen Regelungen noch nicht in Einklang zu bringen sind, werden autonome Fahrzeuge mit den anderen Verkehrsteilnehmern kommunizieren müssen. Daher werden entsprechende gesetzliche Vorgaben hierzu bereits eingehend diskutiert.

2. Intelligent Signaling System (ISS)

Um verschiedenste Szenarien selbst darstellen zu können, wurde bei *Automotive Lighting* ein Leuchten-Muster erstellt, welches aus 32 Vorsatzoptiken auf zwei Zeilen aufgebaut ist, unter denen jeweils eine Bi-Color-LED angebracht ist. Damit ergeben sich 64 einzeln ansteuerbare Chips und eine quasi unendliche Anzahl möglicher Animations-Szenarien. Für ein ansprechendes Erscheinungsbild sorgt neben dem Design des Musters auch ein Lichtaustritt aus volumenstreuendem Material, welcher zudem die Animationen weicher macht.



Bild 2: Rendering des Leuchten-Musters „ISS“

Mit weißen und gelben LEDs bestückt, lassen sich die „klassischen“ Leuchtenfunktionen wie Tagfahrlicht und Blinker darstellen. Bereits beim sequentiellen Fahrrichtungsanzeiger lassen sich gut die Einflüsse der Segmentanzahl sowie der jeweiligen Dimm-Profile auf die Qualität der Animation darstellen.

Des Weiteren soll das ISS auch bei der Darstellung und Untersuchung weiterer Farben, wie z.B. im Rahmen dedizierter Leuchten für das autonome Fahren, Anwendung finden. Hierfür werden PCBs mit speziellen Muster-LEDs von *Seoul Semiconductor Co., Ltd.* aufgebaut, bei denen ein Chip der Bi-Color LED türkises Licht ausstrahlt.

Das Muster ist darauf ausgelegt, Animationen schnell darstellen und untersuchen zu können, weshalb die Animations-Abläufe über eine kabellose Benutzeroberfläche angesteuert und auch bearbeitet werden können. Darüber hinaus können Bewegungssensoren angebracht werden, um eine erste Stufe menschlicher Interaktion darstellen zu können.

Um komplexere Zeichen wie Pfeile und Buchstaben darstellen zu können, braucht man im Allgemeinen mehr als zwei Zeilen. Das Muster zeigt aber auf, wie viele Signale bereits mit vermeintlich geringer Auflösung durch Animationen übertragen werden können. Im Folgenden sollen einige dieser Ideen als zeitlicher Ablauf skizziert werden, angefangen mit bereits heute realistischen Abläufen.

Bild 3: Sequentielle Fahrtrichtungsanzeiger

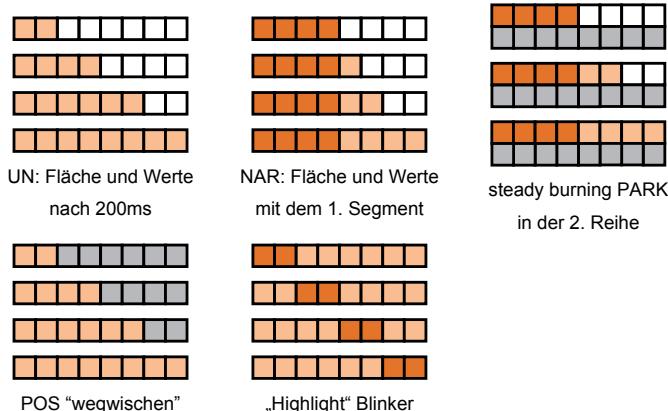
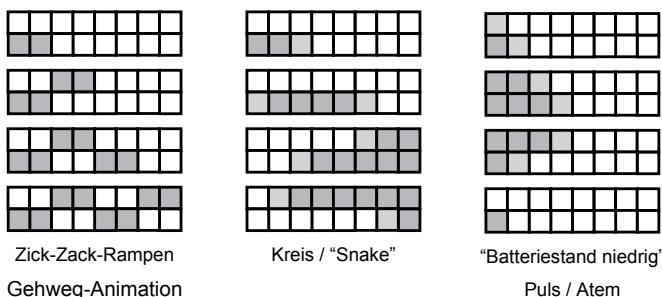


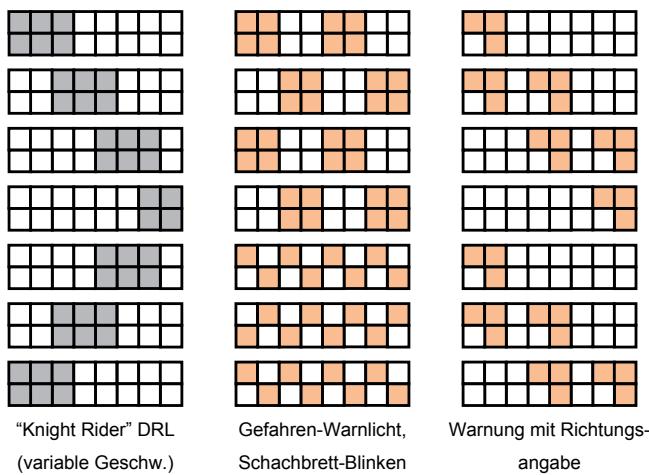
Bild 4: Ideen zum Begrüßungslicht



Es ist offensichtlich, dass nicht jede Animation Sinn ergibt, wenngleich außer Frage steht, dass manche Animationen einen Mehrwert gegenüber herkömmlichem Blinken bieten können. Ein schnelleres Blinken wird für gewöhnlich eindringlicher empfunden als ein langsameres und weichere Übergänge wirken im Allgemeinen natürlicher. Manche Animationen, wie z.B. das „Atmen“ von Unterhaltungselektronik im Stromsparmodus, können intuitiv verstan-

den werden - andere sind gemeinhin bekannt, wie das rote Lichtband („Scanner“) des vermutlich bekanntesten autonomen Fahrzeugs „KITT“ in der Fernsehserie „Knight Rider“ aus dem Jahre 1982 [6].

Bild 5: Ideen für zukünftige Signalleuchten



Das Beispiel einer alten westlichen TV-Serie macht aber auch deutlich, dass Animationen keine allgemeingültige Sprache darstellen, die automatisch von allen Verkehrsteilnehmern gleich verstanden wird. Daher muss in den Regelwerken definiert sein, welche Funktionen wichtig genug sind, um diese gezielt und bei allen Fahrzeugen gleichartig hervorzuheben. Ansonsten können etwaige Warnungen aufgrund von Missverständnissen oder Reizüberflutung untergehen.

3. Gesetzlicher Rahmen

UN R6 Rev. 6 Kapitel 5.6 beschreibt die „sequential activation of light sources“ [2] für Fahrtichtungsanzeiger sehr genau:

- each light source (...) shall remain lit until the end of the ON cycle*
- uniform sequential manner from inboard (...) to outboard (...)*
- one continuous line*
- 200 ms after beginning of ON cycle*
- ratio of horizontal to vertical side 1.7*

Da in Nordamerika [3] Animationen noch nicht explizit reguliert werden, gilt im Allgemeinen die sicherste Interpretation, dass jede Funktion sowohl Lichtwerte als auch Flächenanforderungen zu jeder Zeit erfüllen muss. Somit sind Animationen nicht verboten, deren Umsetzung hängt aber an vielen Voraussetzungen, wie z.B. ausreichend Fläche am Fahrzeug.

Damit können die meisten Animationen derzeit nur außerhalb der Straßenverkehrsordnung zur Anwendung kommen. Allerdings erhoffen sich viele Fahrzeughersteller, dass sich dies im Zuge der herbeigesehnten autonomen Revolution ändern könnte. Aus diesem Grund stehen die Gesetzgeber in einem gewissen Zugzwang, diesem neuen Anwendungsfeld sinnvolle Rahmenbedingungen aufzuerlegen.

Es bleibt eine grundlegende Frage, ob komplexe Animationen Teil der Gesetzgebungen sein werden. Dies könnte explizit erfolgen, wie beim sequentiellen Blinker, oder indirekt, indem etwas Gestaltungs- und Interpretationsraum gewährt wird. Manche Sequenzen werden intuitiv verstanden - dennoch könnte es der Sicherheit zuträglich sein, einen universell-minimalistischen Ansatz zu verfolgen. Dies gilt auch für die Frage, ob neue Farben neben Weiß und Gelb für Leuchten im autonomen Fahrbetrieb eingeführt werden sollen.

Auch wo am Fahrzeug eine solche ADS Leuchte [1] platziert werden könnte, gilt es festzulegen – zum Beispiel zentral in der Front des Fahrzeugs, was gut zu den Prototypen der Hersteller passen würde. Wie man in Abb. 1 sieht, könnte das Design einer solchen Leuchte das Marken-Image sowie die spezifische Fahrzeug-Signatur unterstreichen. Dem wird ein noch größeres Gewicht zukommen, falls sich Automarken zukünftig nicht mehr durch ihre Antriebsstränge differenzieren können, sondern umso mehr Wert auf Styling, Personalisierung und Software legen müssen.

4. Ausblick: Sensoren und Big Data

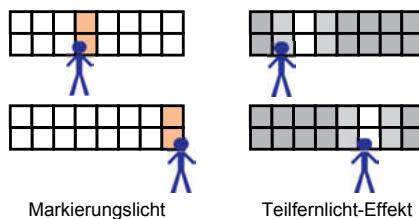
Die im Fahrzeug vernetzten Recheneinheiten werden die gesammelten Daten kombinieren und analysieren können, und dadurch viele Informationen erfassen, wie z.B.

- die Position des identifizierten Nutzers, dessen Kleidungsfarbe, Gesichtsausdruck, ...
- die Position des Fahrzeugs (GPS), das Wetter, anstehende Kalender-Einträge, ...
- Fahrzeug-Informationen wie Batterie-Ladezustand, autonomer Fahrmodus, ...

und vieles mehr. Davon abhängig können dann alle variablen Parameter im Scheinwerfer gesteuert werden, wie z.B.

- welche Segmente wie lange und wie hell aktiviert werden
- welche Farbe welche Segmente haben sollen
- welche adaptive Animation dargestellt werden soll, wie im Folgenden skizziert:

Bild 6: Adaptive, sensor-basierte Animation



Durch solche Sensor-basierten Animationen lässt sich eine natürliche Interaktion der Verkehrsteilnehmer mit dem Fahrzeug realisieren, für die kein mobiles Gerät mehr notwendig ist. Spätestens dann kann von „Spielerei“ keine Rede mehr sein, sondern von sicherheitsrelevanter Car-to-X Kommunikation.

5. Zusammenfassung

Aktuelle animierte Leuchten und deren gesetzliche Grundlagen wurden dargestellt, woraufhin ein Ausblick auf deren mögliche Weiterentwicklungen gegeben wurde.

Animationen können attraktiv und intuitiv wirken, sie können aber auch ablenkend und übertrieben sein. In Kombination mit den Sensoren am Fahrzeug sind die denkbaren Möglichkeiten nahezu endlos – vom Kostenrahmen abgesehen.

Derzeitige Regulationsgremien scheinen eher eine Evolution als eine Revolution anzustreben, um eine Reizüberflutung der Verkehrsteilnehmer von vornherein zu verhindern.

Dabei bleibt das gemeinsame Ziel, sicherheitsfördernde Lichtfunktionen mit einem ansprechenden Design zu vereinen. Dies wird die Entwicklung fortschrittlicher Leuchten-Konzepte anstoßen, welche neue Interaktionen mit dem Fahrzeug und seiner Umgebung ermöglichen.

- [1] Lagström, T. & Lundgren, V.M.: "AVIP - Autonomous vehicles' interaction with pedestrians", Master of Science Thesis in the Master Degree Program Industrial Design Engineering, CHALMERS University Of Technology, Gothenburg, Sweden 2015
- [2] UN (ECE) Regulation No. 6 Rev.6: Uniform provisions concerning the approval of direction indicators for power-driven vehicles and their trailers
- [3] Federal Motor Vehicle Safety Standard FMVSS 108 (lighting functions)
- [4] Adikari, C. & Tölle, P.: "Color inhomogeneity in future signal functions – LED as root cause", Proceedings of the Conference ISAL 2017, Darmstadt
- [5] Fotos von Messen und Hersteller-Webseiten (2017)
- [6] https://de.wikipedia.org/wiki/Knight_Rider#K.I.T.T., abgerufen am 17.04.2018

Realisierungsmöglichkeiten für hochauflöste Umfeldprojektionen im Automobil

Bewertung unterschiedlicher Technologien

Realization possibilities for high-resolution near-field projections in automobile

Evaluation of different technologies

M.Sc. **Christopher Bremer**,

BMW AG, München, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe;

Prof. Dr. rer. nat. **Cornelius Neumann**,

Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe;

Dipl.-Ing. **Burkhard Lewerich**,

BMW AG, München

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Motivation für die Umsetzung von dynamischen Lichtprojektionen sowie Anforderungen an diese beschrieben. Darüber hinaus werden potenzielle Technologien vorgestellt, und hinsichtlich der Kriterien Beleuchtungsstärke, Bauraum, Auflösung und Augensicherheit bewertet. Aufgrund dieser Bewertung können Lösungen verglichen und die zielführendsten Systeme gewählt werden.

Abstract

This paper describes the motivation for novel, dynamic projections and the requirements for it. In addition, potential technologies are presented and evaluated with regard to the criteria of efficiency, construction space, resolution, and eye safety. This assessment enables projectors to be compared and the most promising systems to be chosen.

1. Motivation

Neue Konzepte und Weiterentwicklungen verschiedener Lichtfunktionen bedürfen neuartiger Technologien. Durch die Entwicklung des autonom-fahrenden Fahrzeuges, gibt es diverse Szenarien, die eine Mensch-Maschine-Interaktion erweitern sollen. Eine Option ist die Kommunikation zwischen den Verkehrsteilnehmern via Projektionen auf der Straße [1]. Dabei könnten die beabsichtigten Aktionen eines Fahrzeuges durch Symbole wie Pfeile oder Striche

etc. auf die Straße projiziert werden [2]. Darüber hinaus könnten zusätzliche Funktionen, zum Interagieren dargestellt werden. Trittfächen zum Öffnen der Türe oder des Kofferraumes sind dabei nur zwei Möglichkeiten. Ebenso sind gestalterische Aspekte, dynamische und individualisierte Begrüßungsszenarien denkbare Optionen.

Dennoch gibt es aktuell keine für die automotive Anwendung industrialisierte Technologie, die Großteile dieser Funktionen übernehmen kann.

2. Stand der Technik

Die BMW Group ist seit 2015 mit dem MINI Clubman und dem BMW 7er erstmalig mit unterschiedlichen Projektionstechnologien in der Lage, in dem direkten Vorfeld eines Fahrzeuges ein Logo oder eine Grafik darzustellen. Die im MINI verwendete Technologie ist einem DIA-Projektor sehr ähnlich. Der Aufbau besteht aus einer LED, einer Kollimationslinse, einem DIA und einer Projektionslinse. Der Anbauort befindet sich im Außenspiegel. Weitere Automobilhersteller nutzen ebenfalls diese Technologie, um ein Logo oder eine Grafik in die direkte Nähe des Fahrzeugs zu projizieren. Im BMW 7er wird eine Streifengrafik aus dem Schweller entlang des Fahrzeugs abgebildet. Die Anforderungen sind in zweierlei Hinsicht extrem: der geringe Bauraum und die Notwendigkeit nach sehr hoher Tiefenschärfe aufgrund der schrägen Projektion [3]. Diese Anforderungen werden durch ein Mikrolinsenarray (MLA) erfüllt. Dieses System besteht aus einer LED, einem Kollimator und dem MLA-Chip, dessen Maße ca. $10 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$ sind. Das Modul besteht aus einer Vielzahl an Projektionskanälen (> 100 Kanäle), die auf der Straße ein Gesamtbild erzeugen.

Der projizierte Inhalt ist dabei jedoch statisch. Eine Teildynamik kann durch eine Abfolge mehrerer statischer Projektionen generiert werden. Dabei könnten unterschiedliche LEDs verschiedene Bereiche des MLAs beleuchten und somit jeweils andere Grafiken auf der Straße erzeugen [4]. Durch eine intelligente Schaltung der LEDs würde ein dynamischer Eindruck entstehen oder verschiedene Funktionen dargestellt werden.

3. Anforderungen an die dynamische Projektion

Damit die Projektionen ihren Zweck erfüllen können, werden Anforderungen für folgende Kriterien abgeleitet:

- Beleuchtungsstärke
- Auflösung
- Bauraum des Projektors
- Augensicherheit.

Darüber hinaus sollte der Projektor eine möglichst hohe Effizienz vorweisen, um thermische Probleme bei der Nutzung zu vermeiden.

Die Sichtbarkeit von projizierten Inhalten hängt stark von der Umgebungshelligkeit ab. Entscheidend ist der Kontrast zwischen Symbolleuchtdichte L_s und Umgebungsleuchtdichte L_u : $C = (L_s - L_u)/L_u$. Außerdem sind die Eigenschaften der Projektionsfläche ein wichtiger Faktor zur Bestimmung der minimalen Beleuchtungsstärke. Um die Beleuchtungsstärken berechnen zu können, wird die Straße als Oberfläche mit einer Lambert'schen Streucharakteristik und einem Reflexionskoeffizienten von $\rho = 0,07$ angenommen. Der Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke ergibt sich zu $E_u = \frac{L_u \cdot \pi}{\rho}$. Die Abhängigkeit zwischen Umgebungsbeleuchtungsstärke und minimal benötigter Beleuchtungsstärke ist in Bild 1 dargestellt [5].

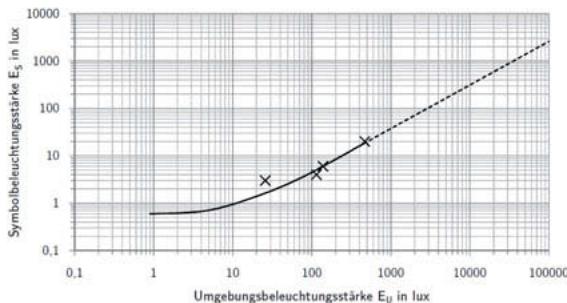


Bild 1: Zusammenhang zwischen Umgebungsbeleuchtungsstärke E_u und minimal erforderlicher Symbolbeleuchtungsstärke [5].

Das Ziel ist, dass die Projektion ab der Dämmerung sichtbar sein soll. Die Umgebungsbeleuchtungsstärke E_u beträgt somit 750 lux [5]. Aus Bild 1 ergibt sich folglich eine minimale Symbolbeleuchtungsstärke von 35 lux. Damit die Projektion gut sichtbar ist, wird die minimale notwendige Symbolbeleuchtungsstärke mit dem Faktor von 3 multipliziert. Somit ergibt sich ein Richtwert für die notwendige Beleuchtungsstärke von ca. 100 lux.

Damit möglichst viele Funktionen dargestellt und eine Dynamik erzeugt werden kann, ist eine hohe Auflösung der Projektion essentiell. Idealerweise lassen sich für eine Person im Abstand zwischen einem und zehn Metern von der Projektion die einzelnen Pixel nicht mehr auflösen.

Bei der Annahme, dass diese Person eine Körpergröße von 1,8 m hat und das Auflösungsvermögen des Auges bei ca. zwei Winkelminuten liegt, ergibt sich in einem horizontalen Abstand von einem Meter eine auflösbare Pixelgröße von ca. 1,4 mm. Jedoch wird hierbei nicht die Oberflächenrauigkeit der Straße mit einbezogen. Die notwendige Pixelgröße wurde in einer Expertenstudie evaluiert und ergab $3 \times 3 \text{ mm}^2$ [6].

Rund um das Fahrzeug gibt es eine Vielzahl an möglichen Projektionsfeldern und somit unterschiedliche Anbauorte. Beispiele hierfür sind der Außenspiegel, im Scheinwerfer, in der Position der Nebelscheinwerfer oder im Bereich des Schwellers. Je nach Position gelten andere Rahmenbedingungen. Für den Schweller ist beispielsweise eine maximale Ausdehnung von ca. zehn cm in einer Dimension tragbar, die beiden anderen Dimensionen müssen jedoch kleiner als vier cm sein.

Jegliche Projektionen sollten während der Fahrt sowie im Stand nutzbar sein. Daher ist die Augensicherheit für die Projektoren ein wichtiges Thema. Je nach Lichtquelle sollten die Projektoren die Grenzwerte der „Photobiologischen Sicherheit von Lampen und Lampensystemen“ respektive „Laserklasse 2“ nicht überschreiten und Augensicher sein [7].

4. Überblick über verschiedene Technologien und Bewertung

Um hochauflösende Inhalte auf die Straße zu projizieren, stehen verschiedene Systeme zur Verfügung. Dabei unterscheiden sich die unterschiedlichen Projektoren in der Lichtquelle und dem bildgebendem Element. Bei letzteren handelt es sich um:

- Liquid Crystal Display (LCD)
- Liquid Crystal on Silicon (LCoS)
- Digital Micromirror Device (DMD)
- Mikrospiegel.

Bei den abbildenden Systemen (LCD, LCoS, DMD und Phosphorkonvertierter Laserscanner) wird für die Projektionsoptik jeweils eine F-Zahl = 2 angenommen. Diese Wahl ist ein Kompromiss aus Bauraum, möglichst Sammelwinkel und Bildqualität.

4.1 LCD

Der Aufbau dieses Projektionssystems ist schematisch in Bild 2 dargestellt.

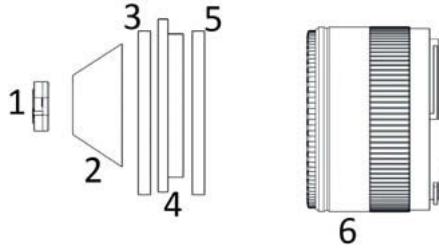


Bild 2: Schematischer Aufbau eines LCD-Projektors

Der Projektor besteht aus einer Lichtquelle (1), einem Kollimator (2), einem Polarisator (3), dem LCD-Panel (4), einem Analysator (5) und einer Projektionsoptik.

4.1.1 LCD – Effizienz, Bauraumbetrachtung und Beleuchtungsstärke

Für die Effizienz des Projektionssystems gilt:

$$\eta_{\text{Projektionssystem}_{LCD}} = \eta_{\text{Kollimator}} \cdot \eta_{\text{Polarisator}} \cdot \eta_{\text{LCD Panel}} \cdot \eta_{\text{Analysator}} \cdot \eta_{\text{Projektionslinse}}$$

Dabei ist zu beachten, dass Effizienz des Kollimators, des LCD-Panels und der Projektionslinse Größenabhängig sind. Im zunächst betrachteten Fall wird für den Kollimator eine refraktive Optik verwendet (TIR-Optik kann als Optimierung in Betracht gezogen werden). Somit berechnet sich die Effizienz aus den Fresnelverlusten (η_{Fresnel}) bei den optischen Übergängen und dem Anteil des eingesammelten Lichtstromes. Bei einer Lichtquelle mit Lambert'scher Abstrahlcharakteristik ergibt sich (mit dem maximalen Sammelwinkel β):

$$\eta_{\text{Sammel}} = \frac{\phi_{\text{Kollimator}}}{\phi_{\text{Gesamt}}} = \frac{\int_0^{\beta} \int_0^{2\pi} I_0 \cdot \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} I_0 \cdot \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = \sin(\beta)^2.$$

Dabei ist $\phi_{\text{Kollimator}}$ der Lichtstrom, der von dem Kollimator erfasst wird, und ϕ_{Gesamt} der gesamte Lichtstrom, der von einer Quelle mit Lambert'scher Abstrahlcharakteristik emittiert wird.

Die Effizienz des Kollimators berechnet sich zu:

$$\eta_{\text{Kollimator}} = \eta_{\text{Fresnel}}^2 \cdot \eta_{\text{Sammel}}$$

Die Effizienz des Polarisators ist ebenfalls je nach Art der Quelle unterschiedlich. Mit $\eta_{\text{Polarisation}} = 1$ für nicht polarisiertes Licht und $\eta_{\text{Polarisation}} = 0,5$ für polarisierte Lichtquellen ergibt sich für den Polarisator:

$$\eta_{\text{Polarisator}} = \eta_{\text{Polarisation}} \cdot \eta_{\text{Fresnel}}^2.$$

LCDs haben den Nachteil, dass ein Teil des Lichtes durch die Transistorbahnen reflektiert oder absorbiert wird. Aufgrund einer notwendigen Mindestbreite der Transistorbahnen, kann der Anteil von transmissiver zu nicht-transmissiver Fläche (=Aperture Ratio) für unterschiedliche Pixelgrößen interpoliert werden [8]. Je nach Größe des gesamten Systems skaliert ebenfalls das LCD Panel und somit bei Änderung des Pixel pitches die Aperture Ratio mit. Die Effizienz des Projektors ergibt sich aus der Aperture Ratio und zweimal der Transmission durch die ITO-Schicht des LCDs ($\eta_{ITO} \approx 0,9$) [8]:

$$\eta_{LCD\text{Panel}} = \eta_{ITO}^2 \cdot \eta_{Aperture}.$$

Da das Licht durch die Kollimation bereits eine geringe Divergenz aufweist, wird ein Großteil des Lichtstroms, der auf die Projektionsoptik fällt, abgebildet. Die Effizienz ergibt sich aus dem Anteil R des Lichtes, der durch die Optik abgebildet wird und den Fresnelverlusten. Bei gleichem Durchmesser der Kollimationsoptik (D) wie auch der Projektionsoptik, ergibt sich (bei Vernachlässigung des LCDs) bei einer F-Zahl von zwei das Verhältnis R zu:

$$R = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2} + \tan(\gamma) \cdot f_{proj}\right)^2} = \frac{1}{(1 + 4 \tan(\gamma))^2}.$$

Dabei steht γ für den halben Divergenzwinkel nach der Kollimation und f_{proj} für die Brennweite der Projektionslinse. Es gilt:

$$\eta_{proj} = \eta_{fresnel}^2 \cdot R.$$

Die Gesamteffizienz $\eta_{Projektionssystem_{LCD}}$ kann somit berechnet werden. Da die Effizienz von der Größe der Lichtquelle bei gegebenem Bauraum (hier: laterale Ausdehnung entlang der optischen Achse) abhängt, sind in Bild 3 die Effizienzen für verschiedene Größen der Lichtquellen vs. Bauraum geplottet.

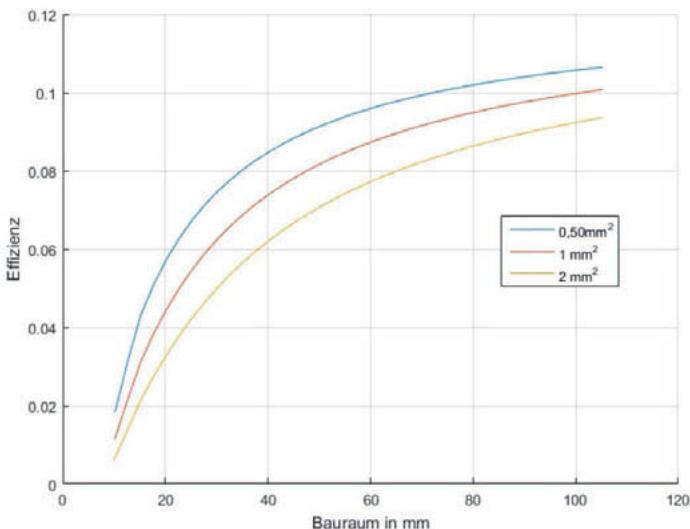


Bild 3: Bauraum vs. Effizienz für unterschiedliche Chipgrößen des Leuchtmittels.

Die Gesamteffizienz bei einem Projektor mit einer Lichtquelle mit lambert'scher Abstrahlcharakteristik und einem Bauraum von ca. 50 mm liegt damit unter zehn Prozent. Eine Optimierung bezgl. des Kollimators kann das Projektionssystem um einen Faktor von ca. zwei verbessern.

Je nach Chipgröße der LED, kann ein unterschiedlicher Lichtstrom bereitgestellt werden. Bei der Wahl der LEDs „LUW CN7N“ [9], „KW DMLS31.SG“ [10] und „LE UW Q8WP“ [11] ergeben sich die in Bild 4 dargestellten Lichtströme.

Mit der LED „KW DMLS31.SG“, die eine Fläche von 1 mm² und einen maximalen Lichtstrom von 334 lm produziert, kann mit einem Projektor, der einen Bauraum von ca. 50 mm vorweist eine kreisrunde Fläche mit einem Durchmesser von ca. 60 cm mit einer Beleuchtungsstärke von 100 lx dargestellt werden.

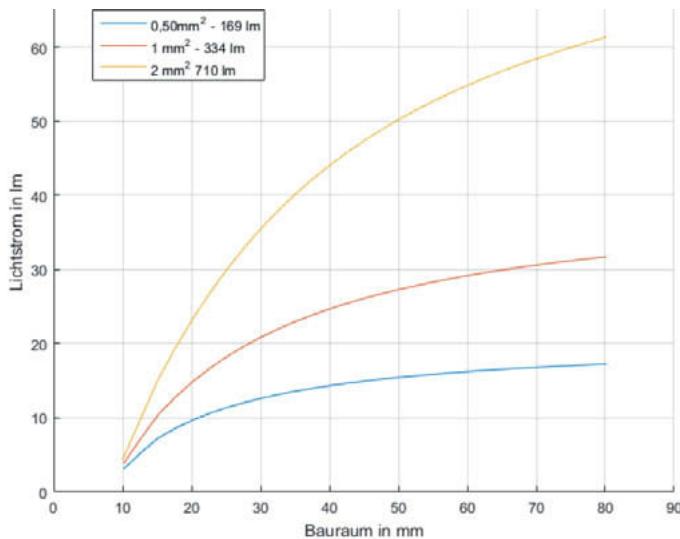


Bild 4: Bauraum vs. Lichtstrom für verschiedene LEDs.

Bei einer Kombination von LCD und Laserdioden, erhöht sich die Effizienz des Projektionssystems, da keine Polarisationsverluste auftreten. Außerdem wird der Faktor R aufgrund der minimalen Étendue der Laserdioden ebenfalls minimal. Bei Beleuchtung durch Laserdioden ergibt sich, je nach Auslegung des LCD-Panels, für das Projektionssystem eine Effizienz zwischen 30% und 50%.

4.1.2 LCD – Auflösung

Die erreichbare Auflösung der Projektion mittels LCD hängt von drei Faktoren maßgebend ab. Die Auslegung der Projektionsoptik, dem Pixelpitch des LCDs und des Projektionswinkels (Winkel zwischen optischer Achse des Systems und Flächennormalen der Oberfläche auf die projiziert wird). Bei einem Pixelpitch von ca. 30 µm liegt eine interpolierte Aperture Ratio im Bereich von 80%. Bei hinreichend kleinen Systemen (Brennweite ca. 25 mm) kann ein Projektionssystem mit LCD-Chip die Anforderungen an die geforderte Auflösung aus den beschriebenen Anbaulagen erfüllen.

4.2 LCoS

Ein LCoS-Panel ist ebenfalls ein Flächenlichtmodulator, jedoch ist dieses Element im Gegensatz zu dem LCD reflektiv. Statt des Polarisators und Analysators ist ein Polarizing Beam Splitter (PBS) im gefalteten Strahlengang.

4.2.1 LCoS – Effizienz, Bauraum und Beleuchtungsstärke

Durch den Aufbau des LCoS, ist es möglich, die Transistorbahnen hinter das reflektive Element zu bringen. Dies hat den Vorteil, dass die Aperture Ratio im Vergleich zu dem LCD sehr viel höher ist. Bereits bei einem Pixelpitch von ca. 4,5 µm ist die Aperture Ratio oberhalb von 90% [12]. Bei der Reflexionseffizienz wird für die spiegelnde Fläche die Charakteristik von Aluminium angenommen. Ebenso sind zwei ITO-Luft Durchgänge einzubeziehen (einmal vor und einmal nach der Reflexion). Die Effizienz des gesamten Systems wird mit

$$\eta_{LCoS\text{Projektionssystem}} = \eta_{\text{Kollimator}} \cdot \eta_{\text{PBS}} \cdot \eta_{\text{LCoSpanel}} \cdot \eta_{\text{Projektionslinse}}$$

berechnet. Im Vergleich zum LCD ergibt sich eine ähnliche Effizienz. Ebenso verhält es sich mit dem Lichtstrom-Output. Die Beleuchtungsstärken, die mit einem LCoS-System erreicht werden, sind in denselben Größenordnungen wie bei einem LCD-System.

4.2.2 LCoS – Auflösung

Der Vorteil des LCoS gegenüber des LCDs liegt in seinem Aufbau. Durch den höheren Fill-Factor kann ein kleinerer Pixelpitch bei fast gleichbleibender Effizienz erzielt werden. Erst ab einem Pixelpitch von ca. 2 µm geht die Effizienz deutlich runter. Somit können beispielsweise Projektionen mit einer Brennweite von 26 mm bis zu mehreren Metern Entfernung noch eine Abbildung mit entsprechend hoher Abbildungsgüte generieren. Dies gilt jedoch nur für einzelne Anbauorte.

4.3 DMD

Die DMD- Technologie ist ebenfalls ein Flächenmoduliertes System. Über eine Vielzahl von Mikrospiegeln, die verkippt werden können, ergibt sich ein Bild, dass von einer Projektionslinse abgebildet wird.

4.3.1 DMD – Effizienz, Bauraum und Beleuchtungsstärke

Ein DMD-Projektor besteht aus der Lichtquelle, der Kollimationsoptik, dem DMD-Chip und der Projektionsoptik. Die Effizienz des DMD-Chips setzt sich unter anderem aus der Transmission des Fensters, der Reflektivität der Spiegel und des Fill-Factors von ca. 90% [13].

Die gesamte Effizienz ergibt sich zu:

$$\eta_{DMD\text{Projektionssystem}} = \eta_{Kollimator} \cdot \eta_{DMD} \cdot \eta_{Projektionslinse}$$

Der Wirkungsgrad des DMDs kann mit 65% abgeschätzt werden [14]. Ebenso wie die vorherigen Systeme ist die Effizienz des Systems abhängig von der Größe des gesamten Bauraums und von der Größe der LED. Für eine LED mit $0,7 \times 0,7 \text{ mm}^2$ Kantenlänge ergibt sich bei einer Bauraumtiefe von 40 mm eine Effizienz von ungefähr 20%. Die Beleuchtungsstärken sind somit bei kleinen Büräumen ungefähr um den Faktor zwei besser als die zuvor betrachteten Systeme. Dies ist hauptsächlich auf die polarisationsunabhängige Bildgebung zurückzuführen.

4.3.2 DMD- Auflösung

Der Pixelpitch befindet sich in denselben Dimensionen wie die des LCoS und kann somit vergleichbare Ergebnisse erzielen.

4.4 Laser + Mikrospiegel und Phosphorkonverter

Bei dieser Technologie wird (blaues) Laserlicht über einen bewegl. Mikrospiegel auf einen Phosphor gelenkt. Durch Lumineszenzkonversion entsteht weißes Licht mit einer lambert'schen Abstrahlcharakteristik.

4.4.1 Laser + Mikrospiegel und Phosphorkonverter – Effizienz, Bauraum und Beleuchtungsstärken

Der Wirkungsgrad der Primäröptik kann mit 96% angegeben werden. Durch eine dichroitische Beschichtung des Mikrospiegels kann dessen Effizienz auf über 99% erhöht werden [14]. Durch die Wahl der F-Zahl von zwei ergibt sich bei diesem System eine Effizienz für die Projektionslinse von ca. 5%. Somit liegt die Systemeffizienz bei unter 5%. Der Lichtstrom, der erzeugt wird, steht im direkten Zusammenhang mit der Spotgröße auf dem Konverter. Um auf der Straße einen kreisrunden Bereich mit einem Durchmesser von 60 cm mit 100 lx zu beleuchten, sind bei einer Effizienz von unter 5% 700 lm notwendig. Dies würde einem theoretischen Spottdurchmesser von 200µm entsprechen [14].

4.4.2 Laser + Mikrospiegel und Phosphorkonverter – Auflösung

Bei einer vergleichbaren Systemgröße (Brennweite der Projektionsoptik=26 mm) kann bei einem Spottdurchmesser von 200µm aus kaum einer Anbauposition das Kriterium für die Auflösung befriedigt werden. Diese Technologie kann jedoch für spezielle Grafiken verwendet werden. Für die verschiedenen Anbaupositionen ergeben sich auf der Straße Auflösungen von einem bis mehreren Zentimetern.

4.5 RGB – Lasersystem + Mikrospiegel

Folgend wird ein RGB-Lasersystem mit Mikrospiegel untersucht. Die Laserdioden werden über einen Strahlcombiner oder mehrere dichroitische Spiegel auf einen Mikrospiegel gelenkt. Durch eine scannende Bewegung „projiziert“ dieser ein Bild auf die Straße.

4.5.1 RGB – Lasersystem + Mikrospiegel – Effizienz, Bauraum und Beleuchtungsstärken

Die Effizienz des Laserscannersystems beläuft sich zu:

$$\eta_{RGB_{Scanner}} = \eta_{Combiner} \cdot \eta_{Mikrospiegel}$$

Je nach Güte des Beamcombiners und des Mikrospiegels können Effizienzen um die 90% erreicht werden. Mit den auf dem Markt erhältlichen Laserdioden können ca. 70 lm weißes Licht erzeugt werden [5]. Die Anforderung an die Beleuchtungsstärke kann aus technologischer Sicht erfüllt werden. Dem System werden jedoch durch die Lasersicherheit Grenzen gesetzt (siehe Kapitel 5). Da die Projektionsoptik entfällt, ist der Bauraum minimal ggü. vergleichbaren Systemen.

4.5.2 RGB – Lasersystem + Mikrospiegel – Auflösung

Im Gegensatz zu den vorherigen Systemen handelt es sich bei diesem System nicht um ein abbildendes System. Die Strukturgrößen der Grafik sind durch den Durchmesser des Laserstrahles gegeben. Dieser wird als gaußsches Bündel beschrieben. Der Durchmesser des

Gaußstrahls ist durch $w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2}$, mit der Rayleighlänge $z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}$ gegeben. Fol-

gend wird angenommen, dass sich die Strahltaille auf dem Mikrospiegel befindet. Eine Abbil-

nung der Strahltaille auf die Straße ist bei gegebenen Bauräumen nicht zielführend, da die

Projektionslänge z sehr viel größer ist als die mögliche Brennweite f einer Linse im System.

Der Ort der Strahltaille z' befindet sich in dem Bereich der Brennweite f der abbildenden Linse.

Dies folgt bei den gegebenen Bedingungen direkt aus:

$$z' = f + \frac{f^2 \cdot (z - f)}{(z - f)^2 + z_r^2}. [15]$$

Der Spotdurchmesser auf der Straße kann durch $w(z)/\cos(\alpha)$ abgeschätzt werden. α be-

schreibt hierbei den Winkel zwischen der Projektionsachse und der Flächennormalen der

Straße. Je nach Anbauposition sind Projektionsfelder, die eine Auflösung der Pixel unter drei

Millimetern vorweisen bis zu wenigen Metern möglich.

5. Augensicherheit

Der Technologiebenchmark gab einen Überblick über Effizienz, Bauräume und Auflösung verschiedener Systeme. Die Augensicherheit ist gerade bei Laseranwendungen ein sehr restriktives Kriterium. Die besondere Gefährdung des Lasers ergibt sich durch die kleine Spotgröße, die hohe Intensität, die geringe Divergenz und die Kohärenz der Strahlung. Ein Laserspot kann im Auge auf wenige μm fokussiert werden und das Gewebe der Netzhaut schädigen.

Das Auge eines Betrachters kann sich in unterschiedlichen Abständen von dem Projektionsmodul befinden. Für Laserstrahlung mit einem kleinen Strahldurchmesser ($\sim 1\text{mm}$) und einer geringen Divergenz ($< 20 \text{ mrad}$) befindet sich die gefährlichste Position für das Auge zwischen 10 cm und wenigen Metern [16]. Eine Vergrößerung des minimal zugänglichen Abstandes kann daher die Gefahr in vielen Fällen nicht verringern. Im Abstand von 10 cm ist das Auge in der Lage den Laserspot auf einen Punkt auf der Netzhaut zu fokussieren (siehe hierzu Bild 5).

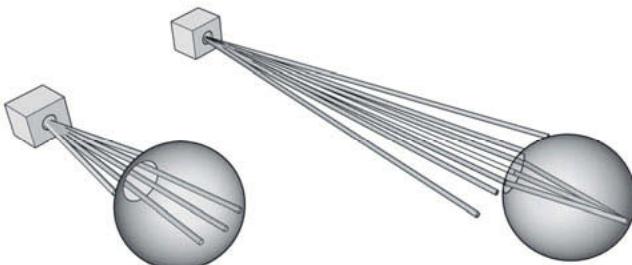


Bild 5: Links: Auge befindet sich näher als 10 cm an dem Spiegel. Rechts: Auge befindet sich ca. 10 cm von dem Spiegel entfernt und fokussiert jeden Strahl auf einen Punkt.

Bei einer quasistatisch- resonanten Ansteuerung der Spiegelachse ergibt sich für verschiedene Scanfrequenzen und unterschiedliche Öffnungswinkel des gescannten Bereichs für die Laserklasse 2 ein Limit von ca. 20 lm.

Abbildende Systeme, die durch Laserlicht beleuchtet werden (z.B.: LCoS mit RGB- Laserdioden) benötigen einen Diffusor in dem Strahlengang, um die Gefahr zu reduzieren. Mikroprojektoren können so ausgelegt werden, dass sie mit einem theoretischen Output von über 200 lm noch der Laserklasse 2 zugeordnet werden können [17].

6. Fazit

Für Projektionen im direkten Umfeld können mehrere Projektionssysteme verwendet werden. Den minimalen Bauraum und höchste Effizienz zeigt das System „Mikrospiegel + RGB-Laserdioden“. Der große Nachteil ist jedoch, dass die Augensicherheit für Laserklasse 2 bereits bei

einem Lichtstrom Output von ca. 20 lm ausgereizt ist. Sehr kleine Projektionsfelder können über einen Laserscanner realisiert werden. Ebenfalls kann ein Projektionssystem mit LCD eingesetzt werden. Die Auflösung ist hinreichend gut. Aufgrund der geringen Effizienz muss jedoch sichergestellt sein, dass genügend Lichtstrom von der LED zur Verfügung gestellt wird. Eine höhere Auflösung liefern die Projektionssysteme mit einem LCoS-Chip sowie System mit einem DMD-Chip. Dabei ist letzteres die effizientere und aktuell vielversprechendste Technologie.

- [1] Hofer, M.; Sorokin, L.: A new traffic participant and its language. ISAL 2017 Proceedings, 12 (2017), 565 - 574
- [2] Uhlenberg G.; Müller J.; Chiu, H.-P.; Wang, A.: Design Considerations on Logo and Pattern Projection. ISAL 2017 Proceedings, 12 (2017), 773 – 781
- [3] Gocke, T.; Weber, S.; Sieler, M.: Lighting innovations of future BMW vehicles. ISAL 2015 Proceedings, 11 (2015), 19 - 28
- [4] Mügge, M.; Hohmann C.: VISION ONE – Innovation, Präzision, Faszination. VDI-Berichte 2278 (2015), 171 – 192
- [5] Kloppenburg G.: Scannende Laser-Projektionseinheit für die Fahrzeugfrontbeleuchtung. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (2017)
- [6] deWille, M.: Mikroscannerkonzepte für hochauflöste dynamische Umfeldprojektionen. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (2017)
- [7] Sicherheit von Lasereinrichtungen, DIN EN 60825
- [8] Brennesholtz, M. S.; Stupp, E.: Projection Displays, Chichester,J. Wiley and sons (2008)
- [9] Osram Opto Semiconductors: Datenblatt OSLON MX ECE, LUW CN7N
- [10] Osram Opto Semiconductors: Datenblatt SYNIOS P2720, KW DMLS31.SG
- [11] Osram Opto Semiconductors: Datenblatt OSRAM OSTAR Projection Compact, LE UW Q8WP
- [12] HOLOEYE Photonics AG, LCoS Microdisplay Technologie
- [13] DLP2010 (0.2 WVGA DMD), Datasheet; Texas Instruments (2016)
- [14] Gut, C.: Laserbasierte Hochauflösende Pixellichtsysteme. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (2017)
- [15] Neumann, V.: Fokussierung und optische Abbildung in der Lasertechnik, Laserinstitut der Hochschule Mittweida
- [16] Schulmeister, K.; Henderson, R.: Laser Safety; by Taylor & Francis Group, LLC, 2004
- [17] Buckley, E.: Eye-safety analysis of current laser-based LCOS projection systems, Journal of the SID 18/12, 2010, 1051 - 1057

Erster Ansatz zur abbildenden Umsetzung einer hochauflösenden Signalleuchte für automatisiertes Fahren

Gerichtetes Licht zur personenbezogenen Adressierung von Fußgängern und Radfahrern durch automatisierte Fahrzeuge

Directed Light for Personalized Addressing of Pedestrians and Cyclists by Automated Vehicles

Jan-Henning Willrodt, Institut für Automobile Lichttechnik und Mechatronik (L-LAB), Lippstadt;

Alexander Klarius, HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt;

Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek, Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS) der Leibniz Universität Hannover

Kurzfassung

Mit der Integration automatisierter Fahrzeuge in den Straßenverkehr werden in Zukunft Computer die Fahraufgabe und somit auch die nonverbale Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern übernehmen. Herkömmliche Lichtfunktionen wie der Fahrtrichtungsanzeiger oder das Bremslicht können direkt übernommen werden, jedoch ersetzen diese nicht die Kommunikation, die bisher direkt vom Fahrer ausgeht. In diesem Beitrag wird die Umsetzbarkeit einer gerichteten Signalleuchte auf Basis eines abbildenden Mehrlinsensystems beschrieben, um diese Kommunikation über gerichtete Lichtsignale zu ersetzen. Besonderer Fokus liegt neben der Weitwinkeloptik, die mittels vier Linsen eine millimetergenaue Abbildungsgüte umsetzt, auf der aus zwei elliptischen Reflektoren bestehenden Primäroptik.

Abstract

Within the integration of automated vehicles onto the roads, computers will take on the driving. Conventional lighting functions such as the direction indicator or the brake light can be adopted, but these do not replace the communication that previously emerge directly from the driver. In addition to negotiating gestures in confusing traffic situations, today's drivers communicate detection through eye contact, which is characterized by its directionality ("I saw you!"). This can be accommodated by a directional signal lamp realizing individually transported messages relating directly to the receiver. This article describes the feasibility of a directional signal lamp based on a wide-angle multi-lens system implementing the highest possible imaging quality with the least possible complexity.

1. Motivation

Die nonverbale Kommunikation durch den Fahrer ist besonders im innerstädtischen Bereich [1] bei Geschwindigkeiten unter 50 km/h [2] deutlich ausgeprägt. Neben verhandelnden Gesten in unübersichtlichen Verkehrssituationen kommuniziert Blickkontakt eine Detektionsrückmeldung, die sich durch ihre Gerichtetheit auszeichnet („Ich habe dich gesehen!“). Aktuelle Studien zeigen, dass automatisierte Fahrzeuge insbesondere diese Detektionsrückmeldung kommunizieren sollten [3,4,5]. Dies geht über Kommunikationskonzepte hinaus, die durch ungerichtete Kommunikationsstrategien wie Lichtbänder oder Displays bevorstehende Fahrmanöver wie Anfahren oder Stoppen ankündigen, denn eine individuell transportierte Kommunikationsrückmeldung bezieht sich direkt auf den Empfänger. Dadurch werden raumwinkelabhängige Wahrnehmbarkeiten eines Lichtmoduls gefordert, die durch eine gerichtete Signalleuchte [6] umgesetzt werden können (Bild 1).

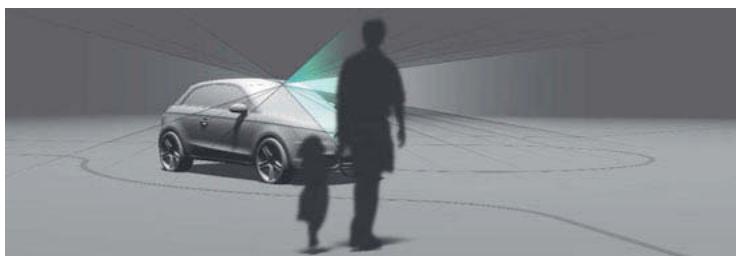


Bild 1: Personalisierte Kommunikation über gerichtete Lichtsignale
(Visualisierung von Carsten Hohmann)

2. Lichttechnische Anforderungen

Ziel der lichttechnischen Auslegung besteht darin, mittels einer hochauflösenden Projektionsoptik über einen Leuchtkanal die Netzhaut eines adressierten Betrachters zu beleuchten und dadurch eine Signalwirkung zu erzielen. Gleichzeitig ist das Streulicht derart gering zu halten, dass eine Signalwirkung außerhalb des Leuchtkanals vermieden wird. Auf 25 m Betrachtungsentfernung und bei Sonnenschein (Umgebungsleuchtdichten um den Versuchsaufbau von $L_U \approx 0,5 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2$) wurden Erkennbarkeiten von Lichtsignalen ermittelt, während die Lichtaustrittsfläche, die eine Ausdehnung unterhalb des Auflösungsvermögens des Auges aufwies, durch die Probanden fixiert wurde [7]. Anhand der Erkennbarkeiten werden 8 cd als Mindestlichtstärke für den Leuchtkanal sowie durch Streulicht verursachte Lichtstärken von 0,2 cd als Obergrenze in nichtadressierte Raumwinkel festgelegt. Im Vergleich dazu sind für Heckleuchten Lichtstärken zwischen 4

und 12 cd einzuhalten [8]. Über ein Lichtmodul ist nun ein möglichst großer horizontaler Öffnungswinkel $\alpha_{ges,h}$ über horizontal angeordnete Leuchtkanäle mit einem jeweiligen horizontalen Kanalöffnungswinkel von $\alpha_{K,h} = 0,25^\circ$ bei einem vertikalen Kanalöffnungswinkel von $\alpha_{K,v} = 90^\circ$ zur personenbezogenen Adressierung hochauflösend zu adressieren [9]. Dadurch wird für verschiedene horizontale Adressierwinkel $\alpha_{add,h}$ die Lichtaustrittsfläche ortsfest und an der Stelle gehalten, an der heutzutage ein Blickkontakt durch den Fahrer erwartet werden könnte. Über geeignete Signalfarbwahl kann ein intuitiver Nachrichtentransport stattfinden, wobei die Farbe Grün kommuniziert, dass ein Verkehrsteilnehmer gesehen wurde und weiterfahren kann [9].

3. Das Optische System

Ziel ist es, einen möglichst großen horizontalen Öffnungswinkel $\alpha_{ges,h}$ durch Abbildung von einzeln ansteuerbaren Leuchtkanälen abzudecken, indem die im Abstand G von der optischen Achse entfernten Randpixel eines Adressierelements in der Entfernung b über den Feldwinkel α_F auf B abgebildet werden (siehe Bild 2). Der Feldwinkel α_F des optischen Systems entspricht definitionsgemäß dem halben horizontalen Öffnungswinkel $\alpha_{ges,h}$. Zur Verfügung stehen mit Digital Micro Mirrors (DMD) oder Liquid Crystals on Silicon (LCoS) besonders kleine und hochauflösende Adressierelemente. Größere Adressierelemente sind mit der Verwendung von LC-Displays, strukturierten LEDs oder LED-Matrizen gegeben. Aufgrund der in der Horizontalen notwendigen Auflösung von $\alpha_{K,h} = 0,25^\circ$ zur personengenauen Adressierung ist die horizontale Abbildungsgüte und Kanalstabilität von besonderem Interesse.

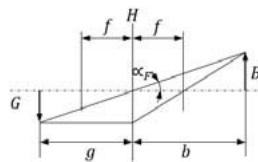


Bild 2: Strahlengang für reell abbildende Systeme unter paraxialer Näherung

Das optische System wird für die Objekthöhe G eines abzubildenden Adressierelements ausgelegt. Aus dem geforderten Feldwinkel α_F ergibt sich die paraxiale Bildhöhe B in der Entfernung b nach Gl. (1).

$$B = b \cdot \tan\left(\frac{\alpha_F}{2}\right) \quad (1)$$

Die Positionierentfernung g des Adressierelements zur Hauptebene H ergibt sich über den Abbildungsmaßstab β nach Gl. (2) [10].

$$\beta = \frac{G}{B} = \frac{g}{b} \quad (2)$$

Weiterhin wird mit der Linsengleichung die Brennweite f des Systems nach Gl. 3 eingeführt.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \quad (3)$$

Die paraxiale Näherung beschreibt eine Punkt-zu-Punkt-Abbildung. Da diese nur in einer Entfernung b umgesetzt wird, kommt es unter anderen Adressierentfernungen zu Unschärfe durch Zerstreuungskreise, die sich über aufgeweichte Leuchtkanalkanten auswirkt. Das System ist also derart auszulegen, dass sich diese Unschärfe über ein großes Entfernungsintervall von 0,75 bis 25 m [9] möglichst gering ausprägt und ist im umgekehrten Falle mit der Auslegung von Fotoobjektiven vergleichbar, die Objekte aus unterschiedlichen Entfernungen gleichzeitig scharf abbilden. Hierbei wird dann von einer Erhöhung der Schärfentiefe gesprochen. Nach Schröder [11] können kurzbrennweitige Objektive eine große Schärfentiefe erreichen, indem sie auf eine Entfernung g fokussiert werden, sodass sich die Schärfentiefe bis unendlich erstreckt. Sollen Leuchtkanäle aus einem Projektionssystem im umgekehrten Falle in möglichst großen Entfernungsintervallen scharfe Kanten aufweisen, ist auch hier die Brennweite f des Systems möglichst gering zu wählen.

Zur Vergrößerung des Feldwinkels ist der Quotient aus B durch b bzw. G durch g zu vergrößern. Der Abstand g ist minimal auszuführen, wobei sich der Grenzwert durch Positionierung des Adressierelements in der Brennweite f ergibt. Durch Gleichsetzung von f und g ergibt sich die Veranschaulichung nach Bild 3.

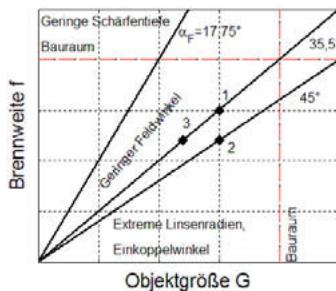


Bild 3: Strahlengang für reell abbildende Systeme unter paraxialer Näherung

Mit sinkender Brennweite kann gleichzeitig die Objekthöhe des Adressierelements G kleiner gewählt werden, um einen konstanten Feldwinkel zu erhalten. Dieser Zusammenhang kann vereinfacht als linear angenommen werden. Eine Verkleinerung der Objektgröße bei konstanter Brennweite verkleinert den Feldwinkel α_F , eine Verkleinerung der Brennweite f vergrößert bei konstanter Objektgröße G den Feldwinkel. Die Größe des Adressierungselements G steht also in direktem Zusammenhang mit der Brennweite f und somit dem Abstand g zwischen Adressierelement und Hauptebene. Große Brennweiten f und Objekthöhen G sind weiterhin aus bauraumspezifischen Gründen zu vermeiden.

Das optische System zur Projektion von Lichtsignalen orientiert sich aufgrund der großen abzubildenden horizontalen Feldwinkel in seinem Grundaufbau an Weitwinkelobjektiven aus der Fotographie, nur dass es Licht eines Chips (Adressierelements) aussendet, anstatt Licht einzufangen und auf einen Chip abzubilden. So bedienen sich Weitwinkeloptiken dem Konstruktionsprinzip Retrofokus und erreichen Feldwinkel von über 90° [12]. Mit dem an das Hill Sky Lens angelehnten optischen System (Bild 4 links) wird unter Verwendung von drei verschiedenen Glasmaterialien das Umsetzen eines Feldwinkels von über 50° möglich. Die Hauptebene H wird durch diesen asymmetrischen Aufbau aus der Linsenanordnung bewegt, führt jedoch zu besonders in den Randbereichen typischen kissenförmigen Verzeichnungen, die in der Verwendung als Projektionssystem keine horizontale Kanalstabilität umsetzen können. Diese kissenförmige Verzeichnung wird für große horizontale Adressierwinkel $\alpha_{add,h}$ im Lichtstärkedetektorbild deutlich (Bild 4, rechts), wodurch eine Korrektur durch ein höheraufgelöstes Adressierelement oder zusätzliche Linsen vorzunehmen ist.

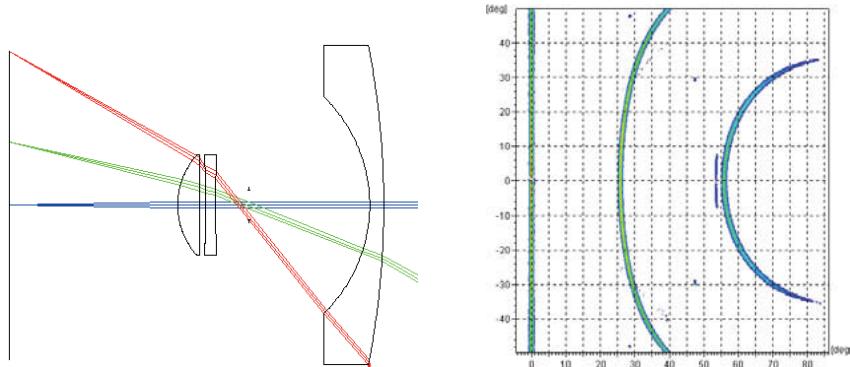


Bild 4: Prinzip Retrofokus (links) nach Kingslake [12] und typische Verzeichnungen (rechts)

Neben dieser Verzeichnung begünstigen sie weitere zu korrigierende Abbildungsfehler, weshalb moderne Fotoobjektive i.d.R. aus mehr als zehn Linsen [13], unterschiedlichen Spezialgläsern und asphärischen Flächen bestehen [14]. Dadurch ist die Herstellung und Justage solcher Lösungen aufwändig und für die Massenfertigung und Anwendung im Automobil ungeeignet. Ein Optikdesign nach Vorbild des Konstruktionsprinzips Retrofokus ist daher nicht zielführend.

Vielversprechend ist jedoch die Umsetzung einer gerichteten Signalleuchte mit dem Konstruktionsprinzip Angulon. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus um die Aperturblende weist es den Vorteil auf, bei ähnlich großen Feldblendenwinkeln [15] insbesondere die Verzeichnung zu kompensieren, sodass auch bei großen Adressierwinkel die Kanalstabilität erhalten bleibt. Da sich im Gegensatz zum Konstruktionsprinzip Retrofokus die Hauptebene innerhalb des Linsensystems befindet, ist die Vergrößerung des Feldwinkels durch Reduzierung der Brennweite nur so weit durchführbar, wie ein Nachrücken des Adressierelements bis zur ersten Linse möglich ist. Die Bildfeldwölbung, die im Vergleich zum Konstruktionsprinzip Retrofokus stärker ausgeprägt ist, wird ausgenutzt, da die Adressierentfernung von 25 m auf einen Radius um das Fahrzeug und nicht auf eine ebene Fläche bezogen wird. Weiterhin wird aus Kosten-, Fertigungs-, Justage- und Gewichtsgründen eine Umsetzung verfolgt, die, auch in Hinblick auf Minimierung des Streulichts, die Linsenzahl mit zunächst vier Linsen möglichst geringhält sowie für alle Linsen den transparenten Kunststoff PMMA verwendet.

Ein Digital Micromirror Device (DMD) erfordert aufgrund seiner geringen Abmaße eine derart kurze Brennweite, um den geforderten Feldwinkel zu erreichen, dass es in Kombination mit dem Konstruktionsprinzip Angulon nicht verwendet werden kann, ohne das Linsensystem auf millimeterkleine Linsen auszulegen. Daher wird über möglichst kleine, hinterleuchtete LC-Displays auf Adressierelemente mit größeren Abmaßen zurückgegriffen. Als zielführend erweist sich ein 45 mm breites 2,2" LC-Display. Mithilfe der Optikdesignsoftware ZEMAX werden anschließend Linsensysteme ausgelegt und optimiert, die über vier Linsen aus PMMA Leuchtkanäle auf möglichst große Feldwinkel von $\alpha_F = 35,5^\circ$ (Bild 5 links) bzw. $\alpha_F = 45^\circ$ (Bild 5 rechts) abbilden. Diese Linsensysteme werden im Folgenden als System 1 und System 2, in Bild 3 repräsentiert durch Punkt 1 bzw. Punkt 2, bezeichnet.

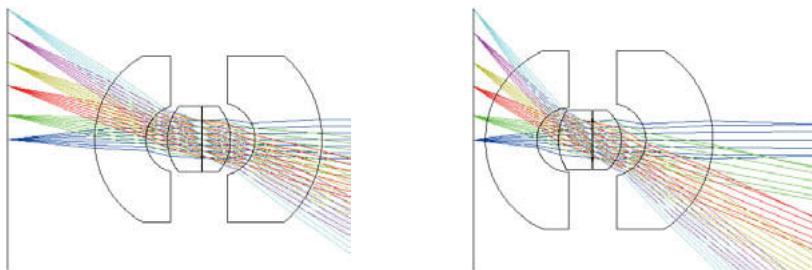


Bild 5: Linsensystem 1 und 2 mit Feldwinkeln von $\alpha_F = 35,5^\circ$ (Links) bzw. $\alpha_F = 45^\circ$ (Rechts)

Nach Simulation wird mit System 1 ein infinitesimal kleiner Punkt eines Adressierelements in 25 m Entfernung auf einen Zerstreuungskreis mit maximal 12 cm Durchmesser abgebildet (0.275°). Die Standardabweichung der Abbildung von der idealen Abbildung beträgt über alle simulierten Strahlen dabei maximal 2,5 cm. Diese Abbildungsgüte sowie die deutliche Kanalstabilität zeigt sich im Lichtstärkedetektorbild (Bild 6, links). Dabei ist das System derart ausgelegt, dass die letzte Grenzschicht zunächst keine optische Wirkung aufweist. Die Adressierbarkeit durch Beleuchtung der Netzhaut über den vertikalen Verlauf von 90° wird schließlich durch eine zusätzlich aufgebrachte, vertikal streuende Struktur auf der letzten Grenzschicht umgesetzt (Bild 6, Mitte).

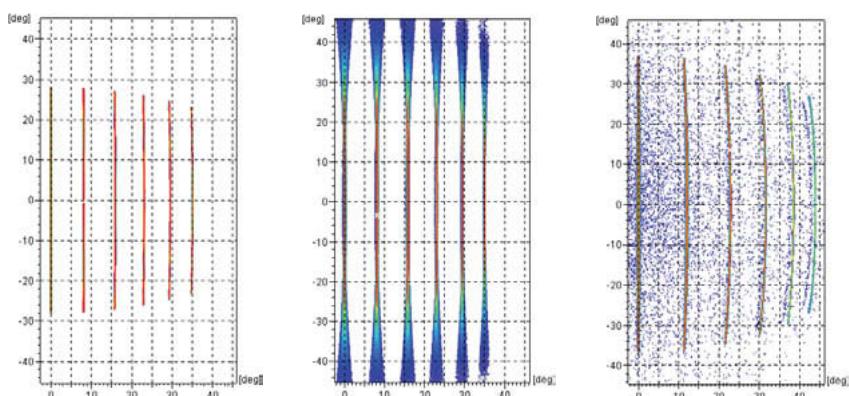


Bild 6: Lichtstärkedetektorbilder. Links: System 1. Mitte: System 1 mit vertikal streuender Struktur. Rechts: System 2

Grundsätzlich ist durch weiteres Verkürzen der Brennweite (Bild 5, rechts) mit vier PMMA-Linsen ein Feldwinkel von $\alpha_F = 45^\circ$ (System 2) erreichbar. Dieses System erlaubt alternativ ein Verkleinern des Adressierelements, um damit einen Feldwinkel von $\alpha_F = 35,5^\circ$ zu erreichen (Punkt 3 in Bild 3). Die extremen Linsenradien führen nun zu erhöhten Abbildungsfehlern, die sich zunächst in Form von Unschärfe widerspiegeln. Die Symmetrieabweichung führt weiterhin zu tonnenförmigen Verzeichnungen, wodurch die Kanalstabilität insbesondere in den Randbereichen abnimmt. Auch der Einfluss durch Streulicht steigt (Bild 6, rechts). Weiterhin verschiebt sich der adressierte horizontale Winkel $\alpha_{add,h}$ über den vertikalen Verlauf um mehrere Gradeinheiten. Für den Erhalt der Abbildungsgüte ist der Blendendurchmesser in diesem Aufbau von 3 mm auf 1 mm zu reduzieren. Das damit verbundene Abnehmen der erreichbaren Lichtstärkewerte wird bei Vergleich der Detektorbilder in Bild 6 deutlich. Es zeigt sich, dass ein Auslegen des Systems auf einen Feldwinkel von $\alpha_F = 35,5^\circ$ zu bevorzugen ist.

4. Hinterleuchtung und Adressierelement

Eine besondere Herausforderung stellt nun die Umsetzung der in Bild 5 verdeutlichten Abstrahlcharakteristik zur Umsetzung der notwendigen Einkoppelwinkel durch das LC-Display dar. Der Lichtschwerpunkt in den Randpixeln ist um bis zu 35° in Richtung der optischen Hauptachse zu schwenken. Um auf die Verwendung einer Vielzahl separat ausgerichteter LEDs sowie zusätzliche optische Gläser zu verzichten, wird das Prinzip eines elliptischen Reflektors nach Bild 7 verwendet.

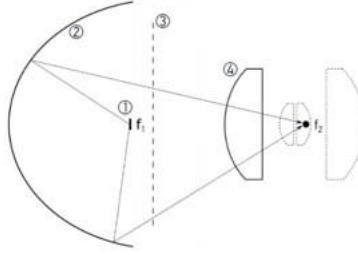


Bild 7: Die Verwendung eines elliptischen Reflektors realisiert die Einkoppelbarkeit

Die Lichtschwerpunkte über alle Pixel treffen sich an einem Punkt. Daher kann ein elliptischer Reflektor (2) derart ausgelegt werden, dass in seinem ersten Brennpunkt eine Lichtquelle (1) positioniert wird und sein zweiter Brennpunkt mit dem Schnittpunkt der durch das Adressierelement bereitzustellenden idealen Lichtschwerpunkte nach Bild 4 links

übereinstimmt (Bild 7). Durch diesen Aufbau kann auf Primäroptiken an LEDs verzichtet werden, da der Reflektor das durch die LED in den Halbraum (LAMBERT-Strahler) abstrahlende Licht gezielt nutzt. Das LC-Display (3) wird nun bereits unter dem Winkel beleuchtet, unter dem es abstrahlen und in die erste Linse (4) einkoppeln soll. Mit der Verwendung von zwei elliptischen Reflektoren wird die Lichtstärkeverteilung auf zwei Spots verteilt, sodass die erreichbaren Lichtstärken in den Randkanälen erhöht werden. Dabei hinterleuchtet je eine Lichtquelle-Reflektor-Einheit den linken bzw. rechten Bereich des LC-Displays. Der mittlere Kanal kann aufgrund gezielter Überlagerung durch beide Lichtquelle-Reflektor-Einheiten bedient werden. Benötigt wird eine Displaytechnologie mit hohem Kontrast auch bei schrägen Einfallswinkeln.

5. Simulation des Gesamtsystems

Die Simulation des lichttechnischen Gesamtsystems berücksichtigt einen Transmissionsgrad des Polfilters von $\eta_P = 0,45$, einen Array-Füllfaktor von $\eta_F = 0,48$ sowie einen Transmissionsgrad des Analysators von $\eta_A = 0,85$, sodass sich bei Schaltung eines Pixels in Durchlassrichtung am LC-Display eine Gesamttransmission von $\eta_{pxl,wei\beta} = 0,18$ ergibt. Weiterhin wird ein Displaykontrast von 200:1 angenommen, sodass der Transmissionsgrad für ein Pixel im Sperrzustand $\eta_{pxl,schwarz} = 0,0009$ beträgt. Das nicht transmittierte Licht wird durch das LC-Display zu $\eta_{pxl,R} = 0,2$ reflektiert, der Reflexionsgrad des Reflektors liegt bei $\eta_R = 0,85$. Die Lichtquellen werden als LAMBERT-Strahler mit einer Wellenlänge von $\lambda = 530 \text{ nm}$ angenommen. Die Simulation wird mit $2 \cdot 10^9$ Lichtstrahlen für aktivierte Kanäle unter $\alpha_{add,h} = 0^\circ$ und $\alpha_{add,v} = 35,5^\circ$ durchgeführt. Um jeweils in der Vertikalen $\alpha_{add,v} = 0^\circ$ eine Lichtstärke von 8 cd umzusetzen, ist bei Aktivierung des mittleren Kanals ein Gesamtlichtstrom durch beide LEDs von $\Phi_{opt} = 140 \text{ lm}$ erforderlich. Der Randkanal benötigt einen Gesamtlichtstrom von $\Phi_{opt} = 190 \text{ lm}$, wobei nun der Lichtstrom durch eine LED bereitgestellt wird. Bei gleichzeitiger Aktivierung mehrerer Leuchtkanäle ist der Lichtstrom an den lichtschwächen Kanal anzupassen, wobei Lichtstärkenunterschiede zwischen den Kanälen nun durch Schalten von Graustufen am LC-Display ausgeglichen werden. Zur Aktivierung des mittleren und eines äußeren Kanals ist dementsprechend ein Lichtstrom von $\Phi_{opt} = 190 \text{ lm}$ vorzuhalten, wobei die Transmission der Pixel für den mittleren Kanal entsprechend reduziert wird.

Für diesen Fall wird im Folgenden eine Lichtstärkeverteilung simuliert. Ein horizontaler Schnitt unter $\alpha_{v,add} = 0^\circ$ zeigt in Bild 8 links, dass mit dieser Maßnahme beide Kanäle die

notwendigen 8 cd zur Adressierung von Personen in 25 m erreichen, während die Dunkelbereiche unterhalb von 0,2 cd liegen. Vertikale Schnitte durch die aktivierte Leuchtkanäle auf $\alpha_{h,add} = 0^\circ$ und $\alpha_{h,add} = 35,5^\circ$ zeigen in Bild 8 rechts die erreichbaren Lichtstärkewerte im jeweiligen vertikalen Verlauf. Den ungünstigsten vertikalen Adressierwinkel erfährt ein Fahrradfahrer mit einer Augenhöhe von 2,5 m [16]. Je geringer seine Entfernung zu dem Lichtmodul, desto größer wird der für ihn notwendige vertikale Adressierwinkel $\alpha_{add,v}$. Gleichzeitig sinkt aber auch die notwendige Lichtstärke, um die Beleuchtungsstärke bereitzustellen, die auch bei 8 cd in 25 m vorliegt. Dieser formale Zusammenhang der notwendigen Lichtstärke über den vertikal adressierten Raumwinkel $\alpha_{add,v}$ ist mit I_{min} dargestellt. Es zeigt sich, dass die notwendigen Lichtstärken sowohl für $\alpha_{h,add} = 0^\circ$ als auch für $\alpha_{h,add} = 35,5^\circ$ im vertikalen Verlauf erreicht werden.

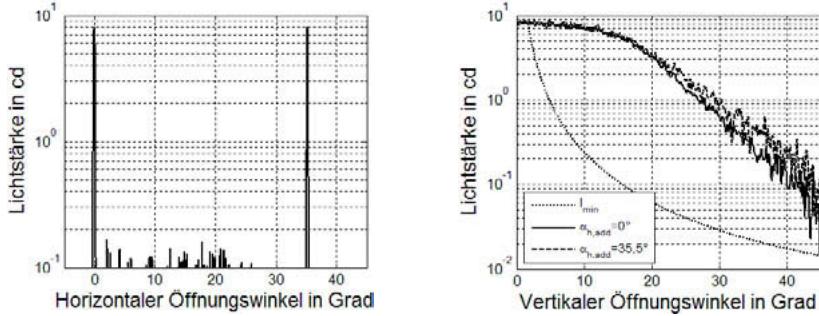


Bild 8: Lichtstärkewerte über Schnittverläufe bei aktivierten Kanälen unter $\alpha_{add,h} = 0^\circ$ und $\alpha_{add,h} = 35,5^\circ$. Links: Horizontaler Schnittverlauf unter $\alpha_{add,v} = 0^\circ$. Rechts: Vertikale Schnittverläufe unter $\alpha_{add,v} = 0^\circ$ und $\alpha_{add,v} = 35,5^\circ$ sowie Mindestlichtstärke.

6. Diskussion

Dieser Artikel beschreibt einen ersten Ansatz zur Umsetzung einer gerichteten Signalleuchte auf Basis eines abbildenden Mehrlinsensystems. Besonderer Fokus liegt dabei unter Berücksichtigung der Systemkomplexität auf einem möglichst hohen vertikalen Feldwinkel und der Abbildungsgüte, um eine personenbezogene Adressierung über gerichtete Leuchtkanäle umsetzen zu können. Demnach ist über ein Vierlinsensystem aus dem Werkstoff PMMA, einem auch bei schrägen Einfallswinkeln kontraststarken LC-Display und einer über einen elliptischen Reflektor umgesetzten Beleuchtung eine gerichtete Signalleuchte realisierbar. Unter Berücksichtigung der Zerstreuungskreise, die eine Vergrößerung der horizontalen Kanalöffnungswinkel um etwa 0,1° verursachen, kann

beispielsweise unter Verwendung eines etwa 1000 Spalten aufweisenden LC-Displays ein horizontaler Kanalöffnungswinkel von $\alpha_{K,h} = 0,25^\circ$ erreicht werden. Dies setzt eine ideale Positionierung der Einzelkomponenten des Gesamtmoduls voraus. Eine erste prototypenhafte Umsetzung befindet sich im Aufbau. Der mögliche Einfluss von Beugung durch und die damit verbundenen Wirkungsgradverluste sind weiterführend zu untersuchen.

Das System ist in der Farbe Grün umgesetzt. Diese kann nach Willrodt et al. [9] kommunizieren, dass ein Fahrzeug jemanden detektiert hat. Gleichzeitig kommuniziert diese Farbe auch, dass der Verkehrsteilnehmer weitergehen kann. Damit die Signalleuchte lediglich eine Umfelderkennung und keine Handlungsaufforderung kommuniziert, ist zu untersuchen, welche alternativen Farben zur intuitiven Detektionsrückmeldung über Licht verwendet werden können und ob diese auch Farben sein können, denen bisher im Straßenverkehr keine Signalwirkung zugewiesen wurde.

Ferner ist durch weiterführende Analyse der Use Cases die Anzahl und die jeweilige Ausrichtung der Lichtmodule zu diskutieren, um in möglichst vielen Situationen die Kommunikation durch gerichtete Lichtsignale zu gewährleisten.

In einer finalen Umsetzung wird unter anderem schließlich zu diskutieren sein, wie eine Reinigungsanlage das Lichtmodul von streulichtverursachenden Ablagerungen an der Abschluss Scheibe säubern kann, oder wie Fahrzeugaufbaubewegungen für eine gerichtete Adressierung auszugleichen sind.

7. Literatur

- [1] Färber, B.: Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrlern. In: Autonomes Fahren, 2015, Springer Vieweg S. 127-146
- [2] Schneemann, F., Gohl, I.: Analyzing driver-pedestrian interaction at crosswalks. In: Intelligent Vehicles Symposium IV, 2016, S. 38-43
- [3] Merat, N., Louw, T., Madigan, R., Dziennus, M., Schieben, A.: Communication between VRUs and Fully Automated Road Transport Systems. In: Accident Analysis and Prevention, 2018 (Accepted for Publication)
- [4] Schieben, A. Wilbrink, M. Kettwich, C. Madigan, R. Louw, T. Merat, N.: Designing the interaction of automated vehicles with other traffic participants: Design considerations based on human needs and expectations. In: Cognition, Technology and Work Journal, 2018 (Submitted for Publication)
- [5] Lagström, T., Malmsten Lundgren, V.: AVIP – Autonomous Vehicle's Interaction with pedestrians (Master Thesis). Gothenborg, 2015

- [6] Willrodt, J.-H., Wallaschek, J.: Optical based Communication of Autonomous Vehicles with other Traffic Participants. Vision Conference, 2016
- [7] Willrodt, J.-H., Döhler, S., Wallaschek, J.: Über die Umsetzung einer gerichteten Signalleuchte für automatisierte Fahrzeuge auf Basis einer asphärischen Fläche. In: Tagungs-CD Lux Junior, 2017
- [8] ECE-Regelung Nr. 7 - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Begrenzungsleuchten, Schlussleuchten, Bremsleuchten und Umrissleuchten für Kraftfahrzeuge (ausgenommen Krafträder und ihre Anhänger), Transport Division, 2014
- [9] Willrodt, J.-H., Strothmann, H., Wallaschek, J.: Optical Car-to-Human Communication for Automated Vehicles. 12th International Symposium on Automotive Lighting, 2017, Herbert Utz Verlag GmbH, S. 579-588
- [10] Pedrotti, F., Pedrotti, L., Bausch, W., Schmidt, H.: Optik für Ingenieure – Grundlagen. 3. Auflage Springer Verlag, 2005
- [11] Schröder, G., Treiber Hanskart: Technische Optik. Vogel Buchverlag, 2007
- [12] Kingslake, R.: A History of the Photographic Lenses. Academic Press, 1989
- [13] Laikin, M.: Lens design. CRC Press, Taylor & Francis, 2006, S. 105-118
- [14] Kniffler, A.: Weitsicht – Die Konstruktion von Weitwinkelobjektiven. Colorfoto 9, 2008, S. 54-57
- [15] Geary, Joseph M. Introduction to Lens Design: With Practical Zemax Examples. Richmond: Willmann-Bell, 2002
- [16] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt06), 2006

Auswirkungen von Mesostrukturen im Fahrzeuginnenraum auf die Reflexionseigenschaften

Effects towards the reflection properties of visible textures of vehicle interior materials

M.Sc. **Markus Schöneich**, Daimler AG, Sindelfingen;
Prof. Dr. rer. nat. **Cornelius Neumann**, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut Karlsruhe;
Prof. Dr.-Ing. **Roland Lachmayer**, Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

Abstract

In vehicle interior, different materials are illuminated with various kinds of light spectra. These materials differ in visual perception for the human observer and could be subdivided into planar and structured surfaces. If the structured surface is still recognizable from ordinary sitting positions, this is called a mesostructured surface.

Under illumination, the recognizable mesostructure has an effect on perceived brightness and reflected light colour of the illuminated surface. On the one hand, the impression of brightness is influenced by various effects, such as self-shadowing. On the other hand, the perceived light colour depends on the illuminated object colour. In this article, the measurements deviations of different typical mesostructured surfaces of the vehicle interior and the influence of angle dependant reflection properties are shown.

A test setup measures the effects on luminance and colour coordinates for different textures. Rules and deviations of the metrological recording of textured surfaces are demonstrated. In addition, suggestions are made to use efficient angle-dependent properties of the surface to generate optimised perception setups for passengers.

1. Einleitung/Motivation

Im Fahrzeuginnenraum werden heutzutage unterschiedliche Materialien mit verschieden-farbigem Licht beleuchtet. Diese Materialien unterscheiden sich für den menschlichen Betrachter in ihrer optischen Wahrnehmung und können in planare und strukturierte Oberflächen unterteilt werden. Ist dabei die strukturierte Oberfläche aus gewöhnlichen Sitzpositionen noch erkennbar, so spricht man von mesostrukturierten Oberflächen.

Unter Beleuchtung wirken sich vor allem die erkennbaren Mesostrukturen auf die wahrgenommene Helligkeit und Lichtfarbe der beleuchteten Oberfläche aus. Auf der einen Seite wird der Helligkeitseindruck durch verschiedene Effekte wie beispielsweise der Selbstabschattung beeinflusst. Auf der anderen Seite kommt die wahrgenommene Lichtfarbe durch die Oberflächenfarbe des angestrahlten Objektes zustande. In diesem Beitrag werden die Auswirkungen verschiedener Mesostrukturen auf die Reflexionseigenschaften aufgezeigt.

Während bei dem Artikel von Turbil [1] und Page [2] auf die nicht mit dem bloßen Auge sichtbaren Oberflächeneigenschaften referenziert wird, bezieht sich dieser Artikel auf die sichtbaren.

Mit einem Versuchsaufbau werden die Einflüsse auf Leuchtdichte und Farbkoordinaten unter verschiedenen Texturen ermittelt. Es werden Regeln und Abweichungen der mess-technischen Erfassung von texturierten Oberflächen aufgezeigt.

Außerdem werden Vorschläge gemacht, um die winkelabhängigen Eigenschaften der Oberflächen zu nutzen, um wahrnehmungsoptimierte optische Systeme zu erzeugen.

2. Anwendungsbeispiel

Der erste Abschnitt zeigt ein praktisches Anwendungsbeispiel der Thematik unter einem Blickwinkel auf eine Geometrie mit differenten Oberflächenkonturen auf. Zu sehen ist auf den jeweils links angeordneten Bildern (siehe Bild 1 und Bild 3) die Farbbildaufnahme der komplexen Oberflächengeometrie. Die auf der rechten Seite angeordneten Bilder (siehe Bild 2 und Bild 4) zeigen hiervon jeweils die Leuchtdichteaufnahme. Die logarithmische Skalierung der Leuchtdichteaufnahme wurde für beide Aufnahmen normiert, damit diese für den Bewertenden farblich vergleichbar sind.

Während die erste Bilderzeile eine strukturierte Oberfläche aufweist, zeigt die zweite ein noch ungenarbtes Bauteil. Das bedeutet, die Oberfläche ist unstrukturiert und relativ planar.

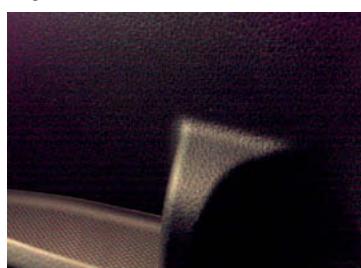


Bild 1: Farbbild genarbte Geometrie

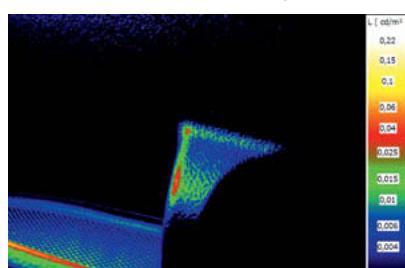


Bild 2: Leuchtdichtebild genarbte Geometrie

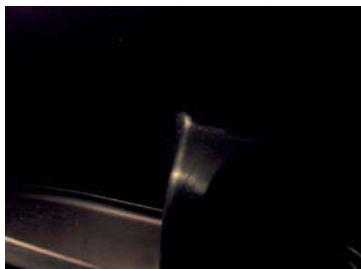


Bild 3: Farbbild ungenarbte Geometrie

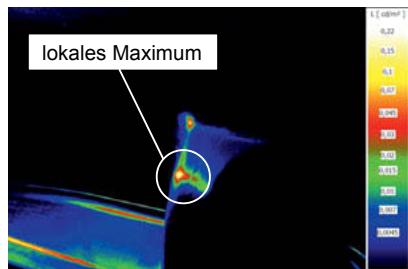


Bild 4: Leuchtdichtebild ungenarbte Geometrie

Die Aufnahmen wurden mit dem gleichen optischen Aufbau aus Lichtquelle und Lichtleiter sowie aus der gleichen Beleuchtungs- sowie Kameraposition erstellt. Bei Vergleich der Leuchtdichteaufnahmen wird unter anderem ersichtlich, dass der lokale Helligkeitsspot der ungenarbteten Geometrie eine längliche Gestalt mit strukturierter Oberfläche einnimmt. Das größere Maximum ist an der ungenarbteten Geometrie zu finden.

Nun wird die wahrgenommene flächige Farbe an zwei gleichgroßen Bereichen innerhalb des Messbereiches für die genarbte und die ungenarbte Fläche ermittelt (siehe Bild 5). Hierzu wird der arithmetische Mittelwert der Farbkoordinaten über den definierten Bewertungsbereichen (jeweils 1cm^2) gebildet.



Bild 5: Messortfläche 1 und 2 der Farbbildaufnahmen

Die Messwerte der Bereiche 1 und 2 können Tabelle 1 entnommen werden. Aus der folgenden Tabelle wird ersichtlich, dass trotz identischer Lichtquelle unterschiedliche Farben gemessen werden. Auf die Farbbetrachtung an den lokalen Maxima (Oberflächenglanz) wird an dieser Stelle nicht eingegangen, weshalb Flächen außerhalb dieser Zonen gewählt wurden [3, 4].

Tabelle 1: Messwerte aus Farbaufnahme

	genarbte Geometrie	ungenarbte Geometrie
Messfläche 1	$u'=0,2293$ $v'=0,4875$	$u'=0,2266$ $v'=0,4881$
Messfläche 2	$u'=0,2212$ $v'=0,4863$	$u'=0,2243$ $v'=0,4828$

3. Versuchsaufbau und Durchführung

Nachdem die Thematik anhand eines einzigen Blickwinkels erläutert wurde, soll nun ein Messaufbau Erkenntnisse über den Einfluss von typischen Strukturvarianten unter verschiedenen Blickrichtungen bringen. Als Lichtquelle wird eine LED mit sehr breitem und verhältnismäßig ausgeglichenem Lichtspektrum verwendet, das sich an dem Sonnenspektrum orientiert. Bild 6 zeigt die spektrale Verteilung der Lichtquelle.

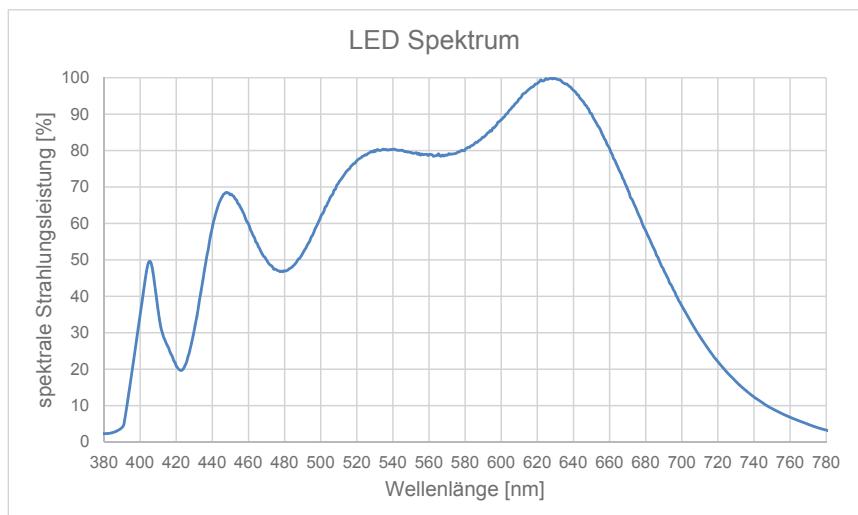


Bild 6: Spektrum Lichtquelle

Als Lichtquelle wurde eine LED gewählt, damit die Strahlung nach geometrischer Optik als paralleles Strahlenbündel auf der Oberfläche unter geringem Gesamtaufbau auftrifft [4]. Ziel ist es das Verhältnis der Lichtaustrittsfläche zur Objektentfernung gering zu halten. Die LED

wird unter ihrer Nennspannung und Nennstrom innerhalb ihrer Spezifikation mit einer Konstantstromquelle betrieben und wird mithilfe einer passiven Kühlung betrieben. Des Weiteren weist die verwendete LED laut Datenblatt ein symmetrisches Abstrahlprofil auf.

Die Lichtquelle wird vor, zwischen und nach allen Messungen auf Stabilität der Lichtfarbe und Helligkeit geprüft. Dazu wird ein Referenzmaterial in einer Winkelposition vermessen und mit den zeitlich versetzten Werten verglichen. Bild 7 zeigt schematisch den erstellten Messaufbau.

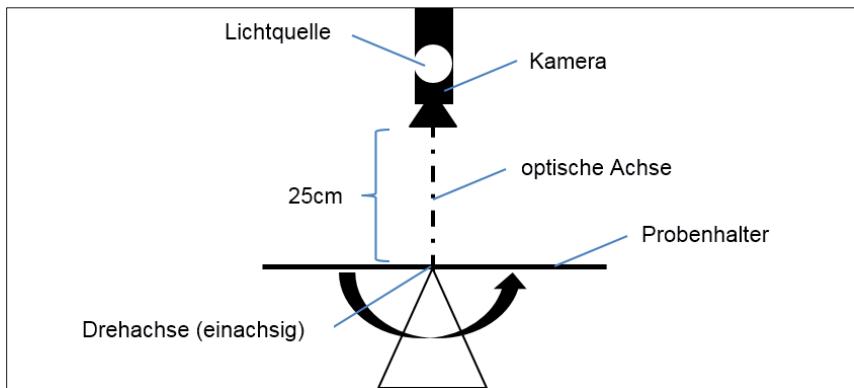


Bild 7: Seitenansicht schematischer Messaufbau

Alle drei Freiheitsgrade des Probenhalters sind statisch bestimmt. Lediglich ein Freiheitsgrad kann in einem Winkel variabel verstellt werden. Die Drehachse des Probenhalters steht senkrecht auf der optischen Kameraachse.

Die LED befindet sich aus bauraumtechnischen Gründen direkt neben der Kamera und nicht an gleicher Position. Sie befindet sich 25 cm über dem beleuchteten Objekt. Das mit einem Goniophotometer ermittelte Abstrahlprofil der Lichtquelle wird nun so über der Testfläche platziert, damit die Symmetriearchse der LED mit der Drehachse übereinstimmt.

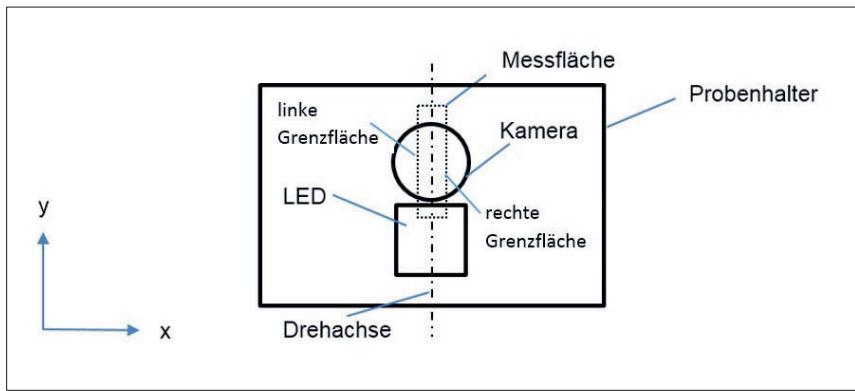


Bild 8: Draufsicht schematischer Messaufbau

In der Draufsicht (siehe Bild 8) ist zusätzlich die imaginäre Messfläche gekennzeichnet. Die Messfläche wurde schmal (in x-Ausdehnung) gewählt, damit seitlich zur Drehachse (bei Winkeländerung) nur ein minimaler Höhenunterschied erzielt wird. Es wird somit sichergestellt, dass auch unter großen Winkeln das Objekt innerhalb der Fokusebene bleibt. Es wird zusätzlich davon ausgegangen, dass die Beleuchtungsstärkevariation auf der Messfläche durch die relativ geringe Breite der Messfläche keinen Einfluss hat. Die Beleuchtungsstärke berechnet sich nach folgender Formel:

$$E_v = \frac{I_v}{r^2} \cdot \cos(\varepsilon)$$

Wobei ε der Einfallswinkel zur Lichtquelle ist, r die Entfernung Fläche zur Lichtquelle und I die Lichtstärke der Lichtquelle. Der Abstand der begrenzenden linken und rechten Grenzmessfläche zur Drehachse ist identisch und die Variation der Beleuchtungsstärke hebt sich hiermit auf. Die effektiv beleuchtende Fläche wird somit größer bei Vergrößerung des Winkels zur Normalen. Der Raumwinkel unter dem die Fläche betrachtet wird, bleibt allerdings konstant. Es hat sich gezeigt, dass die zur Drehachse symmetrisch positionierte Messfläche mindestens ein Längen-Breiten-Verhältnis von 10:1 haben sollte. Der Messort muss eine zweidimensionale Ausbreitung aufweisen, damit der Einfluss der Schattigkeit der Texturfunktion mit grober Ausdehnung gemessen werden kann. Die in dem Fall verwendete Messfläche umfasst 3 x 0,3 cm (Bild 8 zeigt eine stark vergrößerte Darstellung).

Zur Durchführung der Messungen werden auf dem Probenhalter nacheinander drei Materialproben befestigt. Im Winkelrastermaß von fünf Grad werden nun jeweils eine Leuchtdichtemessung sowie eine Farbbildaufnahme mit der Kamera LMK 5 Color durchgeführt.

Die Materialproben aus Kollagenfasern sind speziell angefertigte Muster. Diese Muster bestehen aus einer relativ konstanten Grundstruktur und Körperfarbe.

Das bedeutet, Material 1 ist das „ungenarbt“ Basismaterial, das nicht weiter geformt wurde. Material 2 und 3 bestehen ebenfalls aus dem gleichen Basismaterial jedoch wurde anschließend über Walzen eine differente Oberflächentextur geformt.

Tabelle 2: Übersicht Materialproben

Muster	Strukturierung
1	Grundmaterial (Materialprobe 1)
2	Grundmaterial + feine Prägung (Materialprobe 2)
3	Grundmaterial + grobe Prägung (Materialprobe 3)

Zum Nachweis des gleichen Basismaterials wurden die drei Materialproben mit einem Laserscanningmikroskop vermessen. Die folgende Abbildung zeigt einen stark vergrößerten Oberflächentopographieausschnitt.

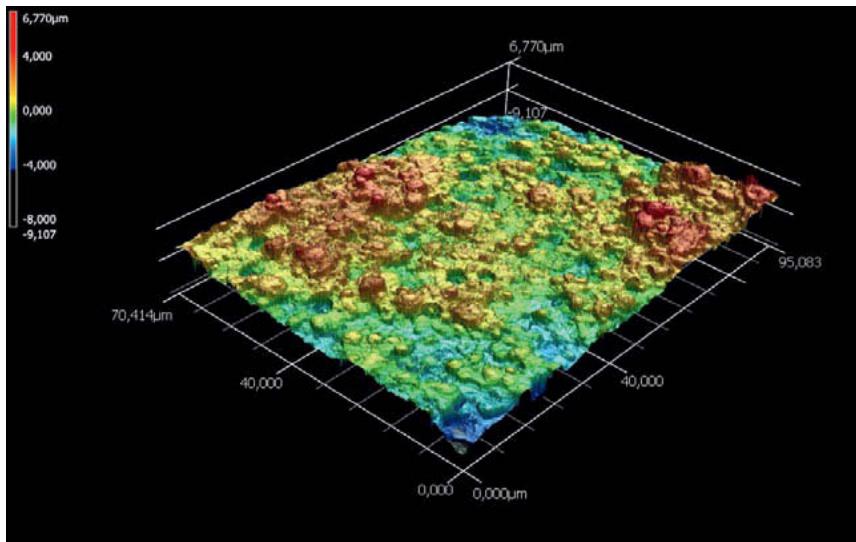


Bild 9: Topographie-Messung Grundmaterial

Dabei kann das Grundmuster bei Vergleich der drei Varianten als vergleichbar angesehen werden. Folgende Bilderreihe zeigt eine 3D Aufnahme der gemessenen Materialien unter senkrechtem Blickwinkel mit reduziert vergrößerter Darstellung.

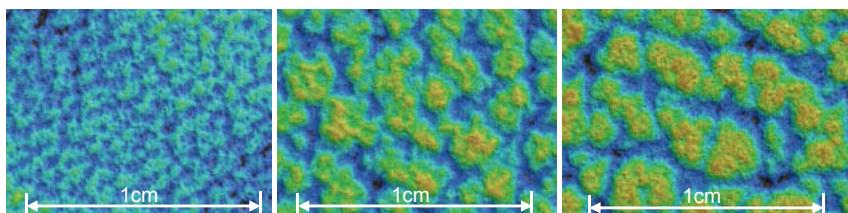


Bild 10 (von li. nach re.): 3D Ansicht der Materialprobe 1,2 und 3

Materialprobe 1 (linkes Bild) weist ein gleichmäßiges Erscheinungsbild auf, währenddessen im mittleren Bild die geringe Strukturierung und im Bild rechts die starke Strukturierung der Oberflächenform zu erkennen ist. Die Aufnahmen und Messungen wurden ebenfalls mit einem Laserscanningmikroskop durchgeführt.

4. Messergebnisse

Im folgenden Diagramm wurden die gemessenen Leuchtdichtewerte der definierten Messfläche über dem Verkippungswinkel aus der Horizontalen (0° entspricht dem Normal zur optischen Achse; siehe Bild 7) aufgetragen. Die Leuchtdichtewerte entstehen hierbei aus dem arithmetischen Mittelwert aller innerhalb der Messfläche ermittelten Pixelwerte.

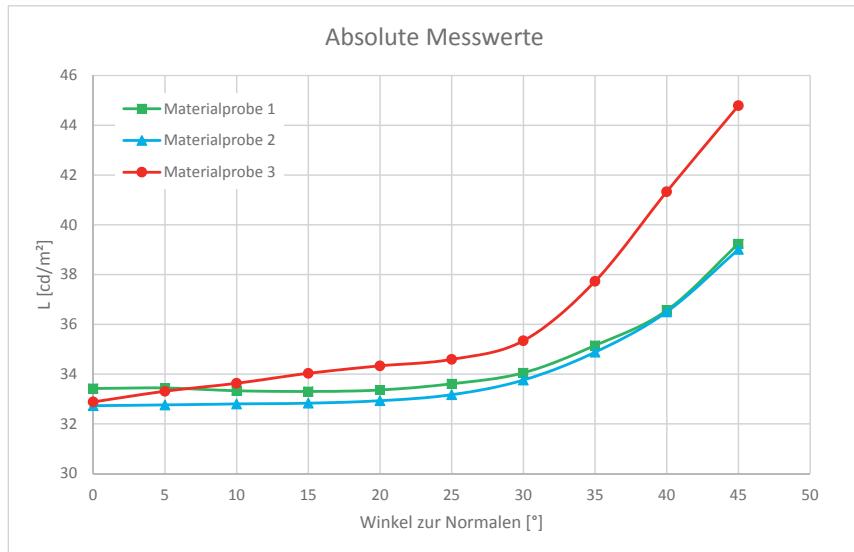


Bild 11: Absolute Messwerte Leuchtdichte

Unter gleichem Betrachtungsraumwinkel wird in der Normalen (0°) die größte Leuchtdichte bei der unstrukturierten Oberfläche (Materialprobe 1) detektiert. Die beiden unterschiedlich strukturierten Oberflächen starten hingegen mit einem geringfügig reduzierten Helligkeitswert.

Materialprobe 3 startet dabei bei einem Wert zwischen Materialprobe 1 und Materialprobe 2. Während Materialprobe 2 ab einer Abweichung von 40° zur Normalen die Leuchtdichtewerte der unstrukturierten Oberfläche übertrifft, zeigt Materialprobe 2 schon ab 10° einen höheren Wert auf.

Werden die Kurven unter normierter Darstellung betrachtet (siehe Bild 12), so zeigt sich ein kontinuierlich höherer Steigungskoeffizient des Materials mit der größten Narbung.

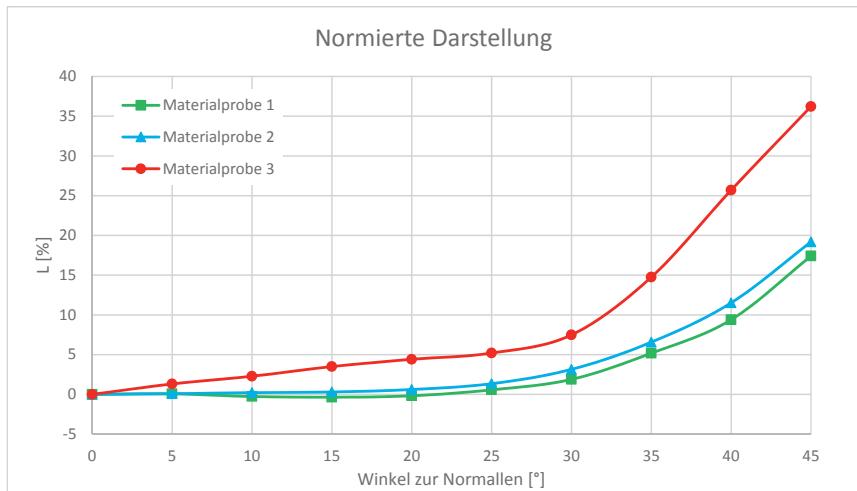


Bild 12: Normierte Darstellung Messwerte Leuchtdichte

Das folgende Diagramm (siehe Bild 13) zeigt die arithmetisch ermittelten Farbkoordinaten über die gleiche Messfläche. Einige der ermittelten Farbkoordinaten liegen übereinander, deshalb sind nicht alle 30 Messwerte im Diagramm erkennbar.

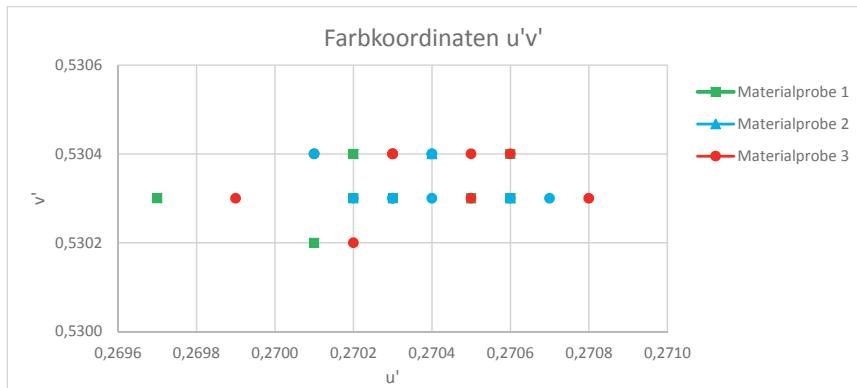


Bild 13: Farbkoordinaten u'v'

Einen Zusammenhang zwischen der Winkeländerung und den gemittelten Farbwerten kann mit dieser Darstellungsvariante nicht hergestellt werden. Eine alternative Auswertungs-methode ist es, die Farbkoordinaten u' getrennt voneinander zu betrachten. In Bild 14 wird der Verlauf für u' über die Winkeländerung aufgezeigt. Der Verlauf über v' ist nahezu konstant, weshalb hierbei auf eine Darstellung verzichtet wird.

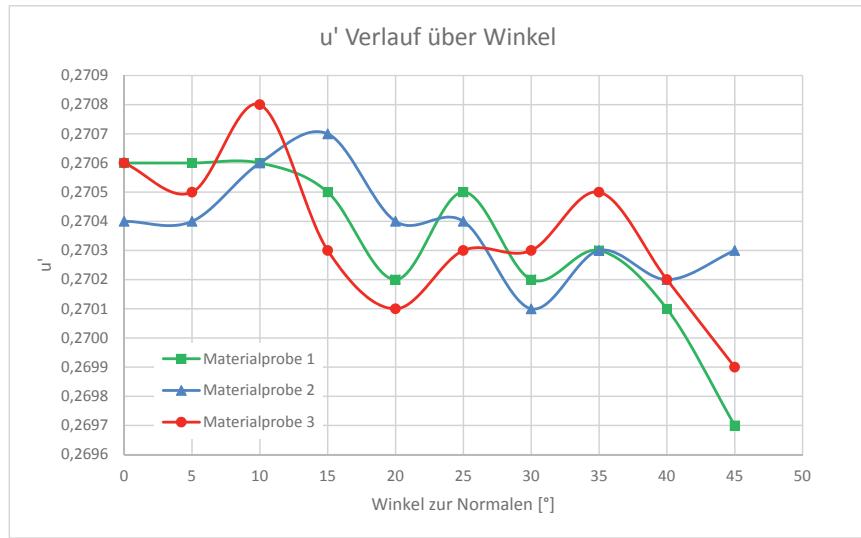


Bild 14: u' Verlauf über Winkel

Eine gewisse Farbabhängigkeit über den Betrachtungswinkel kann der optimierten Darstellung entnommen werden. Eine Abhängigkeit des Einflusses verschiedener Texturen kann jedoch nicht unmittelbar erkannt werden.

5. Interpretation der Messergebnisse

Das unstrukturierte Material zeigt die größte absolute Leuchtdichte unter senkrechter Betrachtung. Wohingegen das Material mit geringer Strukturierung einen sehr ähnlichen Helligkeitsverlauf wie das unstrukturierte Material annimmt und sich von diesem nur gering unterscheidet. Das grob strukturierte Material weist eine wesentlich stärkere Winkelabhängigkeit auf.

Bei Betrachtung der absoluten Leuchtdichte unter der Normalen liegt das am gröbsten strukturierte Material zwischen den anderen Beiden. Das bedeutet, dass dort der direkte Reflexionsanteil höher wird. Die Kontur ermöglicht hierbei die optischen Eigenschaften einer Mischvariante aus der fein geprägten und der ungeprägten Oberflächenkontur abzubilden.

Der direkte Einfluss der Selbstabschattung – wie im Einführungsbeispiel erwähnt – auf die wahrgenommene Farbe konnte nicht bestätigt werden. Im Einführungsbeispiel konnte das konstante „Grundmaterial“ nicht bestätigt werden.

6. Übertragung der Ergebnisse auf Messungen von beleuchteten Mesostrukturen

Im folgenden Abschnitt werden die Erkenntnisse des Beitrages auf die realen Messungen von beleuchteten Flächen mittels Leuchtdichte und Farbe übertragen. Die Ergebnisse sollen bei Messungen von typischen Ledermaterialien, Slushhäuten oder Kunstledern mit oder ohne Textur einen Leitfaden geben, um Abweichungen der Messwerte zu erklären.

Die dabei analysierten Oberflächentexturen bilden hierbei die oberen und unteren Grenzbereiche der typischen Texturierungen ab. Folgende Erkenntnisse können direkt übertragen werden:

- Je geringer die mesopische Ausprägung des Materials ist, desto höher ist der absolute Messwert aus dem Normal.
- Aber: Je größer die Oberflächentextur ist, desto höher wird ebenfalls die Leuchtdichte der Oberfläche durch den Betrachter aus der Normalen wahrgenommen.
- Wird eine Leuchtdichtenreflexion auf der Oberfläche nicht aus dem Normal gemessen, sind mit Abweichungen bei dem Betrachtungswinkel unter 45° von bis zu 18% bedingt durch den Einfluss der beleuchteten Fläche zu rechnen.
- Bis zu einem Winkel von 10° zur Normalen kann mit Abweichungen der Leuchtdichte von kleiner 3% gerechnet werden.

7. Ausblick

Der Beitrag beschreibt die nötigen Anforderungen um vergleichbare Messungen der Leuchtdichte an beleuchteten Oberflächen im Fahrzeuginterieur im Bereich von 0° - 45° zu bekommen.

Um die Winkelabhängigkeit weiter zu beschreiben, werden die Ergebnisse um die Abweichung zur Normalen von 45° auf 90° erweitert. Hiermit sollen auch sehr steile Beleuchtungswinkel demonstriert werden.

Als nächster Schritt soll auf der Basis dieser Messvariante ein direkter Zusammenhang zwischen topographischen Messwerten und dem Einfluss auf die Helligkeit und Farbe gewonnen werden. Somit soll der Einfluss an festen Messgrößen definiert werden. Hierbei soll ebenfalls die simulative Betrachtung Erkenntnisse gewinnen.

Des Weiteren wird der Einfluss durch die Selbstabschattung auf die wahrgenommene Farbe durch die integrale Messmethode unzureichend beschrieben.

8. Literaturangaben

- [1] Turbil, C.: BRDF Measurement and simulation of patterned surfaces to foresee its visual rendering, 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance, Prag, 2016
- [2] Page, M.J.: 3D Surface acquisition: comparison of two microtopographic equipments when measuring materials of cultural heritage, 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance, Prag, 2016
- [3] Schöneich, M.: Simulation vs perception of reflectivity/gloss – a critical review of optical surface characterization; 12. International Symposium on Automotive Lighting, 2017
- [4] Iacomussi, P.: Goniochromatic materials under different lighting conditions, 4th CIE Expert Symposium on Colour and Visual Appearance, Prag, 2016

Progressive LED-Blade-Technologie für eindrucksvolle Fahrzeugleuchten

Eindrucksvoll, robust und kostengünstig

Dr. Thorsten Hornung, Albert Ebenbichler, Marco Vollmer,
odelo GmbH, Stuttgart

Kurzfassung

Auf den ersten Blick ähneln LED-Blades organischen Leuchtdioden (OLED), weisen aber einen größeren Gestaltungsspielraum, eine höhere Zuverlässigkeit und wesentlich geringere Kosten als heutige automobile OLEDs auf. Ausschlaggebend hierfür ist, dass für LED-Blades auf die etablierte und ausgereifte LED-Technologie zurückgegriffen wird. Durch eine intelligente Kombination der LEDs mit lichtleitenden, lichtlenkenden sowie lichtstreuenden Elementen entstehen dünne, homogen leuchtende Flächen. Im Gegensatz zu OLEDs, die bisher noch auf Glas als Trägersubstrat und anorganisches Verkapselungsmaterial angewiesen sind, können LED-Blades kostengünstig im etablierten Spritzgussverfahren aus Kunststoff gefertigt werden. Damit sind, mit entsprechendem Optikdesign, auch dreidimensional gebogene und nahezu beliebig strukturierte Flächen realisierbar. Innerhalb einer LED-Blade lassen sich zudem getrennte Segmente definieren, die in Lichtfarbe und Intensität unabhängig voneinander abstrahlen können. Darüber hinaus lassen sich sowohl gelb leuchtende Fahrtrichtungsanzeiger als auch tiefrote Schluss- und Bremslichter verwirklichen, was heutzutage die OLED-Technologie noch in vielerlei Hinsicht vor größere Herausforderungen stellt.

Abstract

LED-Blades closely resemble organic light emitting diodes (OLED) in appearance but provide extended freedom of design and increased reliability at significantly reduced costs compared to current automotive OLEDs. Key to this achievement is that LED-Blades are based on established and mature LED technology. The intelligent combination of light guiding, light controlling and light scattering structures creates homogeneous illuminated surfaces. Contrary to OLEDs which still depend on glass as substrate and anorganic encapsulant, LED-Blades are cost-efficiently produced using well-established plastic injection molding technology. In combination with an appropriate optical design this enables 3D curved and almost arbitrarily structured surfaces. Additionally, within one LED-Blade separated areas can be defined which are

illuminated independent of each other. Furthermore, yellow direction indicators as well as deep red tail and stop lights can be realized. Achieving this is still a big challenge for today's OLED technology.

1. Einleitung

Fahrzeugeleuchten haben sich von einem funktionalen Bauteil zu einem wesentlichen Designmerkmal von Fahrzeugen weiterentwickelt. Sie vereinen ein ansprechendes Tag-Design im ausgeschalteten Zustand mit einer unverkennbaren Fahrzeuglichtsignatur beim Aufleuchten. Eine weitere Fokussierung auf das Leuchtendesign findet zusehends auch bei ruhenden Fahrzeugen durch immer differenziertere und durchdachtere Lichtinszenierungen statt. Was bereits tagsüber ins Auge fällt, gilt noch verstärkt im nächtlichen Verkehr: Sobald die Dämmerung hereinbricht, repräsentieren die Leuchten oft als einziges sichtbares Merkmal eines Fahrzeugs das Design mit ihrer leuchtenden Signatur.

Herausragend bezüglich des Designs und der Möglichkeiten einer ansprechenden visuellen Lichtinszenierung sind heutzutage Signalfunktionen in OLED-Technologie. Der Meilenstein hierzu wurde Anfang 2016 mit dem weltweit ersten OLED-Serieneinsatz in der Heckleuchte des BMW M4 GTS gelegt. Die Erfahrungen und Sachkenntnisse, die bei der Entwicklung und Produktion dieser Leuchte bei odelo reiften, wurden aufgegriffen und in die Entwicklung der hier vorgestellten LED-Blades miteingebracht.

Auf den ersten Blick ähneln die hier vorgestellten LED-Blades organischen Leuchtdioden, weisen aber einen – wie nachfolgend dargestellt – größeren Gestaltungsspielraum, eine höhere Zuverlässigkeit und Lebensdauer sowie wesentlich geringere Kosten als moderne automobile OLEDs auf. Ausschlaggebend hierfür ist, dass für die LED-Blades auf die etablierte und ausgereifte LED-Technologie zurückgegriffen wird. Bei der Entwicklung wurde zudem darauf geachtet, dass die LED-Blade selbst in einem Stück im etablierten Spritzgussverfahren hergestellt werden kann. Gesamtheitlich betrachtet können LED-Blades daher in hoher Qualität, kostengünstig, zeitnah und risikoarm in Automobilleuchten integriert werden.

2. Inspiration und Vision

Nichts ist so inspirierend wie die Natur. Für viele Lebensbereiche stellt die Natur brillante Lösungen bereit, mit der sie technische Herausforderungen löst. So erwächst auch in diesem Fall aus der Verknüpfung von Biologie und Technik eine Idee, die ihren Ursprung in der Natur findet: Die längliche Blattform eines Hainbuchenblättrigen Ahorns findet sich in der Grundform

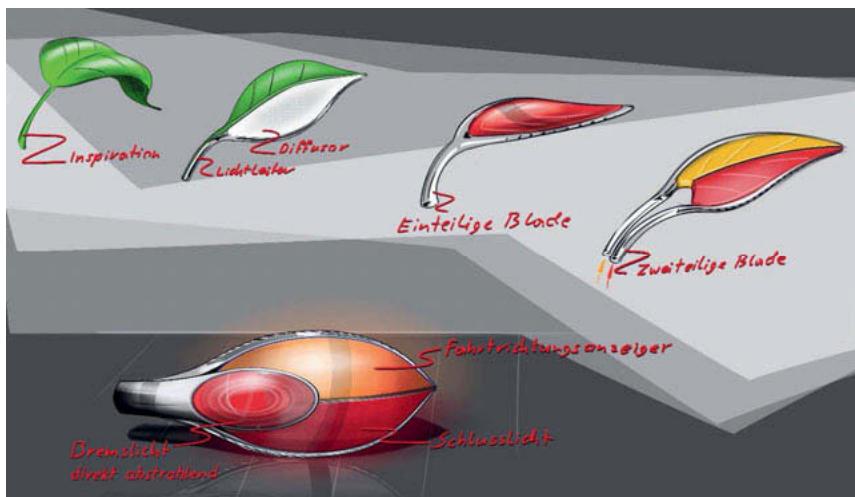


Bild 1: Von der Inspiration zur Vision. Aus der organischen Form eines Blattes entwickelt sich ein Leuchtelelement, das Fahrtrichtungsanzeiger, Schlusslicht und Bremslicht in einer dreidimensional-fließenden Form vereint.



Bild 2: Von der Skizze (rechts) zur realen Musterleuchte (links), bei der die Schlusslichtfunktion mit LED-Blades umgesetzt ist. Bereits mit dieser einfachen Blade-Geometrie lässt sie den breiten Designspielraum der LED-Blades erahnen.

ebenfalls in den Entwürfen der ersten LED-Blades. Bei näherer Betrachtung fallen an den Blättern des Baumes die scharf doppelt gesägten Ränder auf, die sich nun in den Lichtleiterprismen des Lichtelements wiederfinden. Gespeist werden diese von einem umrahmenden Lichtleiter, der seine Grundform und Ausrichtung dem Blattstiel entnimmt (Bild 1). Der organische Ursprung und die flächige Form des Lichtelements bauen eine gedankliche Brücke zur OLED. Da die organischen Leuchtdiodenmaterialien für eine robuste und kostengünstige Lichtquelle aktuell nicht herangezogen werden können, finden sich, durch eine begriffliche Assoziation, nicht die Materialien, wohl aber die organische und somit dreidimensionale Form, die auch die Natur in den Blättern realisiert, in dem Konzept wieder.

Aus diesem Konzept heraus entwickelte sich eine Reihe an Optionen für technische Lösungen. Ausgehend von einer einteiligen LED-Blade zu zwei- und mehrteiligen LED-Blades eröffnen sich viele weitere Möglichkeiten – die auch hybride Lösungen beinhalten. Hierbei können direkt oder indirekt abstrahlende Lichtsysteme in oder an der Blade integriert werden.

Die treibende Kraft entnimmt die Blade nun nicht aus der Konkurrenz, sondern aus der Differenzierung zur konventionellen OLED, die aktuell in vielen Aspekten vor Herausforderungen steht. Die LED-Blade bietet demgegenüber, wie nachfolgend anhand einiger Beispiele gezeigt wird, vielfältige neue Designmöglichkeiten für den Serieneinsatz in zukünftigen Fahrzeugleuchten (Bild 2). Die Evolution der LED-Blades hat somit gerade erst begonnen.

3. Aufbau einer LED-Blade

Der prinzipielle Aufbau einer LED-Blade wird anhand der Skizze in Bild 3 erklärt. Als Lichtquelle dienen herkömmliche anorganische Leuchtdioden. Ihr Licht koppelt in Lichtleiter aus transparentem Kunststoff ein. Diese vereinen zwei Funktionen in sich. Sie ermöglichen es, die LEDs versteckt hinter einer Blende zu platzieren und deren Licht zur eigentlichen Blade zu leiten. Zusätzlich koppeln sie das Licht gleichmäßig entlang der Blade in die Leuchtfäche ein und sorgen so für ein homogenes Erscheinungsbild. Für die leuchtende Fläche der LED-Blade wird ein Kunststoff gewählt, der mit seinen Streueigenschaften bestmöglich zum jeweiligen individuellen Blade-Design passt.

Die LED-Blades werden im etablierten Zweitaktspritzgussverfahren hergestellt, sodass die transparenten, lichtleitenden Strukturen gemeinsam mit den lichtstreuenden Materialien ein kombiniertes Spritzgussteil bilden. Dieses beinhaltet auch die notwendige Haltestrukturfunktionalität. Dadurch entsteht eine LED-Blade, die nach Verlassen der Spritzgussmaschine ohne weitere Bearbeitung direkt in eine Fahrzeugeleuchte verbaut werden kann.

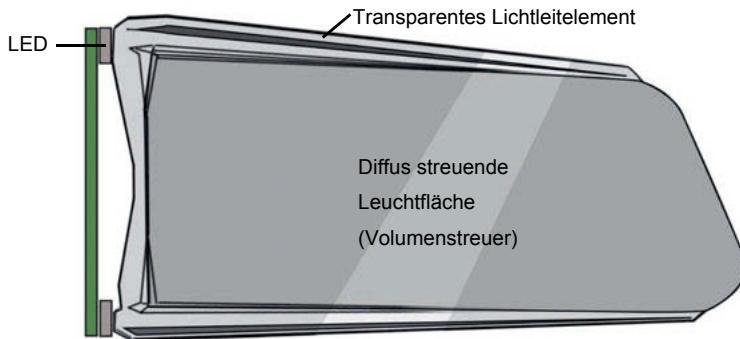


Bild 3: Prinzipskizze zum Aufbau einer LED-Blade. Eine oder mehrere LEDs koppeln Licht in ein transparentes Lichtleiterelement ein, das wiederum das LED-Licht in eine diffus streuende Leuchtfäche lenkt.

4. Technische Gestaltungsmöglichkeiten

In Bild 4 ist eine mit LED-Blades bestückte Leuchte im eingeschalteten Zustand gezeigt. Diese Leuchte ist ausschließlich mit LED-Blades einer einfachen Grundform und einer planen Leuchtfäche ausgestattet. Die Blades leuchten homogen und mit tiefroter Farbe ($\lambda_{Dom} \approx 630$ nm). Eine lebendigere Gestaltung – unter Einbeziehung eines größeren Designspielraums – lässt sich durch eine strukturierte oder maskierte Oberfläche, separat ansteuerbare Leuchtbereiche und eine dreidimensional gekrümmte Formgebung erreichen, wie in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert wird. Bild 5 zeigt diese Evolution anhand einer Musterleuchte im eingeschalteten Zustand.

4.1. Strukturierte LED-Blade-Oberfläche

In die LED-Blade-Rückseite können Strukturen eingebracht werden, um gezielt Licht aus der LED-Blade auszukoppeln. Sie heben sich im Erscheinungsbild als präzise leuchtende Linien vor dem homogen leuchtenden Blade-Hintergrund ab. Ein Beispiel hierfür sind die hexagonalen Strukturen, die in Bild 6 sowie auf den hinteren Blades der Musterleuchte in Bild 5 gezeigt sind. Für Serienleuchten werden diese Strukturen im Spritzgusswerkzeug vorgesehen, sodass weder ein zusätzlicher Spritzgusstakt noch ein weiterer Bearbeitungs-schritt notwendig ist. Ein großes Potential der LED-Blade ist ihre einfache Individualisierungsmöglichkeit: Strukturierungen der Bladeoberfläche lassen sich nicht nur direkt im Spritzguss einbringen, sondern auch nachträglich in eine unstrukturierte Blade-Leuchtfäche einarbeiten. So lässt sich das

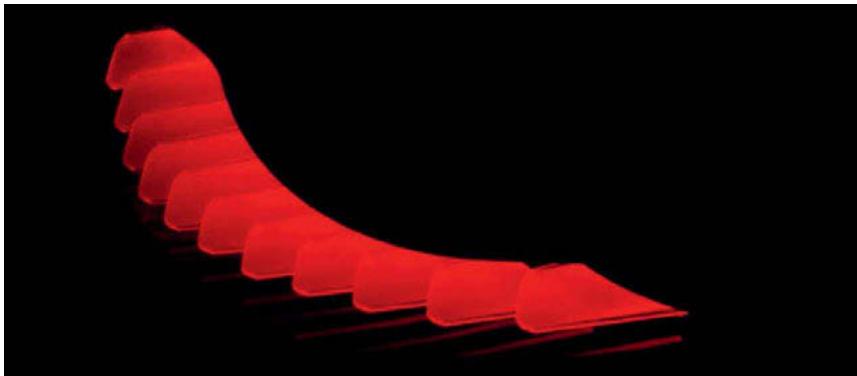


Bild 4: LED-Blade-Leuchte mit elf gleichartigen LED-Blades mit planer Leuchtfläche. Diese LED-Blades bilden die Grundlage für die in der Leuchte in Bild 5 verbauten LED-Blades, die durch Strukturierung und Maskierung designtechnisch weiterentwickelt wurden.



Bild 5: LED-Blade-Leuchte mit einer Schlusslichtfunktion aus elf LED-Blades, die im Unterschied zur Leuchte in Bild 4 durch Strukturierung und Maskierung optisch aufgewertet wurden. Die unterschiedliche Gestaltung der LED-Blades vermittelt eine Idee des breiten Designspielraums, der durch Strukturierung und Maskierung der Blades möglich ist.



Bild 6: LED-Blade mit Strukturierung, Maskierung und schwarzem Separator zur Trennung in einen oberen und einen unteren Teilbereich.

Erscheinungsbild einer Leuchte ohne Änderungen am Spritzgusswerkzeug für Kleinserien aufwerten und sogar für einzelne Leuchten individuell anpassen.

4.2. Maskierte LED-Blade-Oberfläche

Maskierte Bereiche auf den LED-Blades ermöglichen eine präzise Abgrenzung zu den leuchtenden Oberflächen und erzielen so einen hohen Kontrast. Diese Möglichkeit kann designtechnisch in vielerlei Hinsicht herangezogen werden. Sollen OLEDs mit dieser Technologie in ihrem Aussehen nachgebildet werden, können mit den Maskierungen beispielsweise deren elektrische Leiterbahnen auf der Oberfläche nachgezeichnet werden. Bild 6 zeigt eine derartige Ausführung mit einem Rahmen, der die Leuchtfläche umschließt, wie er oft bei OLEDs zur Stromverteilung eingesetzt wird.

Das Aufbringen der Maskierungen ist prinzipiell mit einer Vielzahl von Verfahren möglich. Von Folien über zahlreichen Druck- und Bedampfungsverfahren bis hin zu einer Umsetzung im Spritzguss gibt es hierzu für jedes Projekt die optimale Lösung.

4.3. Getrennt ansteuerbare Bereiche innerhalb einer LED-Blade

LED-Blades lassen sich so gestalten, dass verschiedene Teilbereiche getrennt voneinander aufleuchten, falls gewünscht sogar in unterschiedlichen Farben. Dazu ist es erforderlich, die Teilbereiche optisch voneinander zu entkoppeln. Eine Möglichkeit dies zu realisieren ist die Auftrennung der Blade durch einen Spalt. Für ein mechanisch zusammenhängendes Erscheinungsbild mit annähernd gleich wirksamer optischer Entkopplung kann es bereits ausreichend

sein, eine entsprechend tiefe Nut auf der Rückseite der Blade einzubringen. Bei beiden optischen Entkopplungsoptionen tritt allerdings ein Teil des Lichts an den Kanten des Spaltes oder der Nut aus und koppelt teilweise an der gegenüberliegenden Seite wieder in die Blade ein. Um dieses Übersprechen zu vermeiden, kann ein opaker Kunststoff in den Spalt eingebracht werden. Bild 7 zeigt diese Umsetzungsmöglichkeit mit einem lichtundurchlässigen Steg. Alle drei Entkopplungsmethoden sowie eine LED-Blade ohne optische Trennung sind in der in Kapitel 5 beschriebenen Musterleuchte dargestellt. Bild 8 zeigt diese Musterleuchte mit jeweils aktiviertem oberen Bereich der LED-Blades.

4.4. Dreidimensional gekrümmte LED-Blades

Zusätzliche umfangreiche Gestaltungsmöglichkeiten, um sowohl das Kaltdesign als auch das Warmdesign noch dynamischer zu inszenieren, bieten dreidimensional gekrümmte LED-Blades. Eine LED-Blade besteht aus einem einzigen Spritzgussteil und kann ohne weitere Nachbearbeitung eingesetzt werden. Insbesondere müssen keine zusätzlichen Folienschichten zur Homogenisierung des Lichts aufgebracht werden. Ein Tiefziehen oder anderweitiges Anpassen von Folienschichten ist somit nicht erforderlich. Dadurch ist die Produktion von dreidimensional gekrümmten LED-Blades weitgehend kostenneutral realisierbar gegenüber planen Geometrien.

5. Musterleuchte als Demonstrator

Als frei im Raum stehende, homogen leuchtende Flächen bieten LED-Blades einen Blickfang und ein hohes Maß an gestalterischen Möglichkeiten für ein ansprechendes Leuchtendesign, das bisher nur den OLEDs vorbehalten war. Die in Bild 2 und Bild 5 gezeigte Musterleuchte demonstriert sowohl die LED-Blade-Technologie an sich als auch die vielfältigen Designvariationen durch Strukturierung und Maskierung. Im Kaltdesign (siehe Bild 2) kommen diese beiden Möglichkeiten zur optischen Aufwertung bereits deutlich zur Geltung. Die glänzend-glatten Oberflächen der LED-Blades vermitteln im ausgeschalteten Zustand einen hohen Grad an Präzision und Wertigkeit. Im eingeschalteten Zustand (siehe Bild 5) treten die Blades mit ihrem OLED-ähnlichen Erscheinungsbild noch stärker hervor. In der Musterleuchte leuchten die Blades in tiefem rot ($\lambda_{Dom} \approx 630$ nm). Die Form der einzelnen Blades ist in diesem Muster identisch. Die LED-Blades unterscheiden sich ausschließlich durch ihre individuelle Strukturierung der Leuchtfäche, ihre Maskierung und in der Art der Trennung in zwei optische Teilbereiche. Die vorderste LED-Blade in Bild 5 zeigt die bereits beschriebene plane Ausführung ohne jegliche Strukturierung oder Maskierung. Die dahinterliegende, zweite Blade wurde dagegen

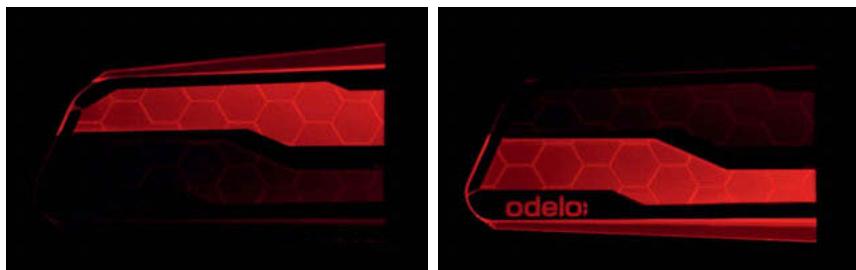


Bild 7: LED-Blade aus Bild 6. Der schwarze Separator trennt die Blade in einen oberen und einen unteren Teilbereich. Beim linken Bild speist nur die obere LED Licht ein, beim rechten Bild nur die untere.

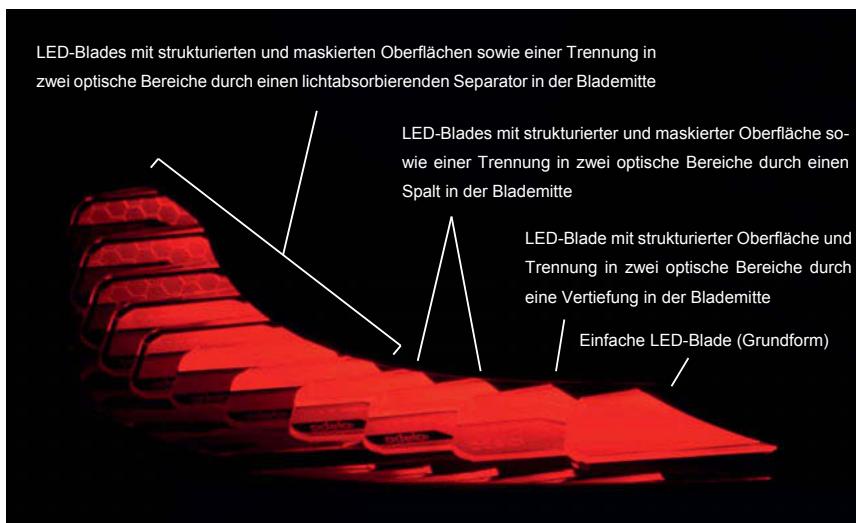


Bild 8: LED-Blade-Musterleuchte: Bei jeder Blade ist nur die obere LED eingeschaltet. Deutlich zu erkennen ist, dass ohne Trennung der Blade-Bereiche die LED-Blade weiterhin weitgehend homogen leuchtet (erste Blade). Durch eine tiefe Nut (zweite Blade) oder einen Luftspalt (dritte und vierte Blade) lässt sich bereits eine gewisse Bereichstrennung erreichen. Mit einem lichtundurchlässigen Separator (alle weiteren Blades) können die beiden Bereiche der LED-Blade optisch vollständig getrennt angesteuert werden.

mit einer Struktur auf der Rückseite der Leuchtfäche versehen, die präzise leuchtende Linien erzeugt. Die horizontale Mittellinie wurde mittels einer Nut so tief ausgeführt, dass sie die LED-Blade optisch in zwei separat ansteuerbare Bereiche trennt. Dadurch besitzt diese LED-Blade die Möglichkeit, beispielsweise für Animationen, separat nur in ihrer oberen oder unteren Hälfte zu leuchten. Diese Funktionalität wird in Bild 8 verdeutlicht, in dem in der Leuchte jeweils nur die oberen einspeisenden LEDs eingeschaltet sind. Während die vorderste LED-Blade ohne optische Trennung weitgehend homogen leuchtet, ist in den dahinterliegenden Blades ein deutlicher Helligkeitsunterschied zwischen oberer und unterer Bladelhälfte zu erkennen. Auf die vorderste, schlichte LED-Blade und die dahinterliegende Blade mit Strukturierung und optischer Trennung folgen die LED-Blades 3 und 4. Bei ihnen wurde das Design um eine Maskierung ergänzt, die einen starken Kontrast zur homogen leuchtenden Bladelfläche setzt. Zudem durchdringt die bereichstrennende horizontale Mittellinie in dieser Ausführung die Blade vollständig – die Trennung ist somit mittels eines Schlitzes realisiert.

In den weiteren LED-Blades 5 und 6 wird die auf die LED-Blades aufgebrachte opake Maskierung um eine horizontale schwarze Trennlinie ergänzt. Bei dieser Linie handelt es sich nicht um eine reine Maskierung – sie ist gleichzeitig ein Separator, der die Durchdringung der LED-Blades 3 und 4 ersetzt. Dieser Separator kann im Mehrtaktspritzzgussverfahren direkt in die Blades eingebracht werden. Er verhindert leuchtende Kanten an den separierten Bereichen und trennt sie damit optisch stärker, weil das optische Übersprechen von einem in den anderen Bereich erheblich reduziert wird.

Die weiteren LED-Blades in der Leuchte demonstrieren durch weitere Designvarianten mit unterschiedlichen Strukturierungen und Maskierungen, wie umfassend sich das Erscheinungsbild mit diesen einfachen Gestaltungsmitteln verändern und aufwerten lässt. Selbstverständlich verfügt die Musterleuchte über eine Einzelansteuerung der LEDs mit Pulsweitenmodulation (PWM) und ermöglicht dadurch vielfältige Animationen. Ein Beispiel ist in Bild 9 als Bildfolge dargestellt.

6. Integration in Serienleuchten

Ausgehend von den derzeitigen OLED-Leuchtentdesigns, bei denen aus vielerlei Gründen nur wenige unterschiedliche OLED-Formen eingesetzt werden können, bietet die LED-Blade-Technologie durch ihre große Individualisierbarkeit ein hohes Potential für zukünftige Leuchten. Um die Technologie in Leuchten zielführend zu integrieren, steht neben den gestalterischen Möglichkeiten auch die Integriert- und Modularisierbarkeit im Vordergrund. Hierzu ist die LED-Blade als kompaktes Leuchtmittel, das in Bezug auf die nötigen Stückzahlen in verschiedenen Varianten umsetzbar ist, ausgearbeitet worden.

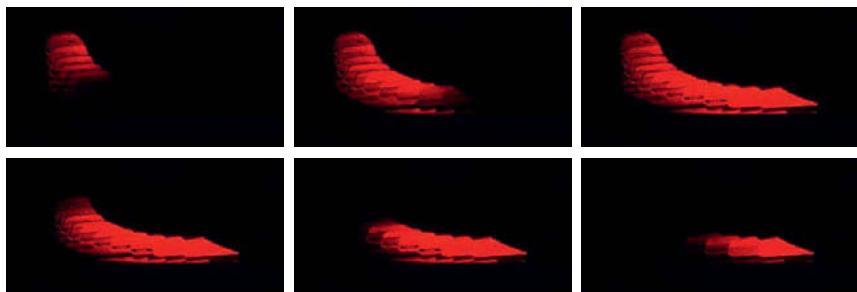


Bild 9: Einzelbilder einer Animation der in Bild 5 vorgestellten Musterleuchte. Dadurch, dass die LED-Blades einzeln mit Pulsweitenmodulation ansteuerbar sind, lassen sich beliebige Animationen umsetzen.

Abhängig von der zu realisierenden Signalfunktion eignet sich als Basis für die LEDs eine Metallkerneplatine in Verbindung mit einem Kühblech. Diese Elektronikkomponente wird mit der Kunststoffblade zu einer festen Einheit zusammengefügt und bildet so ein eigenständiges Leuchtmittel. Auch für die Befestigung des Leuchtmittels in der Leuchte stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die in Abhängigkeit der Bladegröße und der Anforderungen angepasst werden können.

Oftmals soll sich die Fahrzeugausstattungsklasse auch im Fahrzeugleuchtendesign nach außen widerspiegeln. Wenn die Leuchten dabei in ihrer Form gleich bleiben sollen, können LED-Blades eine ihrer großen Stärken ausspielen. Durch die beschriebenen Individualisierungsmöglichkeiten, insbesondere durch Maskierungen, lassen sich einfach stark unterschiedliche Kalt- und Warmanmutungen realisieren. Auch für Modellpflegemaßnahmen, bei denen für das Fahrzeug optische Details angepasst werden sollen, bietet diese Technologie eine einfache, robuste und kostengünstige Möglichkeit.

7. Zusammenfassung

Durch ein abgestimmtes Zusammenspiel von transparenten lichtleitenden Elementen und optischen Volumenstreuern entstehen LED-Blades. Sie bilden im Aussehen organische Leuchtdioden als dünne und homogen leuchtende Flächen nach, sind aber darüber hinaus in der Lage, auch organische, im dreidimensionalen Raum gekrümmte Formen anzunehmen. Diese Designmöglichkeiten verbinden sie mit der Zuverlässigkeit etablierter LED-Technologie. Alle gängigen LED-Farben stehen für LED-Blades zur Verfügung. In der Entwicklung der LED-Blades wurde darauf geachtet, eine kostengünstige Produktion mit etablierten Produktionsverfahren

zu ermöglichen. So kann der optische Teil der LED-Blades vollständig und ohne Nachbearbeitung mittels Spritzguss hergestellt werden. Der Weg für eine kostengünstige und zügige Umsetzung in ein Serienprodukt ist damit geebnet.

Eine weitere Stärke der LED-Blades ist ihre optische Differenzierbarkeit. Durch Oberflächenstrukturen und Maskierungen lassen sich LED-Blades mit einfachen Mitteln optisch aufwerten und individualisieren. Unterschiedliche Blade-Designs für verschiedene Ausstattungsklassen modifizieren die Fahrzeugleuchten optisch stark, während die technischen Unterschiede gering sind. Durch Nachbearbeitung und Veredelung fertiger LED-Blades lassen sich Varianten für Fahrzeugsondereditionen kostengünstig erzeugen, die sich optisch deutlich vom Standardprodukt differenzieren. Somit wird eine optische Veränderung im Leuchtendesign bereits für Stückzahlen ermöglicht, bei denen die Kosten für die Entwicklung einer individuellen Leuchte bisher zu hoch waren.

Diffraktive Diffusoroptiken als Ersatz für Volumenstreuer

Diffractive diffusor optics as substitute of volume scattering material

Dipl.-Ing. **Martin Mügge**, HELLA GmbH & Co. KGaA, Lippstadt

Abstrakt

Das Erscheinungsbild aktueller Heckleuchten ist geprägt von Schlusslichtfunktionen mit sehr homogener Ausleuchtung. Zur Erreichung der Homogenität wird oft ein volumenstreuendes Material, auch DF-Material genannt, genutzt. Eine DF-Zusatzlichtscheibe, die vor einem Optiksystem, z.B. einem Reflektorsystem, positioniert ist, bewirkt eine mehrfache Lichtablenkung im Material und damit eine große Lichtstreuung beim Durchtritt des Lichts durch die Scheibe. Die große Lichtstreuung ist vorteilhaft für die Homogenität der Leuchtfäche unter verschiedenen Blickwinkeln; nachteilig ist jedoch die große konzentrische Streuung die Licht auch in Winkelbereiche lenkt die für die Funktion selbst nicht genutzt sind. Das DF-Material ist für einen SAE-Einsatz nicht geeignet, da es nicht AMECA gelistet ist und deshalb von Fahrzeugherstellern zwar für ECE aber nicht für SAE eingesetzt wird.

Eine Optimierung des Systems wird durch Verwendung von diffraktiven Diffusoroptiken als Oberflächenstruktur verfolgt. Vorteilhaft ist die Lichtstreuung der diffraktiven Diffusoroptik beliebig vorzugeben, d.h. durch eine bewusste Anpassung der Streuung zu einer rechteckigen Lichtverteilung mit optimaler Abstimmung auf die Signalfunktion ist eine Steigerung des Wirkungsgrads erreichbar.

Vorgestellt wird eine Untersuchung mit unterschiedlichen Diffusoroptiken im Vergleich zur Ausführung mit DF23-Material. Lichtverteilungen, Lichtintensitäten und Leuchtdichtebewertungen geben einen Überblick über erzielbare Verbesserungen und somit Möglichkeiten einer Lichtstrom- oder LED-Reduzierung.

Schließlich wird ein Ausblick auf die fertigungstechnische Realisierung diffraktiver Diffusoroptiken für Serienprojekte gegeben.

Abstract

The appearance of actual rear lamps is defined by tail lights with an extremely homogenous illumination. This homogeneity is often done by a volume scattering material, called DF-material, placed as an additional lens in front of a lighting system, e.g. a reflector system.

The light scattering internal the DF-material leads to a wide light distribution and therefor to a homogeneous illumination in all viewing directions. The disadvantage is the concentrical light scattering of the DF-material, light is spread to directions where it is not needed for the function reducing the system performance. The DF-material is not listed in the AMECA-list, for this it is critical to use the DF-material for rear lamps in USA.

An optimization will be done with diffractive or microstructured diffusor optics onto a clear, transparent lens, giving an individual light scattering into a rectangular field to increase the overall performance of the lighting systems, still having a diffuse, homogeneous appearance. The investigation of different diffusor optics in comparison to DF-material with measurements of intensities and luminances demonstrates the possibilities and performances of such diffusors. There will be an outlook to tooling and manufacturability for upcoming series projects too.

1. Homogene Lichtfunktion mit Volumenstreuer

Eine homogene Ausleuchtung einer Schlusslichtfunktion, oft als langgestreckte linienförmige Signatur, stellt nach wie vor für die Lichttechnik eine Herausforderung dar, insbesondere bei Verwendung konventioneller Kissenoptiken in Lichtscheiben oder Zusatzlichtscheiben. Mit dem Einsatz volumenstreuendem DF-Materials stand eine Option zur Verfügung die sowohl im Kalterscheinungsbild als milchig-diffuse Fläche wie auch in der Ausleuchtung der Funktion mit einer bisher nicht erreichten Homogenität überzeugt. Im Material verteilte lichtstreuende, perlförmige Polymerpartikel sorgen für eine interne Streuung des Lichts, bei gleichzeitig hoher Transmission wird eine breite Lichtabstrahlung erreicht und mit einer geeigneten Beleuchtungsvorrichtung auch eine homogene Ausleuchtung.



Bild 1: Heckleuchten mit DF-Material, links Serie Audi A1, rechts Prototyp

Die Automotive Manufacturers Equipment Compliance Agency (AMECA) listet alle Materialien für optische Bauteile und Rückstrahler gemäß den Anforderungen der US Sicherheitsbe-

stimmungen und der Vehicle Equipment Safety Commission (VESC). Hierbei sind Testbedingungen zugrunde gelegt die von einem eigenstreuenden DF-Material nicht erfüllt werden können. Deshalb sind DF-Materialien nicht AMECA-gelistet und es setzt sich zunehmend durch, dass auch für innen angeordnete, nicht direkt der Witterung ausgesetzte, Bauteile nur noch AMECA-gelistete Materialien verwendet werden. Somit sind SAE-Leuchten mit DF-Material zur Homogenisierung einer Leuchtfläche nicht mehr möglich.

Die Vorteile eines streuenden Materials in optischen Bauteilen für die Gestaltung einer homogen ausgeleuchteten Funktionsfläche muss zukünftig mit anderen Mitteln erreicht werden.

2. Möglichkeiten der Lichtstreuung für diffuse Leuchtflächen

Das besondere Merkmal von Signalfunktionen mit DF-Material-Zusatzlichtscheibe ist ein sehr gleichmäßiges, milchig-diffuses und undurchsichtiges Erscheinungsbild im unbeleuchteten Zustand und eine, in Verbindung mit dem dahinter angeordneten optischen System, oft sehr gleichmäßige Ausleuchtung. Alternativ kommen Erodierstrukturen, Ätzstrukturen oder Laserstrukturen zum Einsatz, häufig beidseitig auf den Flächen einer Zusatzlichtscheibe, um eine homogene Ausleuchtung zu erreichen. Diese Art der Strukturen bieten jedoch keine definierte Möglichkeit der Beeinflussung der Lichtstreuung und stoßen für die Forderung nach homogen leuchtender Fläche schnell an lichttechnische Grenzen.

Ein vergleichbares Kalterscheinungsbild ist auch durch optische Streuelemente, beispielsweise Kissenoptiken, mit sehr kleinen Dimensionen zu erreichen, so dass das menschliche Auge nicht mehr in der Lage ist die einzelnen Streuelemente aufzulösen.

Heute übliche Standardoptiken mit Dimensionen größer 1mm sind noch deutlich erkennbar; reduzierte Dimensionen bis zu 0,5mm Kantenlänge der Kissenoptik verbessern das Erscheinungsbild, sind aber dennoch als Optikraster erkennbar. Mit weiterer Reduzierung der Größe auf 0,2mm bis 0,3mm Kantenlänge der Streuoptiken wird der Bereich des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges erreicht und die Optikfläche wirkt wie eine diffuse Struktur.

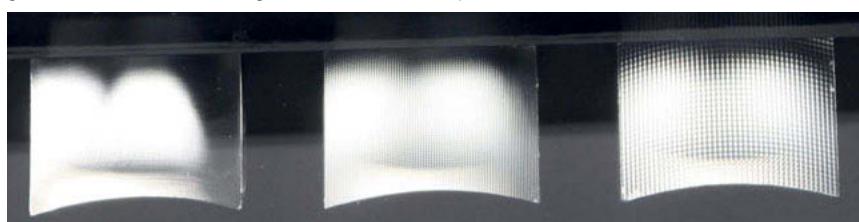


Bild 2: Reflektoren mit Kissenoptiken unterschiedlicher Größe, v.l.n.r. 0,2mm; 0,5mm; 1mm

Der hierfür erforderliche Bearbeitungsaufwand mit Diamantfräsen oder Diamantdrehen in höchster Präzision und entsprechendem Zeitaufwand verteutet die Herstellung optischer Werkzeugeinsätze gegenüber Standardoptiken. Naturgemäß treten insbesondere bei gekrümmten und stärker gepfeilten/geneigten Optikflächen zusätzliche Schwierigkeiten auf. Die Grenzen des Machbaren für diese Art der Bearbeitung sind erreicht, wenn die Kissenoptiken auf 3D-Flächen gerechnet oder auf Prismenstufen angeordnet sind.

Bei der genannten Größe von ca. 0,2mm bis 0,3mm ist deshalb heute die Grenze der mechanischen, spanenden Bearbeitung zu ziehen, für kleinere Optikdimensionen müssen andere Herstellverfahren genutzt werden. Mikrooptische Strukturen oder diffraktive Optiken werden deshalb im Laser-Direkt-Schreibverfahren oder durch lithografische Verfahren realisieren.

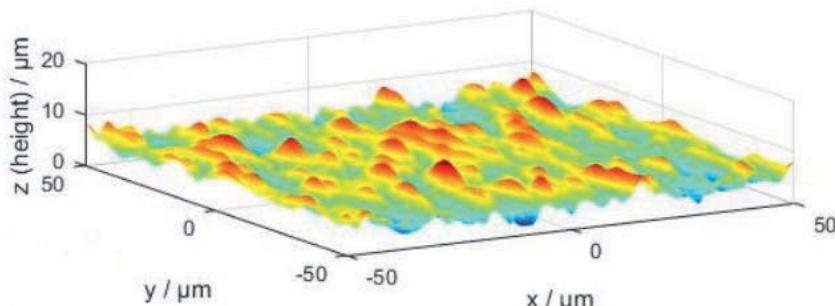


Bild 3: Beispieldarstellung(Ausschnitt) einer berechneten Diffusorstruktur

Eine Masteroptik wird lithografisch in einem planen Photoresist erstellt, abgeformt und schließlich als dünner Shim (Galvano) abgeformt und aufgebaut, der dann auf einem Rollenwerkzeug für den Rolle-zu-Rolle-Prozess einer Folienfertigung oder auf einen Werkzeugeinsatz befestigt ist um im Spritzgusswerkzeug verwendet zu werden.



Bild 4: Prozesskette zur Erstellung von Bauteilen mit mikrooptischen Strukturen

Die Herstellung von größeren Optikscheiben mit mikrooptischen oder diffraktiven Strukturen im Spritzguss bedingt die Definition der geeigneten Spritzgussparameter, des Werkzeugkonzepts und des Fertigungsprozesses insgesamt. HELLA untersucht dazu in einem Vorentwicklungsprojekt diese technologischen Schritte um die erforderliche Sicherheit des Prozesses und die Qualität der Optikscheiben in einer Serienfertigung zu gewährleisten.

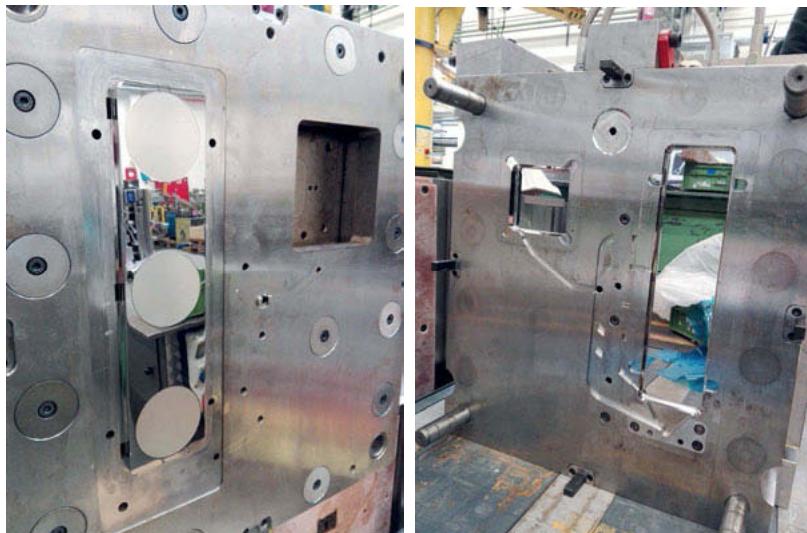


Bild 5: Erprobungswerkzeug mit drei Formeinsätzen mit mikrooptischer Struktur

In Abhängigkeit von der Größe und Formgebung einer Lichtscheibe ist zur werkzeugtechnischen Umsetzung ein angepasstes Werkzeugkonzept notwendig. Die Fließfähigkeit des Kunststoffes und damit die Möglichkeit den Kunststoff auch in die feinste Struktur der Werkzeugwand eindringen zu lassen und die Struktur in hoher Qualität abzuformen ist maßgeblich für die Qualität des Spritzteils und die lichttechnische Performance.

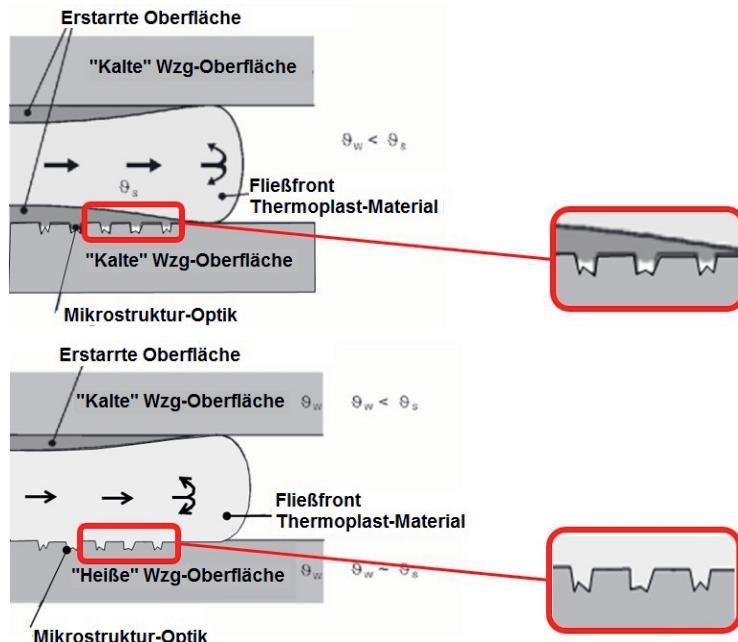


Bild 6: Unterschied von konventionellen(oben) und variothermen Werkzeugkonzept(unten)

Während bei einer konventionellen Temperierung des Werkzeugs der Kunststoff an der „kalten“ Werkzeugwand zu erstarren beginnt und nicht vollständig in die Struktur eindringen kann (obere Darstellung in Bild 06) kann bei einer variotherm temperierten Werkzeugwand die Temperatur optimal eingestellt werden um eine vollständige Abformung der Struktur über den Fließweg und Spritzprozess zu erreichen (untere Darstellung in Bild 06).

Ein DF-ähnliches Kalterscheinungsbild ist möglich, wenn die Diffusoroptik auf der Aussenseite der Optikscheibe eingebracht ist. Je nach Optikausführung kann es jedoch erforderlich sein eine zweite Diffusoroptik innenseitig vorzusehen oder die Diffusoroptik nur innenseitig zu nutzen. Im letzteren Fall ist eine aussenseitige schwache Erodierstruktur hilfreich um den Einblick in die Wandstärke der Optikscheibe zu verhindern und das gewünschte Erscheinungsbild einer diffusen Optikscheibe zu bekommen.

Vorteil der mikrooptischen und diffraktiven Diffusoroptiken ist, dass eine beliebige Anpassung der Streuwinkel möglich ist, sowie eine spezielle Auslegung der Lichtverteilung, z.B. als TopHat-Verteilung mit einem breiten Plateau gleichbleibender Lichtstärke. Im Gegensatz zur konzentrischen Lichtverteilung einer DF-Scheibe ist eine rechteckige Lichtverteilung mit gro-

Bei horizontalen Streuwinkel und kleinen vertikalen Streuwinkel möglich was eine Verbesserung des Systemwirkungsgrads bewirkt. Auch besondere Lichtverteilungen, beispielsweise als Lineardiffusor mit extrem kleinem Streuwinkel ($0,1^\circ$ bis 1°) in eine Richtung und großem Streuwinkel in orthogonaler Richtung zur Erzeugung einer Lichtlinie für jede LED-Lichtquelle oder beispielsweise als Kreuz-Diffusor sind möglich. Das in Bild 05 dargestellte Werkzeug besitzt eine Optikstruktur für einen Kreuzdiffusor, d.h. für jede LED-Lichtquelle entsteht eine kreuzförmige Abbildung.



Bild 7: Gespritzte Kreuzdiffusor-Zusatzlichtscheibe

Die Werkzeug- und Spritzgusserprobung, durchgeführt mit unterschiedlichen Parameter-Einstellungen bezüglich Material (PMMA, PC), Anspritzpunkten (seitlich, unten), Druck, Temperatur und Temperierkonzept des Werkzeugs (isotherm, variotherm) liefert wichtige Erkenntnisse zur Festlegung und Absicherung einer Serienfertigung. Der Unterschied zwischen konventionellen isothermen und variothermen Betrieb des Werkzeugs, mit einer angepassten Temperierung des Werkzeugs über den Spritzvorgang, wird im Ergebnis der Abbildungsqualität des Kreuzdiffusors deutlich.

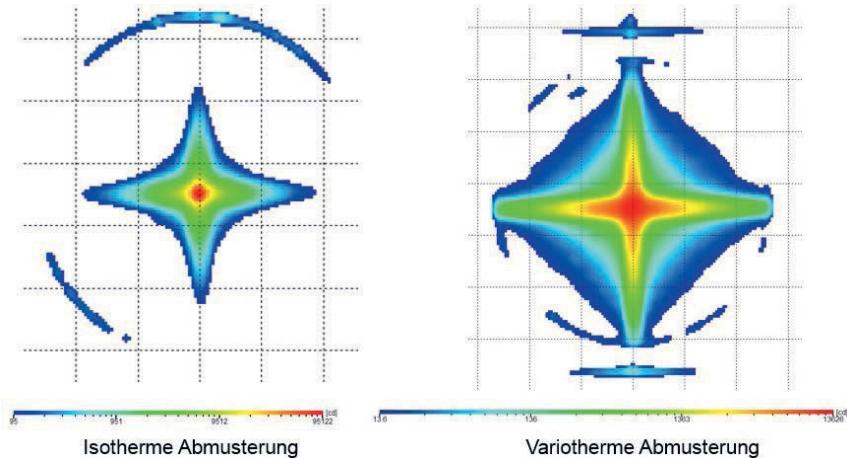


Bild 8: Leuchtdichteaufnahmen des Kreuzdiffusors, isotherm und variotherm

Die gespritzten Lichtscheiben im variothermen Prozess zeigen eine optimale Ausprägung der kreuzförmigen Lichtabbildung, wie sie auch der berechneten Auslegung entspricht, während im isothermen Prozess deutlich verkürzte und unpräzise Linien entstehen, sowie ein starkes zentrales Maximum entsteht.

3. Beschreibung mikrooptischer und diffraktiver Diffusoroptiken

Der Unterschied zwischen mikrooptischen und diffraktiven Strukturen besteht darin, dass bei mikrooptischen Strukturen die Erzeugung der Lichtverteilung noch in erheblichen Umfang durch Refraktion erfolgt, mit nur geringen Anteilen an diffraktiven Vorgängen, während bei diffraktiven Strukturen die Beugung von Licht (Diffraktion) hauptsächlich für die Lichtlenkung und Lichtverteilung verantwortlich ist und nur geringe refraktive Vorgänge vorliegen. Dies bietet die Möglichkeit das auftreffende Licht individueller und angepasster zu streuen und somit eine höhere Performance des Optiksystems insgesamt zu erzielen.

Ein Simulationsvergleich eines Optiksystems mit unterschiedlichen Strukturen soll dies verdeutlichen.

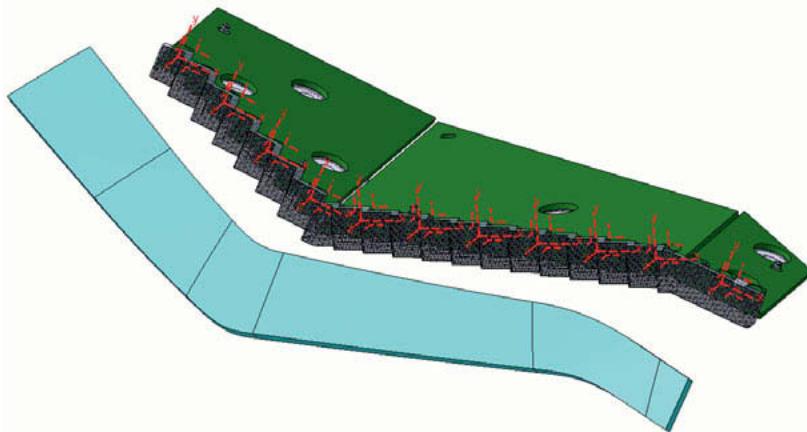


Bild 9: Optiksystem für Simulation

Gegeben ist ein Optiksystem mit einer konturierten Signaturfläche als Teil einer Außenlichtscheibe. Mit einem Abstand dazu sind TIR-Optiken mit einer geringen Vorstreuung des Lichts positioniert, die von elf LED beleuchtet sind.

Um die Performancesteigerung darzustellen ist nur jede zweite LED genutzt (Abstand der LED ist 19mm bzw. 23mm).

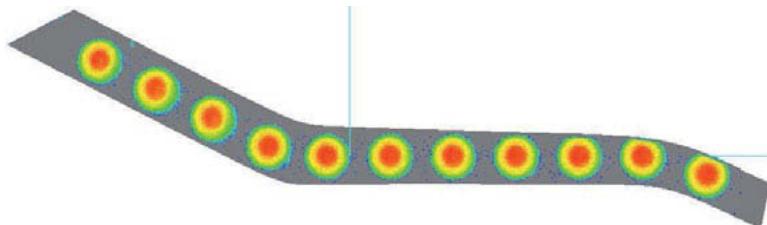


Bild 10: Ausleuchtung der Lichtscheibe durch TIR-Optiken, ohne Struktur in der Lichtscheibe

Die Innenfläche der Lichtscheibe ist mit einer Erodierstruktur VDI3400 Nr.36 bzw. im Vergleich dazu mit einer diffraktiven Diffusorstruktur von Firma Luminit mit einer Streuung von $60^\circ \times 10^\circ$ versehen. Alternativ besteht die gesamte Lichtscheibe aus dem DF23-Material.

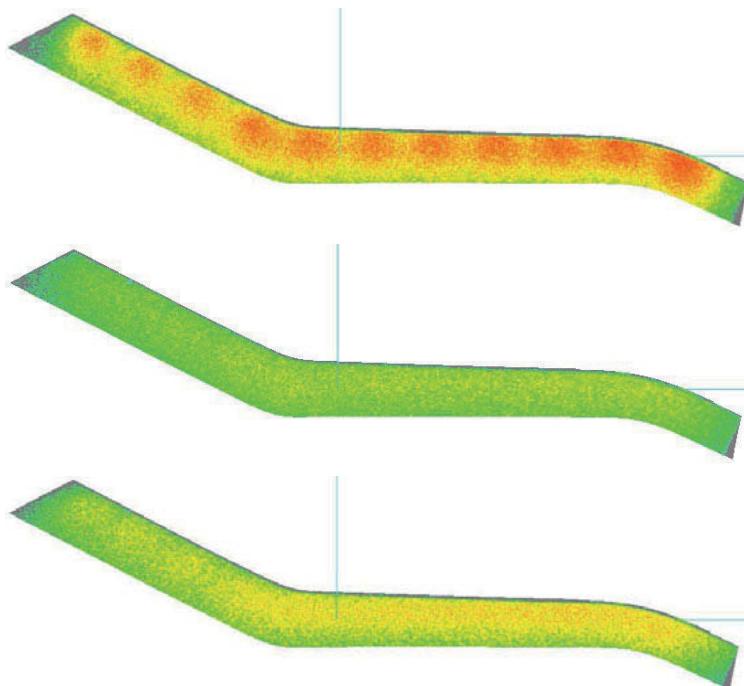


Bild 11: Ausleuchtung der Lichtscheibe im Vergleich, Erodierstruktur Nr. 36(oben), DF23 (mitte) und Luminitstruktur $60^\circ \times 10^\circ$ (unten)

Die Ausleuchtung der erodierten Lichtscheibe zeigt deutliche Inhomogenitäten und weist die konkreten LED-Positionen als erkennbare helle Spots aus während die Simulation mit der Luminitstruktur ein besseres Ausleuchtergebnis bezüglich der Homogenität zeigt. Bei Ausführung der Lichtscheibe mit volumenstreuenden DF23-Material ergibt sich eine ähnliche Ausleuchtung wie bei der diffraktiven Diffusoroptik, allerdings mit einem schwächeren Leuchtdichteniveau. Leuchtdichtekurven durch die drei Detektoren verdeutlichen den Eindruck.

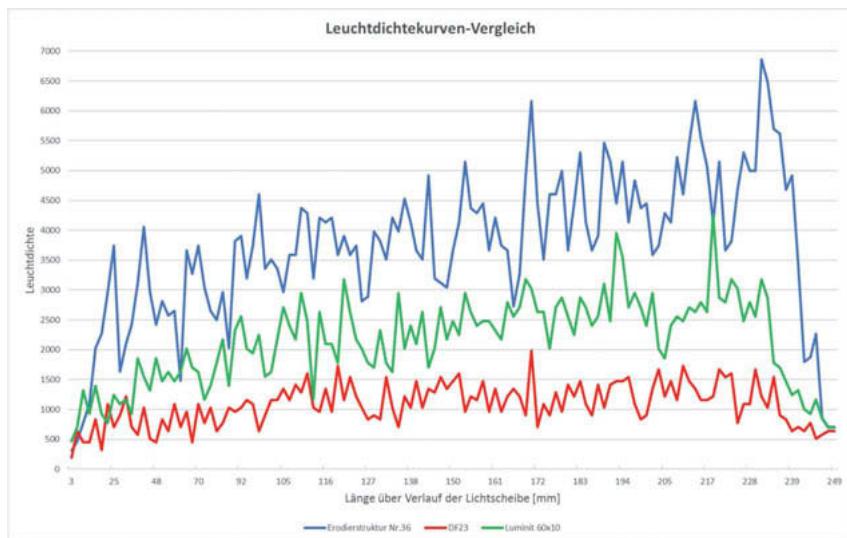


Bild 12: Leuchtdichtekurven im Vergleich

Die Leuchtdichtekurve zur Erodierstruktur VDI3400 Nr.36 zeigt deutliche Peaks die die einzelnen LED-Positionen markieren. Die Leuchtdichtekurve zum DF23-Material zeigt die geringsten Leuchtdichtewerte und insgesamt einen relativ gleichbleibenden Verlauf mit geringen Gradienten. Die Leuchtdichtekurve zur Luminitstruktur mit $60^\circ \times 10^\circ$ Streuung liegt zwischen den beiden anderen Kurven und weist größere Gradienten im Vergleich zum DF23-Material aber dennoch einen relativ gleichbleibenden Verlauf.

Werden alle vorhandenen LED in Verbindung mit der erodierten Lichtscheibe oder mit einer DF23-Lichtscheibe genutzt und simuliert ergeben sich die Ausleuchtungen gemäß dem folgenden Bild.

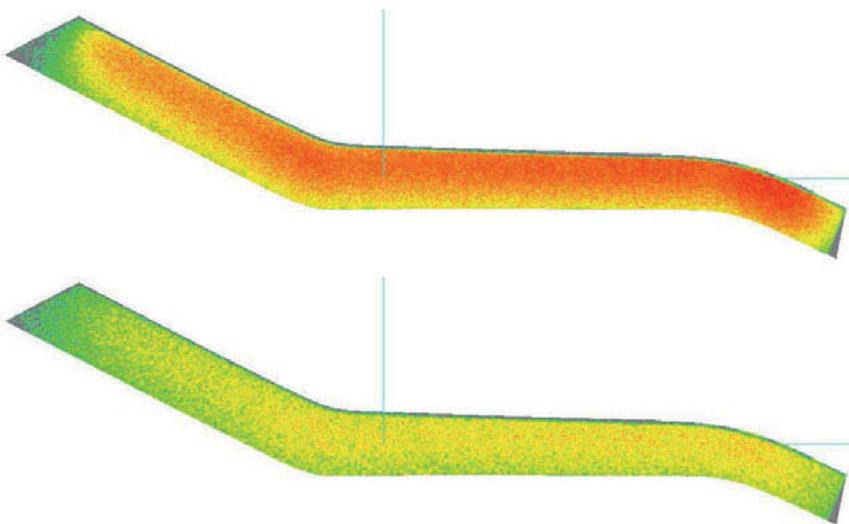


Bild 13: Ausleuchtung der Lichtscheibe mit Erodierstruktur VDI3400 Nr. 36(ober) bzw. DF23(unten) und doppelter LED-Anzahl

Die folgende Tabelle zeigt ausgewählte Werte im Vergleich zu den durchgeführten Simulationen.

Variante, simuliert mit 1lm/LED	Lichtstärke HV [cd]	LED-Anzahl	Gesetzlich i.O.	Mittlere Leuchtdichte [cd/m ²]
Erodierstruktur 36	10	11	Ja	2857
DF23	3	11	Nein	872
Diffusoroptik	5,5	11	Ja	1546
DF23	6	22	Ja	1727

Die homogene Ausleuchtung der Lichtscheibe ist bei Verwendung einer diffraktiven Diffusoroptik im Vergleich zu einer Erodierstruktur, insbesondere wenn nur eine Strukturfläche genutzt werden kann, mit deutlich weniger LED bzw. einem größeren Abstand der LED zueinander erreicht. Der Einsatz von DF23-Material als Lichtscheibe bewirkt eine gute Homogenisierung der Ausleuchtung, reduziert aber die Lichtstärke bei gleicher LED-Anzahl und LED-Lichtstrom erheblich, sodass die gesetzlichen Anforderungen an ein Schlusslicht nicht mehr

erfüllt sind, erst mit ungefähr doppelter LED-Anzahl wird die Lichtstärke und Leuchtdichte erreicht wie sie in der Ausführung mit der Diffusorstruktur vorliegt.

4. Untersuchung mittels einer modifizierten Serienleuchte

Für eine Untersuchung der Wirkung des Kalterscheinungsbilds und der lichttechnischen Performance unterschiedlicher Diffusoroptiken bietet sich die Modifizierung einer Serienleuchte an. Da viele Leuchten mit diffusen Schlusslichtfunktionen oft große Signaturflächen besitzen und in der Untersuchung auch die Bewertung einer Bremslichtfunktion betrachtet sein sollte fiel die Wahl auf die Heckleuchte (Teil1) der VW Passat Limousine.



Bild 14: Heckleuchte VW Passat Limousine

Vorteilhaft ist das Bremslicht als untere Leuchtfäche in kompakter Form in Kombination mit dem Schlusslicht zusammengebaut. Dies lässt eine einfache Modifizierung der Zusatzlichtscheibe zu, die in der Serienausführung mit Streuoptiken ausgeführt ist.

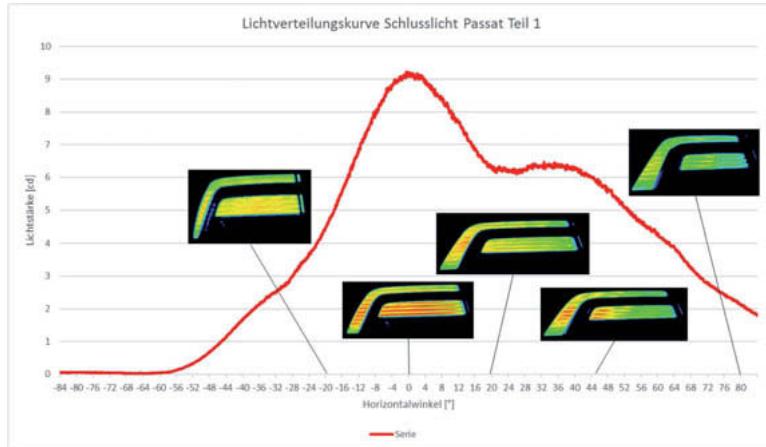


Bild 15: Lichtstärkeverlauf und Leuchtdichteaufnahmen der Serienleuchte

Das Bremslicht nutzt einen Zusatzreflektor der durch einen neuen Reflektor ersetzt werden kann um in Verbindung mit einer Diffusoroptik eine homogene Ausleuchtung zu generieren. Das Schlusslicht, mit sechs PowerTOPLED-LED, nutzt das Leuchtengehäuse als Reflektor. Die sechs LEDs des Schlusslichts sind auf einer am unteren Reflektorrand positionierten Leiterplatte aufgesetzt und beleuchten den Reflektor indirekt von unten, die sechs LED des Bremslichts sind auf der gleichen Leiterplatte positioniert.

Die Modifizierung und Untersuchung der Heckleuchte erfolgte in zwei Schritten.

4.1. Voruntersuchung

Für die Voruntersuchung ist die Optik der Zusatzlichtscheibe im Datenmodell entfernt um eine glatte Innen- und Aussenseite zu erhalten. Als STL-Urstück gebaut ist davon ein Silikonwerkzeug erstellt und mehrere transparente Abgüsse erzeugt. Auf die optikfreien Zusatzlichtscheiben sind innenseitig unterschiedliche holografisch-diffraktive Diffusoroptiken als Folienstücke aufgelegt – nicht flächig verklebt – und messtechnisch bezüglich der erzielten Lichtverteilung, Intensität und Homogenität beurteilt. Die Aussenseite der Zusatzlichtscheibe ist optikfrei.

Als Diffusoroptiken sind Folien der Firma Luminit mit folgenden Streuwinkeln verwendet:

- Folie 1: $60^\circ \times 10^\circ$
- Folie 2: $60^\circ \times 30^\circ$
- Folie 3: $75^\circ \times 45^\circ$
- Folie 4: $95^\circ \times 25^\circ$

Die mit den Folien präparierten Leuchten sind bezüglich Lichtverteilung und Lichtintensität des Schlusslichts und Bremslichts vermessen, zusätzlich sind Leuchtdichteaufnahmen unter verschiedenen Betrachtungsrichtungen aufgenommen. Als Vergleich ist die Serienleuchte herangezogen.

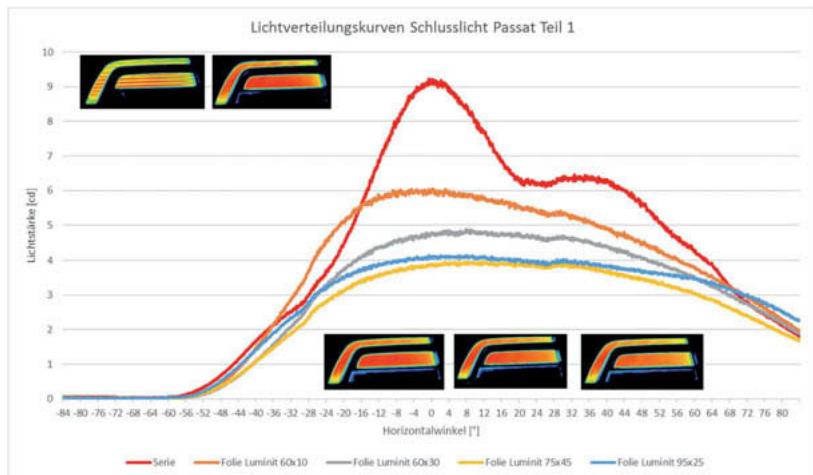


Bild 16: Lichtstärkeverläufe und Leuchtdichteaufnahmen mit Diffusorfolien im Vergleich zur Serienleuchte

Während die Serienleuchte einen Intensitätsverlauf mit einem deutlichen Peak in HV0° und einem weiteren Verlauf mit Wendepunkten und einem Nebenmaxima bei H45° zeigt verlaufen die Intensitätskurven mit den Diffusorfolien stetiger. Das Maximum liegt im zentralen Bereich der Lichtverteilung, das Intensitätsmaximum ist entsprechend der Streuwerte der Folien unterschiedlich.

4.2. Optimierte Modifizierung und Untersuchung

Für die weitergehende optimierte Untersuchung ist die Zusatzlichtscheibe neu erstellt. Hierfür sind, basierend auf den Ergebnissen der Voruntersuchung, Streufolien ausgesucht und flächig auf das Urstück der optikfreien Zusatzlichtscheibe geklebt. Dies erfolgte in zwei Varianten, einerseits mit der Folie auf der Innenseite und andererseits mit der Folie auf der Außenseite der Zusatzlichtscheibe.

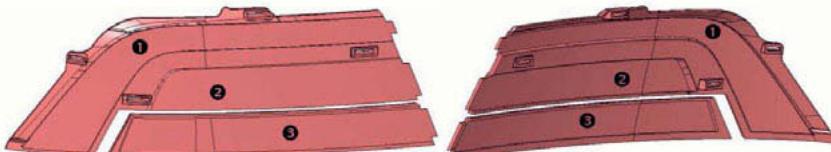


Bild 17: Konfigurationen der Zusatzlichtscheibe

In den Schlusslichtbereichen ① und ② kommt eine Diffusoroptik mit $95^\circ \times 25^\circ$ zum Einsatz und im Bremslichtbereich ③ eine Diffusoroptik mit $60^\circ \times 10^\circ$ Streuung.

Mit davon erstellten Silikonwerkzeugen sind Abformungen gemacht die nun die Diffusorstruktur direkt auf der Zusatzlichtscheibe tragen. Mit entsprechenden Leuchten sind dann erneute lichttechnische Messungen und Leuchtdichteaufnahmen gemacht und ausgewertet.

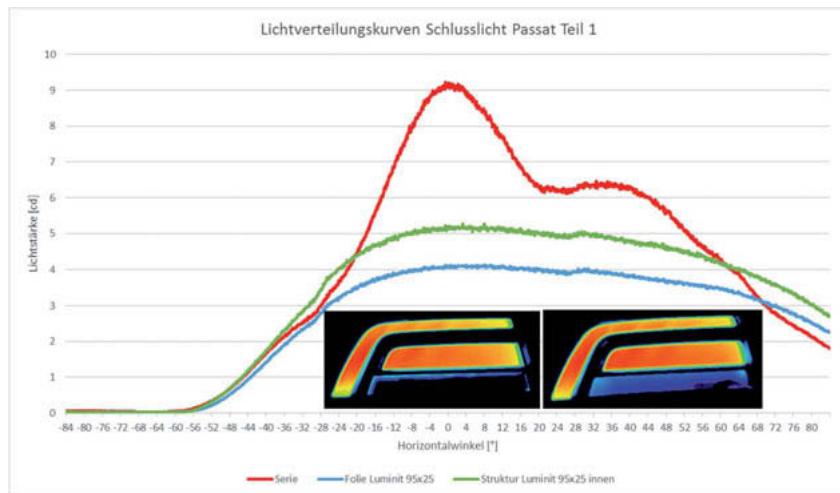


Bild 18: Lichtstärkeverläufe und Leuchtdichteaufnahmen mit Diffusorfolie bzw. integrierter Diffusoroptik im Vergleich zur Serienleuchte

Weitere Messgrößen zeigt die Tabelle.

Variante	Lichtstärke HV	Gesetzlich i.O.	Streuung horizontal
	[cd]		Halbwertsbreite [°]
Serienleuchte	9,14	Ja	75
Diffusor	5,18	Ja	>117

Die modifizierte Serienleuchte mit einer Zusatzlichtscheibe, die innenseitig eine diffraktive Diffusorstruktur besitzt, zeigt bei ansonsten unveränderter Serienleuchte ein Schlusslicht mit sehr homogener Ausleuchtung, welches die gesetzlichen Anforderungen erfüllt.



Bild 19: Modifizierte Serienleuchte mit integrierter Diffusoroptik

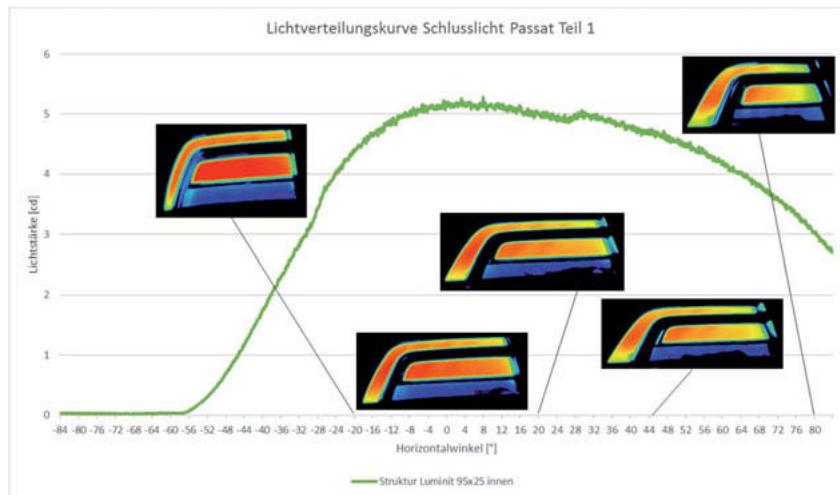


Bild 20: Lichtstärkeverlauf horizontal und Leuchtdichteaufnahmen der modifizierten Serienleuchte mit integrierter Diffusoroptik

Die gleiche diffraktive Diffusorstruktur auf der Aussenseite der Zusatzlichtscheibe zeigt eine abweichende, engere Lichtverteilung.

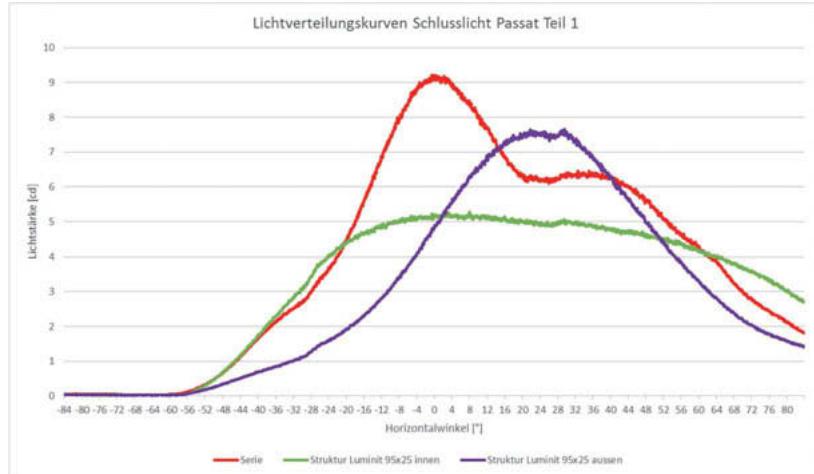


Bild 21: Lichtstärkeverlauf horizontal der Schlusslichtfunktionen Serie und mit integrierter Diffusoroptik auf Innen- bzw. Aussenseite der Zusatzlichtscheibe

Die Lage der diffraktiven Diffusoroptik auf der Zusatzlichtscheibe, entweder auf der Innenseite oder der Außenseite, muss vor der Auslegung definiert sein.

Das Bremslicht, ebenfalls mit einer innenseitigen Diffusoroptik ausgeführt und mit einer geringen Streuung durch Kissenoptiken auf dem Reflektor kommt bei einer Ausführung mit sechs PowerTOLED mit je 7lm auf die halben gesetzlichen Lichtstärkewerte bei gleichfalls breiter Horizontalstreuung.

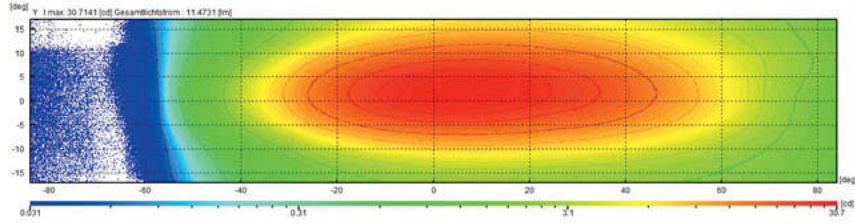


Bild 22: Lichtstärkeverteilung des Bremslichts mit integrierter Diffusoroptik

Die geringe LED-Anzahl von lediglich sechs Stück führt, selbst mit einer Vorstreuung im Reflektor, nicht zu einer komplett homogenen Ausleuchtung.

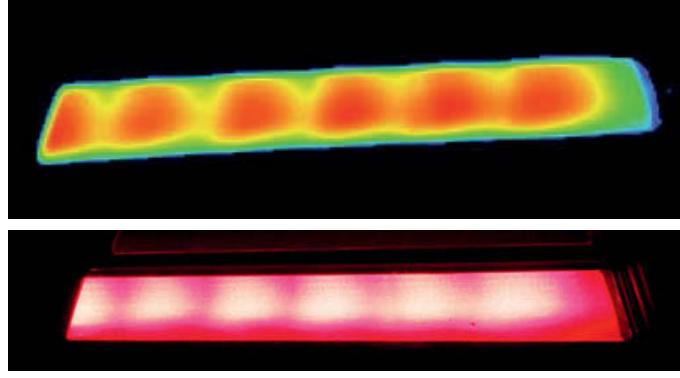


Bild 23: Leuchtdichteaufnahme (oben) und Foto (unten) des Bremslichts

Das Muster und die Messungen zeigen, dass mit erhöhter LED-Anzahl und angepasstem LED-Lichtstrom ein Bremslicht mit einer diffraktiven Diffusoroptik möglich ist. Ist dazu das Beispiel aus Kapitel 3 betrachtet, ist damit ein Bremslicht ECE erzeugt, wenn die elf LED mit jeweils 12lm betrieben werden, bei gleichfalls homogener Ausleuchtung.

5. Zusammenfassung

Die homogene Ausleuchtung von Signalfunktionen, insbesondere des Schlusslichts, ist eine Forderungen von vielen Fahrzeugherstellern. Die bisherige Verwendung von Erodier- oder Ätzstrukturen, Laserstrukturen oder dem häufig eingesetzten DF23-Material in Zusatzlichtscheiben stößt für neue Produkte zunehmend an Grenzen. Einerseits lässt sich das DF23-Material nicht weltweit einsetzen und andererseits ist seine Performance nicht geeignet zur Erfüllung höherer Lichtstärken von Bremslicht oder Fahrrichtungsanzeiger. Einfache Erodier- oder Ätzstrukturen stoßen schnell an Performancegrenzen zur Erreichung der gewünschten Homogenität, insbesondere wenn nur eine Strukturfläche, z.B. die Innenseite der Lichtscheibe, im optischen System für eine Strukturierung zur Verfügung steht.

Die neue Technologie von mikrostrukturierten Flächen bzw. diffraktiven Diffusoroptiken bietet jedoch eine Grundlage zur Performancesteigerung und Realisierung von homogenen Signalfunktionen in Heckleuchten (Schlusslicht, Bremslicht, Fahrrichtungsanzeiger) und Scheinwerfern (Tagfahrlicht, Fahrrichtungsanzeiger). Die dargestellte Untersuchung kann in folgenden Thesen zusammengefasst werden:

- (1) Die diffraktive Diffusoroptik kann als strukturierte Fläche in einen Werkzeugeinsatz für ein Spritzgusswerkzeug integriert und die Struktur direkt auf das Spritzteil abgeformt sein
- (2) Die Umsetzung der Diffusoroptik in einen Werkzeugeinsatz und der Spritzprozess sind bei HELLA erprobt für 2D- und 2,5D-Geometrie (3D-Geometrie folgt) und wird für zukünftige Serienanwendungen freigegeben
- (3) Ein erhöhter Aufwand gegenüber konventionell gefrästen Optikeinsätzen ist gegeben und muss auch zeitlich (Galvano-Erstellung) berücksichtigt werden; dies kann jedoch parallel zu einer Werkzeuganfertigung erfolgen
- (4) Auf Grund des Herstellprozesses sind dreidimensionale Flächen eine Herausforderung, die jeweils separat zu bewerten ist.
- (5) Mit einer diffraktiven Diffusoroptik ist eine gleichwertige, u.U. bessere, Homogenität im Vergleich mit DF23-Material zu erreichen, bei gleichzeitiger Performancesteigerung durch definierte Abstimmung der Streufunktion
- (6) Ähnliche Lichtstärken wie in DF23-Systemen sind mit reduzierter LED-Anzahl bzw. LED-Lichtstrom möglich. Eine Reduzierung der LED-Anzahl um 20% ... 30% ist realistisch, in abgestimmten Systemen auch bis zu 50%!
- (7) Die Performance diffraktiver Diffusoren ermöglicht auch die Auslegung und Realisierung von lichtstarken Signalfunktionen wie Bremslicht, Fahrtrichtungsanzeiger und Tagfahrlicht, die bisher mit DF23-Material nur mit sehr aufwendigen und teuren Systemen zu realisieren sind.
- (8) Diffraktive Diffusoroptiken sind im Kalterscheinungsbild nahezu undurchsichtig und bieten ein ähnliches, diffuses Erscheinungsbild wie das DF23-Material.

Innovationspotenzial in der automobilen Lichttechnik

Vergleich Exterior vs. Interior

Potential for innovations in automobile lighting technology

Comparison Exterior vs. Interior

Dipl.-Ing. **Detlef Decker**,

Senior Consultant, PGUB Management Consultants GmbH, Bickenbach

Abstract

Caused by the use of LED technology, lighting technology has established itself as one of the most innovative technologies in motor vehicles. The primary factor for this is the efficiency and flexibility in light generation, not imaginable a few decades ago.

In addition, the use of semiconductor technology for the calculation, simulation and electronical control for lighting systems generates a wide variety of product developments.

Considering the resulting innovation potential, developments for intelligent headlamp systems are forming the most complex field and usually make up the largest share of all contributions at lighting congresses.

Much less attention has been given in these forums the interior lighting. Within this context just this field of lighting technology provides an area that can be experienced jointly by the driver and front passenger, which significantly improves comfort and safe orientation in the vehicle at night. Caused by the high number of interior applications and functions, more LEDs are already being used in cars today than in exterior lighting. Interior concepts of current and future vehicles show that this trend will continue.

This paper will analyze the three classic automotive lighting areas "headlamps, signal lamps and interior lighting" according to the currently discussed topics of innovation. In addition shaping thoughts relating to gaps in the portfolio will be given also. A focus of this contribution is on interior lighting systems. The conclusion offers a look at the potential for further developments.

1. Einleitung

Mit dem Einsatz der LED-Technologie hat sich die Lichttechnik als eine der innovativsten Technologien im Kfz etabliert. Primärer Faktor ist dabei zunächst die vor wenigen Jahrzehnten noch nicht vorstellbare Effizienz und Flexibilität bei der Lichterzeugung.

Zusätzlich ermöglicht die Nutzung der Halbleitertechnologie für Berechnung, Simulation und Ansteuerung von Lichtsystemen heute vielfältigste Produktentwicklungen.

Bei der Betrachtung des hieraus resultierenden Innovationspotenzials stellen die Entwicklungen für intelligentere Scheinwerfersysteme das komplexeste Feld dar und bilden auf Fachtagungen meist den größten Anteil aller Beiträge.

Wesentlich weniger Beachtung findet bisher in diesen Foren bisher die Innenraumbeleuchtung. Dabei bildet dieses Feld der automobilen Lichttechnik einen für Fahrer und Beifahrer gemeinsam erlebbaren Bereich, der den Komfort und eine sichere Orientierung im Fahrzeug bei Nacht deutlich verbessert. Durch die Fülle von Applikationen und Funktionen werden hier heute schon im PKW mehr LEDs eingesetzt als in der Außenbeleuchtung.

Die Innenraumkonzepte aktueller und zukünftiger Fahrzeuge zeigen, dass dieser Trend weiter anhalten wird.

In diesem Beitrag werden die drei klassischen Automobilbeleuchtungsbereiche „Scheinwerfer, Signalleuchten und Innenraumbeleuchtung“ bezüglich der aktuellen diskutierten Innovationsthemen analysiert. Neben der Betrachtung aktueller Entwicklungs- und Untersuchungsschwerpunkte sollen hierbei auch Denkanstöße zu Lücken im Portfolio gegeben werden.

Der Schwerpunkt dieser Ausarbeitung liegt bei den Systemen zur Innenraumbeleuchtung. Die Vielzahl der jüngsten Innovationen werden in punkto Funktionen, Qualität und Flexibilität vorgestellt. Den Abschluss bietet eine Betrachtung des Potenzials für Weiterentwicklungen.

2. Innovationsfeld Scheinwerfersysteme

Zusätzlich zu der Einführung der LED-Technologie bildet die Entwicklung von intelligenten Systemen das zweite große Innovationsfeld für Scheinwerfer.

Die Grundidee, mit schaltbaren optischen Systemen alle die Segmente im für den Fahrer sichtbaren Verkehrsraum zu beleuchten in denen keine Verkehrsteilnehmer geblendet werden, stammt schon aus dem Jahr 2001 [1]. Heute kann die Bildverarbeitung der Fahrerassistenzsysteme alle erforderlichen Informationen hierfür liefern. Seit Ende 2013 sind Adaptive High Beam (AHB) Systeme – zumeist in der Oberklasse - erfolgreich eingeführt worden. Die z.Z. im Markt befindlichen Systeme verwenden zur Erzeugung der segmentierten Lichtverteilung bis zu 84 separate LED. Versionen mit deutlich mehr Segmenten/LED sind in der Markteinführung.

Die aktuelle Diskussion befasst sich zumeist mit der Erhöhung der Auflösung der AHB-Systeme. Bild 1 zeigt die möglichen Technologien mit der erreichbaren Zahl der Pixel sowie des Wirkungsgrades.

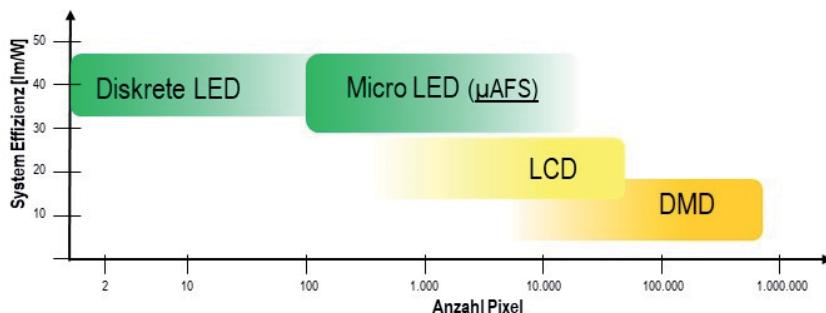


Bild 1: Technologien für AHB-Systeme – Systemeffizienz vs. Pixel

Werte zur Systemeffizienz nach [2]

Bei LCD- und DMD-Systemen mit der Möglichkeit zur Adressierung von mehreren tausend Pixeln fällt die Systemeffizienz ungünstiger aus. Neben den Verlusten durch zusätzliche optische Elemente muss Prinzip bedingt permanent die vollständige Lichtleistung vorgehalten werden. Noch wichtiger ist, dass Adressierung der hohen Pixelanzahl im dynamischen Fahrbetrieb den Aufwand für die Ansteuerung deutlich erhöht. Der erhebliche Mehraufwand in der Elektronikperipherie limitiert die Einführung solcher Systeme auf absehbare Zeit für das obere Marktsegment.

Die Verbesserung von Scheinwerfersystemen für die Sicherheit bei Nacht ist eine wichtige Aufgabe. Das Risiko, in einen nächtlichen Verkehrsunfall verwickelt zu werden ist annähernd dreimal so hoch wie am Tage [3]. Ebenso ist durch mehrere Studien belegt, dass AHB-Systeme die Sicherheit bei Nachtfahrten verbessern da die Sichtweite um durchschnittlich 30 m erhöht wird [4].

Die Entwicklung von Technologien, die eine Markteinführung in allen Fahrzeugsegmenten ermöglichen stellt deshalb aktuell das größte offene Innovationspotenzial für Scheinwerfer dar. Ansatzpunkte zur Umsetzung hierfür sind:

- Eine höhere Integration aller notwendigen Komponenten im Scheinwerfer z.B. in der Hybridtechnologie (vgl. erste Ergebnisse im BMBF Verbund-Projekt μAFS)
- Eine Anpassung an die sicherheitstechnisch tatsächlich benötigte Anzahl geschalteter Pixel (im Markt existieren erfolgreiche Lösungen ab 2x8 Segmenten)
- Vereinfachung des Gesamtsystems wie z.B. Überprüfung der Möglichkeiten zur direkten Integration des Sensors im Scheinwerfer

3. Innovationsfeld Signalbeleuchtung

Im Vergleich zu Frontbeleuchtung sind adaptive Funktionalitäten in der Signalbeleuchtung deutlich weniger entwickelt und verbreitet. Die Option die Lichtstärke der Heckleuchten an die Umgebungshelligkeit anzupassen wird, obwohl sie technologisch relativ einfach umsetzbar ist, nur bei wenigen Fahrzeugen eingesetzt.

Häufiger wird die Anzeige der Notremserkennung (ab einer Verzögerung von über 6m/s²) ins Signalbild integriert. Mögliche und im Markt genutzte Warnsignalbilder sind:

- Blinken der Bremslichter (typisch ~ 5-mal pro Sekunde)
- Zuschalten einer zweiten Bremslichtfläche
- Einschalten der Warnblinkautomatik

Bis heute nicht umgesetzt sind leider Konzepte zur Anpassung der Lichtstärke der Signalleuchten an die Sichtweite. Schon in den 1990er Jahren wurden Entwicklungen vorgestellt, bei denen die durch einen Sensor in der Heckleuchte die Sichtweite bei Nebel oder bei Regen (Gischt vor den Heckleuchten) hinter dem Fahrzeug gemessen und die Lichtstärke automatisch nachgeregelt wird. Da heute Sensoraufbauten deutlich günstiger möglich sind, könnte die Umsetzbarkeit in die Serie erneut überlegt werden.

Ein deutliches Innovationspotenzial zeigt das seitliche Signal- und Erscheinungsbild von PKW. Im amerikanischen Zulassungsbereich (FMVSS 108) sind seit 1969 für PKW und Nutzfahrzeuge seitliche Markierungsleuchten und Rückstrahler vorgeschrieben. Sogar die positiven Auswirkungen auf das Unfallgeschehen konnten dokumentiert werden [5].

Der ECE Zulassungsbereich schreibt für Fahrzeuge über 6 m ebenfalls vergleichbare lichttechnische Systeme vor. Bei PKW gibt es aber keine Pflicht, die Leuchtsysteme sind lediglich zulässig. Dabei sind [6]:

- 21,6% aller Nachtunfälle Kollisionen an Kreuzungen
- Kreuzungsunfälle in Städten die Nummer 2 bei schweren Unfällen bei Nacht.

Auch in Hinblick auf das zukünftige autonome Fahren sollte die Ausstattungspflicht für den ECE-Bereich diskutiert werden. Automatisierte Systeme können definierte Lichtsignale eindeutig erkennen.

Seitliche Signalfunktionen bieten darüber hin auch großes Potenzial für das Erscheinungsbild des Fahrzeugs. Im Front- und Heckbereich werden Lichtsysteme ja schon als zentrale Styling-Elemente verwendet. Sowohl die lichttechnischen Anforderungen mit zentralen Lichtstärken von 0,6 - 25 cd als auch die Positionierungsmöglichkeiten (Bild 2) eröffnen einen großen Spielraum für Varianten beim Aufbau der Signalfunktionen.

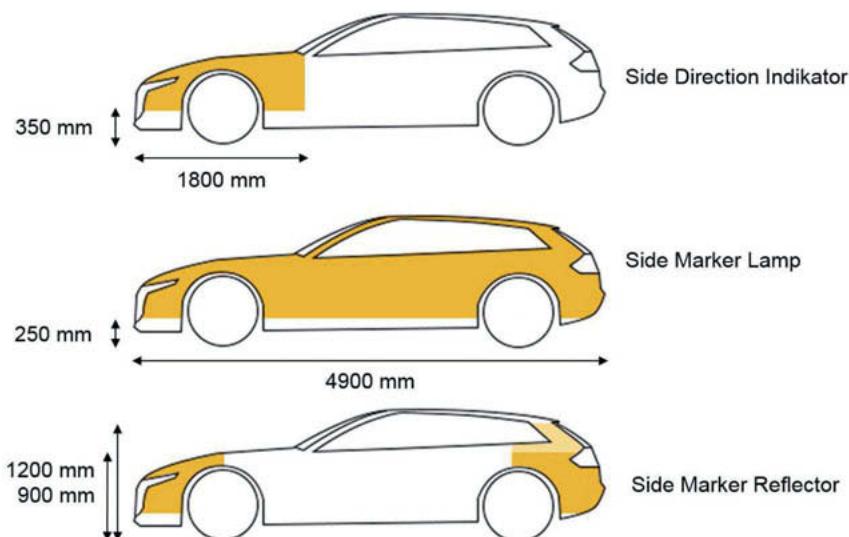


Bild 2: Mögliche Anbaupositionen für seitliche Signalfunktionen im ECE Zulassungsbereich.

Quelle: [7]

4. Innovationsfeld Innenlicht-Systeme

In keinem anderen Fahrzeugbereich ist den beiden letzten Jahrzehnten die Anzahl von lichttechnischen Applikationen so stark angestiegen wie im PKW-Innenraum. Bereits heute werden innerhalb des Fahrzeuges mehr LED verwendet als im Exterieur. Diese Steigerung in der Anzahl der Applikationen wurde dabei aber auch von einem deutlichen qualitativen Wachstum begleitet.

Bild 3 zeigt die wichtigsten Stufen der letzten Jahrzehnte.

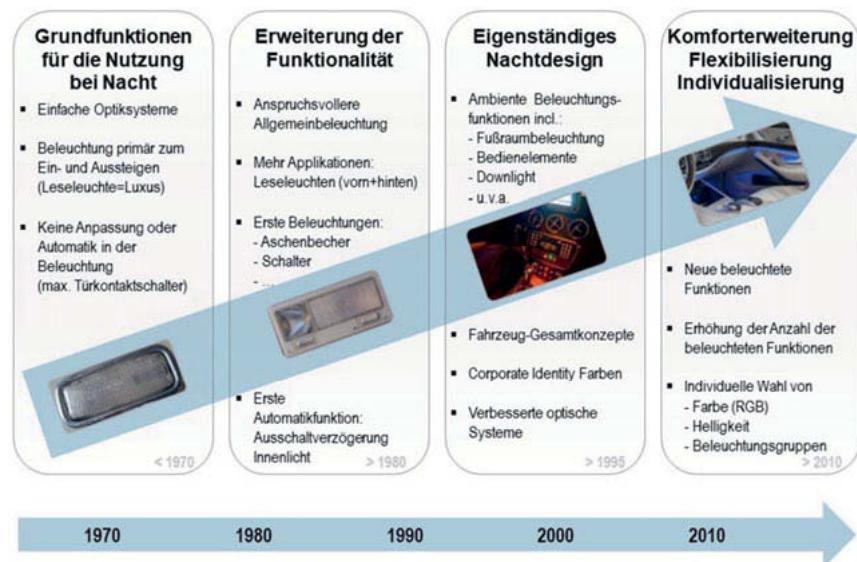


Bild 3: Entwicklungsstufen der Automobilen Innenbeleuchtung

Moderne Innenlichtsysteme liefern heute bei allen unterschiedlichen Nutzungssituationen des Fahrzeugs eine ausgewogene Beleuchtung und haben einen hohen lichttechnischen Standard. Die Homogenität der beleuchteten Flächen hat aktuell ein vergleichbares Niveau wie bei Signalfunktionen. Dünne Lichtleiter erlauben die Beleuchtung in schwer zugänglichen Bereichen und bilden Konturen oder Flächen für die ambiente Beleuchtung.

Der Blick auf aktuelle und zukünftige Fahrzeugkonzepte zeigt, dass der Trend zur weiteren Aufwertung der Innenbeleuchtung anhält und dass auch zunehmend die unteren Fahrzeugsegmente einbezogen werden.

War vor wenigen Fahrzeuggenerationen noch der Einsatz der Innenbeleuchtung auf das Armaturenbrett, die Dachverkleidung und evtl. einige Ablagefächer limitiert, so werden heute fast alle Interior-Komponenten genutzt. Neue Konzepte setzen gezielt auch Verkleidungen, Entertainment-Komponenten, Bedienfelder, Schiebdach, Sitze oder Stoffe für den Aufbau stimmiger Innenlichtszenarien ein.

Gefördert wird diese Entwicklung durch weiter sinkenden Kosten für die LED-Technologie sowie auch dadurch, dass es nur rudimentäre Zulassungsbeschränkungen für lichttechnische Systeme im Innenraum gibt [8].

Entsprechend liegt hier umso mehr die Verantwortung des Fahrzeugherstellers und der Systemlieferanten für die sorgsame Auslegung des Nachtdesigns im Fahrzeuginnenraum:

- Vermeidung von Spiegelungen in Front- und Seitenscheiben. Absicherung durch Simulationen und Nutzung von VR-Systemen in der Entwicklungsphase
- Physiologisch angepasste Leuchtdichten und leuchtende Flächen
- Keine dynamischen Effekte während der Fahrt. Beachtung der spezifischen Empfindlichkeit des peripheren Blickfeldes

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Halbleitertechnik hat mit den gewaltigen Fortschritten in der LED-Technologie und der Weiterentwicklung der Berechnungs- und Simulations-Werkzeuge die Fahrzeugbeleuchtung zu einer der innovativsten Fahrzeugtechnologien gemacht. Der hohe Entwicklungsstand führt in den verschiedenen Bereichen der Automobilbeleuchtung zu einer differenzierten Bewertung für offene Entwicklungspotenziale.

Bei der Scheinwerfertechnologie besteht ein großer Bedarf den mit Adaptive High Beam Systemen erzielbaren Sicherheitsgewinn durch System- und Kostenoptimierungen allen Fahrzeugsegmenten zur Verfügung zu stellen.

In der Signalbeleuchtung ist der Einsatz adaptiver Systeme bisher nur marginal umgesetzt. Neben diesem Potenzial bietet das seitliche Signalerscheinungsbild von PKW ein großes Entwicklungsfeld für Sicherheit und Styling.

Die größten Steigerungsraten für den Einsatz von lichttechnischen Applikationen finden sich in Innenraum. Die hier in den letzten Jahren entstandene Kreativität wird nur ökonomisch, stilistisch und physiologisch begrenzt.

- [1] Dr. Martin Enders (2001) Pixel Light, Proceedings of PAL 2001 Symposium, TU Darmstadt, pp 234-239
- [2] Dr. Claus Allgeier (2018) Digital and efficient: the future of front lighting, 16th DVN workshop January 30th-31st, 2018
- [3] Dr. Christian Jebas et. al. (2008) Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen, Wissenschaftliche Informationen der Bundesanstalt für Straßenwesen
- [4] LSS & UAS Gießen (2015) Light Sight Safety Project 2015: Benefit of ADB "Prove Benefit of ADB Systems under Real Life conditions"
- [5] Dr. Charles J. Kahane (1983) An Evaluation of Side Marker Lamps For Cars, Trucks, and Buses, NHTSA Report Number DOT HS 806 430 (page 1-4)
- [6] Dr. Mark Gonter (2012) Sicherheitsgewinn durch aktive Lichtfunktionen Möglichkeiten und Grenzen (S. 10-12), Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik – VDI
- [7] Detlef Decker (2015) The lateral signal image of vehicles - an open Potential for Safety and Styling, Proceedings of ISAL 2015 Symposium, TU Darmstadt, pp 616-619
- [8] § 49a StVZO, Erläuterung 9