

**Anforderungen
an die dynamische
Leuchtweitenregelung
zur Vermeidung
der Blendung
entgegenkommender
Verkehrsteilnehmer**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 129

bast

Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer

von

Kyriakos Kosmas
Jonas Kobbert
Tran Quoc Khanh

TU Darmstadt
Fachgebiet Lichttechnik

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 129

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.0611/2014:
Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregulierung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer

Fachbetreuung:
Maxim Bierbach, Sandra Jacobi,
Reinhard Tews, Andreas Walkling, Marek Zöller

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-95606-469-2

Bergisch Gladbach, Juni 2019

Kurzfassung – Abstract

Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer

Schon kleine Änderungen in der Fahrzeugneigung können, bedingt z.B. durch Beladung, den Lichtkegel des Scheinwerfers anheben und dadurch Blendung verursachen. Die UN-Regelung Nr. 48 schreibt eine automatische Leuchtweitenregelung (LWR) vor, die den entstandenen Nickwinkel für Scheinwerfer automatisch ausgleicht, falls eine Lichtquelle mit einem Lichtstrom über 2000 lm verwendet wird. Die neueste Entwicklung ist die dynamische LWR, bei der dynamische Neigungsänderungen, z.B. durch Beschleunigungsvorgänge, kompensiert werden. Allerdings gibt es neben dem Lichtstrom-Grenzwert für die automatische LWR keine weiteren Anforderungen an die dynamische LWR.

Um Vorschläge für Anforderungen an die dynamische LWR zu erarbeiten, wurden sechs repräsentative Fahrzeuge mit Halogen-, Gasentladungs- und LED-Scheinwerfern untersucht. Diese Fahrzeuge weisen unterschiedliche Federeigenschaften aus und wurden sowohl unbeladen, als auch mit einer Zuladung von 250 kg getestet. Zusätzlich wurde, falls vorhanden, die dynamische LWR deaktiviert und mit aktivierter LWR verglichen. Um die unterschiedlichen Scheinwerfer, Leuchtweitenregelungen und Beladungszustände analysieren und vergleichen zu können, wurden zusätzliche Fahrzeuge verwendet, um Gegenverkehr zu simulieren. Diese Fahrzeuge waren mit einem Photometer ausgestattet und mit Probanden besetzt, deren Aufgabe darin bestand, die psychologische und physiologische Blendung zu bewerten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Fahrzeugneigung durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst wird und Blendung nur durch eine verpflichtende Anwendung der dynamischen LWR reduziert werden kann.

Im zweiten Teil dieser Untersuchung wurden Kfz-Werkstätten daraufhin überprüft, inwieweit diese die Scheinwerfer in Bezug auf die Anforderungen der UN-Regelung korrekt einstellen. Aus diesem Grund wurden Halogen- und Gasentladungs-Scheinwerfer von zwei Fahrzeugen definiert verstellt, um sie anschließend von Werkstät-

ten justieren zu lassen. Die Analyse der Daten zeigen, dass die Scheinwerfer im Mittel um -1,25 % zu tief ausgerichtet werden.

Requirements for dynamic headlamp levelling devices to prevent glare for oncoming traffic

Even small changes in the vehicle inclination, for example due to added load, can lead to changes in the light beam and result in higher glare. The UN-Regulation No. 48 requires a levelling system that has to work automatically for headlamps with a light source emitting a luminous flux over 2000 lm. The latest development in levelling is dynamic levelling, which is able to compensate dynamic vehicle inclination, for example during acceleration. Besides the 2000 lm requirement for automatic levelling, there is no further requirement for the dynamic levelling.

To propose requirements for dynamic headlamp levelling devices, six representative vehicles with tungsten halogen, high intensity discharge (HID) and light emitting diode (LED) headlamps were examined. These vehicles had different suspension stiffness and were tested empty and with an added load of 250 kg. Furthermore, dynamic levelling was deactivated where available, and compared to the activated system. To assess and compare the different headlamps, headlamp levelling devices and load conditions, additional vehicles were placed on the track to simulate oncoming traffic. These vehicles were equipped with photometers and subjects to rate discomfort and disability glare.

The results show that vehicle inclination is being influenced by numerous of parameters and only the mandatory use of a dynamic headlamp levelling device can potentially prevent glare.

In the second part of the study, the ability of repair shops in aiming headlamps regarding the UN-Regulation requirements was examined. For this reason, the headlamps of two vehicles with tungsten halogen and HID headlamps were misaligned and brought to selected repair shops in order to realign them correctly. After analyzing the data, it was found that headlamps were aimed too low with a mean vertical value of -1.25 %.

Summary

Requirements for dynamic headlamp levelling devices to prevent glare for oncoming traffic

1 Introduction

Even small changes in the vehicle inclination, for example due to added load, can lead to changes in the light beam and result in higher glare. The UNECE Regulation 48 requires a levelling system that has to work automatically for headlamps with a light source emitting a luminous flux over 2000 lm. The latest development in levelling is dynamic levelling, which is able to compensate dynamic vehicle inclination, for example during acceleration. Besides the 2000 lm requirement for automatic levelling, there is no further requirement for the dynamic levelling.

In the first part of the study, it is examined if vehicle loading and dynamics for example caused by braking and acceleration, affect other road users in terms of glare. Additionally, the question is answered, if the luminous flux, the characteristic of the chassis suspension or none of them is decisive for the presence of a dynamic levelling within the scope of a statutory obligation. For this purpose, the systems available on the market are examined and representative vehicles are selected. For these vehicles, the angle of inclination is examined, taking into account the parameters load, chassis suspension and driving dynamics. The results are then used to develop requirements for the dynamic levelling and potential amendment of the existing regulation.

In the second part of the study, the headlamp adjustment process is examined. This is important because headlamps that are set too high may increase the visibility and thus the detection distance of, for example, obstacles on the roadside, but at the same time may lead to a higher glare on other road users. For this reason, legislators prescribe various conditions for correctly adjusting headlamps. The aim of this investigation is on the one hand to check the setting accuracy of garages and on the other hand to check the legally required setting conditions for their relevance and compliance. Finally, suggestions for improvement are derived from the results of the entire investigation.

2 Methods

In order to investigate the requirements for a dynamic levelling, five representative vehicles with tungsten halogen, gas discharge and LED headlamps were selected. For these vehicles, the dynamic levelling was deactivated to compare the results with activated levelling behavior. This made it possible to determine the functioning of the dynamic levelling. The five vehicles have different chassis suspension stiffness and were tested empty and with a load of 250 kg. A load of 250 kg corresponds to three persons including their luggage. Older investigations have shown that a load-dependent vehicle pitch movement is dependent on the installed suspension [1]. Accordingly, a vehicle with a soft chassis suspension tilts more strongly when loaded than a vehicle with a hard chassis suspension and can therefore potentially cause higher glare. This results in two examination parameters - the chassis suspension and the luminous flux. In order to link the two parameters, two partial investigations are carried out. In the first study, the tungsten halogen headlamps of a vehicle were replaced with gas discharge headlamps. By using one and the same vehicle, it can be assumed that the vehicle dynamics are identical, so that the influence of the light distribution or light source on glare can be investigated.

In the second examination, the influence of different suspension on glare is examined. For this purpose, two vehicles with the same headlights and therefore the same light distribution but different suspension setups were examined. In addition, a vehicle with tungsten halogen headlights and a very soft suspension was selected as the lower limit. The upper limit is a vehicle with LED headlights and a sporty hard suspension. In all five vehicles, the inclination angles are determined statically at a load of 250 kg and then divided into three groups – soft, medium and hard.

In order to compare the different settings and headlights, an additional vehicle was used to simulate an oncoming traffic situation. This vehicle was equipped with a photometer and was manned by test persons whose task was to evaluate discomfort glare with the DE BOER scale. In addition, the test persons were given a „glare

button“, which was to be pressed as soon as the test persons felt dazzled.

The second part of the study, the headlamp adjustment in garages was examined. For this purpose, the tungsten halogen and gas discharge headlamps of two production vehicles were misaligned in a defined way, both vertically and horizontally. Both vehicles were then taken to ten selected garages to check the adjustment of the headlamps and adjust them correctly if necessary. After the workshop visit, the headlamp settings were checked again. The headlamp adjustment was then controlled on a test area floor.

The UNECE defines certain conditions to be met for type approval in order to adjust headlamps correctly [2]. These requirements include a weight of 75 kg on the driver’s seat, a 90 % filled tank, tire pressure according to the manufacturer’s specifications and a level surface [2]. For this purpose, 15 vehicles from different classes were tested. The empty vehicle with the current tank filling was defined as the initial state in order to determine the influences of the measuring regulations. In order to be able to measure the changes, the front and rear distance from the body to a levelled laser line was measured and analyzed.

3 Results

In headlamp systems with activated dynamic levelling, in general no glare was detected. Vehicles with a hard suspension were an exception. These generate a large number of glare peaks on uneven surfaces, which are found to be dazzling test persons. Among the test vehicles, there is also a vehicle with tungsten halo-gen headlights whose light distribution is such, that it dazzles in both cases, empty and loaded. In general, it was found that load influences the vehicle’s dynamics. When accelerating, soft suspension generates high angles of inclination and thus causes glare. The angle of inclination is additionally increased if the vehicle is loaded. Hard suspension, on the other hand, cannot compensate uneven surfaces and leads to glare, due to the occurring illuminance peaks. This is also confirmed by the glare button data. The tested medium suspensions are generally capable to compensate uneven ground. When looking at the angle of inclination during acceleration, it can be seen that the cut-off line of all test vehicles inclines above the horizon. A fast response or latency time of the dynamic levelling could compensate the

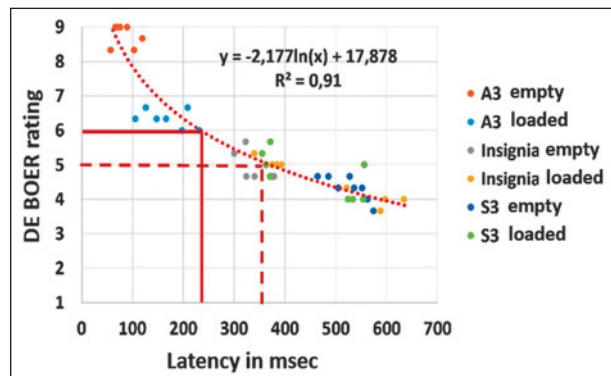


Fig. 1: Correlation between levelling latency and de Boer rating

angle of inclination. In order to determine the latency time of the dynamic levelling, one orientation sensor is mounted on the vehicle body and another on the lamp. After comparing the data, a constant off-set between the data of both sensors can be detected, with the headlamp inclination reacting to unevenness of the ground later than the vehicle inclination.

In the next step, the correlation between the latency time and the DE BOER rating was analyzed and is shown in Figure 1.

The correlation shown in Figure 1 shows that a dynamic levelling that reacts faster to vehicle movements leads to lower discomfort glare. This means that a latency time of 350 ms, a DE BOER rating of five is achieved, which represents a transition between dazzling and non-dazzling.

The results of the workshop test carried out to check the headlamp alignment have shown that, there are no significant differences between the alignment of tungsten halogen and gas discharge headlamps.

Figure 2 summarizes the workshop settings by showing the vertical and horizontal headlamp inclinations in a single figure. Here, a deviation of 0 cm at a distance of 10 m (0 %) from the central mark indicates the target value of the headlamp setting. Green circles represent the left headlamp and blue rectangles the right headlamp. The horizontal and vertical adjustment tolerances are shown by the red rectangle.

Looking at the figure, it is noticeable that not a single headlamp has been set above the horizon. This indicates a conservative aiming to avoid dazzling on-coming traffic. However, this reduces the driver’s visibility. With regard to the horizontal adjustment, the majority of the headlamps examined are outside the adjustment range. With values approaching a maximum of -6 %, greater attention should be paid

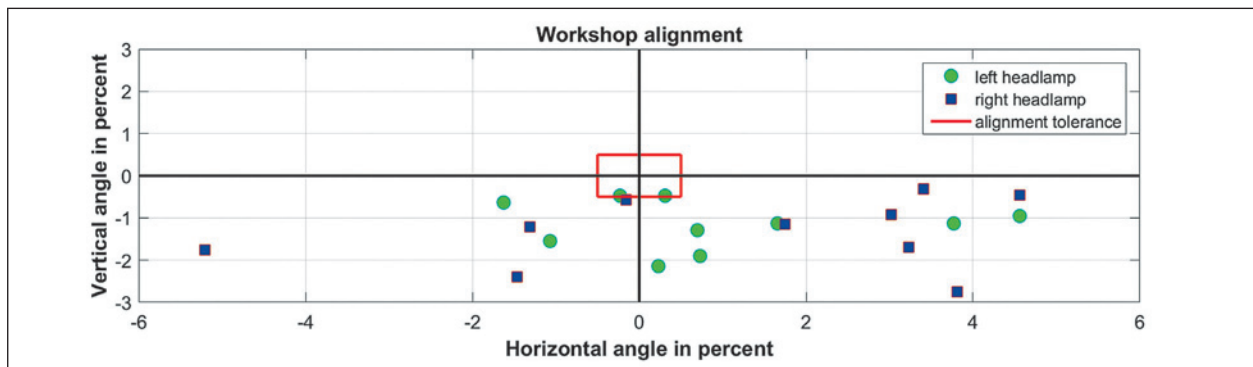


Fig. 2: Horizontal and vertical headlamp aiming

to horizontal adjustment. Headlamps set too far to the left potentially dazzle oncoming traffic more. In summary, three of the 20 head-lamps examined were adjusted within the tolerance applicable in Germany. This corresponds to 15 % of the headlamps.

After analyzing the influences of the four conditions on the adjustment accuracy, it was found that the condition „driver on the driver’s seat“ causes an average change in the vehicle inclination of about -0.1 %. The „tank full“ condition, shows a large and significant difference in the vehicle tilt and thus also in the headlamp adjustment. This can be as much as 0.75 %. In the case of the „tire pressure“ condition, only in the extreme case that both tires of an axle were completely without air, an inclination change of 1 % is measured. However, this is an extreme case in which the vehicle would no longer be roadworthy.

4 Conclusion

The present study has shown that a dynamic levelling in all vehicle classes seems useful in terms of glare avoidance or reduction. The coupling of dynamic level-ling with the luminous flux of more than 2000 lm cannot be supported on the basis of the available data. Furthermore, the results of the present study show that the following essential conditions are necessary in order to minimize glare from vehicle headlamps:

1. dynamic levelling for all headlamp systems
2. control range of the dynamic leveling linked to the vehicle inclination at maximum load
3. mean latency time of the overall system in the empty and loaded state below 350 ms for a DE BOER rating of 5 (just acceptable glare) or below 220 ms for a DE BOER rating of 6

The available results show that a complete and area-wide avoidance of glare can only be achieved if a dynamic levelling is used without exceptions. In addition, it was determined, that a change in the load condition has a direct effect both on the dynamics of the vehicle and on the control efficiency of the dynamic level-ling. In practice, the required latency times of the dynamic levelling should therefore be observed both in the empty and in the loaded condition.

The headlamp adjustment process is already regulated by the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure [3]. The obviously not always sufficient qualification of the workshop personnel leads in practice, to the fact that the given regulations are hardly applied. Essential prerequisites for the correct adjustment of headlamps are:

- 75 kg on the driver’s seat
- at least one 90 % filled tank
- a tire pressure corresponding to the manufacturer’s specifications
- level surface both for the aiming device and the vehicle
- parallel alignment of the aiming device to the vehicle

The present study shows that only the weight on the driver’s seat can be neglected for simplification without significantly impairing the quality of the head-lamp adjustment. All other conditions must be met in order to adjust headlamps within the legal tolerance.

5 Literature

- [1]. ZYDEK, “Klettwitz Levelling Test: Analysis of Photometric data and Com-prehension”, ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, 2013

- [2]. UNECE Regulation No. 48, “Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices”, 2013
- [3]. BMVI (2014): Verkehrsblatt – Amtsblatt des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur der Bundesrepublik Deutschland. Richtlinie für die Überprüfung der Einstellung der Scheinwerfer von Kraftfahrzeugen bei der Hauptuntersuchung nach § 29 StVZO (HU-Scheinwerfer-Prüfrichtlinie) (5) (LA20/7345.2/80-4), S. 174–183.

Inhalt

Abkürzungen	11	6	AP 4: Überprüfung der Scheinwerfereinstellprozesse unter Miteinbeziehung adaptiver Lichtsysteme und Tagfahrleuchten	34
1 Einleitung und Aufgabenstellung	13		6.1 Grundlagen.....	34
2 Grundlagen zur Blendung	13		6.2 Überprüfung der Einstellprozesse.....	36
2.1 Physiologische Blendung.....	14		6.3 Bedingungen zum Einstellen von Scheinwerfern.....	38
2.2 Psychologische Blendung.....	14		7 AP 5: Überprüfung der bestehenden Vorschriften und ggf. Erstellung eines Änderungsentwurfs zu den internationalen Bau- und Betriebsvorschriften	39
3 AP 1: Praxisuntersuchung zu am Markt befindlichen LWR-Systemen	15		7.1 Vorschriften und Normen.....	39
3.1 Die Leuchtweitenregelung.....	15		7.2 Vergleich mit den aus AP 3 und AP 4 gewonnenen Aspekten.....	40
3.2 Literatur.....	16		8 Fazit	41
4 AP 2: Untersuchung der Neigungswinkel repräsentativer Fahrzeuge unter Berücksichtigung der Parameter Beladung, Fahrwerk und Fahrzeugdynamik	17		Literatur	42
4.1 Messtechnik zur Ermittlung der Fahrzeugdynamik und der Blendung.....	18		Bilder	44
4.1.1 Entwickeltes System zur Bestimmung der Fahrzeugneigung.....	18		Tabellen	45
4.1.2 Eingesetzte Messtechnik zur Bestimmung der Blendung.....	19		Anhang	46
4.2 Auswahl repräsentativer Testfahrzeuge.....	20		A.1 Statistische Tests.....	46
4.3 Versuchsaufbau und -ablauf.....	21		A.2 Statistik: Standardisierung (z-Transformation).....	46
4.4 Probanden.....	23		A.3 Vergleich der DE BOER-Bewertungen der Probanden nach Sitzposition.....	47
4.5 Ergebnisse.....	23		A.4 Vergleich der DE BOER-Bewertungen der Messfahrzeuge ID1, ID2 und ID3.....	47
4.5.1 Auswertung der Daten bei konstanter Fahrt.....	25		A.5 Vergleich der DE BOER-Bewertungen der Probanden nach Alter.....	47
4.5.2 Auswertung der Daten beim Beschleunigen.....	29		A.6 Reproduzierbarkeit der photometrischen Messungen.....	47
4.5.3 Eye-Tracking und Kontrastbox.....	30		A.7 Vergleich der Werkstatteinstellung zwischen Halogen- und Gasentladungsscheinwerfern.....	48
4.6 Theoretische Betrachtung von Kuppen und Wannern.....	32			
4.6.1 Zugrundeliegende statistische Daten.....	32			
4.6.2 Funktionsweise des benutzten Analyseprogramms.....	32			
5 AP 3: Erarbeitung von Anforderungen an eine dLWR und der damit verbundenen Lichtsysteme im Hinblick auf die Verkehrssicherheit	33			

Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
AFS	Adaptive Frontbeleuchtungssysteme
aLWR	automatische Leuchtweitenregelung
BCD	borderline between comfort and discomfort
dLWR	dynamische Leuchtweitenregelung
HDG	Hell-Dunkel-Grenze
HU	Hauptuntersuchung
Kfz	Kraftfahrzeug
LED	Leuchtdiode
LWR	Leuchtweitenregelung
SEP	Scheinwerfer-Einstellprüfgerät
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TP	Technische Prüfstelle
UN	hier: United Nation Economic Commission for Europe

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die wesentlichen Ziele bei der Entwicklung von automobilen Scheinwerfern bestehen darin, bei einer optimalen Ausleuchtung, die Sichtweite des Fahrers zu erhöhen und gleichzeitig andere Verkehrsteilnehmer nicht zu blenden. Ein entscheidender Beitrag zur Reduzierung von Nachtunfällen wird durch die Entwicklung und Einführung neuer Lichtquellen geleistet. Hierzu zählen beispielsweise Gasentladungslichtquellen und Leuchtdiodenlichtquellen (LED). Durch die Verwendung von Lichtquellen mit einem höheren Lichtstrom steigt das Blendungsrisiko für andere Verkehrsteilnehmer, vor allem bei nicht vorschriftsmäßig eingestellten Scheinwerfern.

Zusätzlich kann die Dynamik eines Kraftfahrzeugs (Kfz) das Blendungsrisiko erhöhen. Dies kann beispielsweise durch Beladung, Straßenunebenheiten, starke Beschleunigung und unterschiedliche Fahrwerksysteme hervorgerufen werden. Der Grund hierfür ist, dass eine Änderung des Fahrzeugnickwinkels auch eine Winkeländerung des Lichtkegels verursacht und dadurch zu einer potenziellen Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen kann. Die Wirtschaftskommission für Europa (Economic Commission for Europe, UN) schreibt in der UN-Regelung Nr. 48 eine Leuchtweitenregelung (LWR) vor. Diese soll die beladungsabhängige Änderung des Nickwinkels entweder manuell oder automatisch ausgleichen. Als Grenzwert für die verpflichtende Verwendung der automatischen LWR (aLWR) gilt das Überschreiten eines Soll-Lichtstroms von 2.000 lm der eingesetzten Lichtquelle bzw. des eingesetzten Moduls. Untersuchungen am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt haben gezeigt, dass beim Überfahren von Bodenwellen, Fahrzeugnickbewegungen entstehen können, die wiederum Impulse im Beleuchtungsstärkeverlauf verursachen (KOSMAS et al. 2015). Diese Impulse in der Beleuchtungsstärke können Werte von mehreren Lux erreichen und zur Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen.

Die neueste Entwicklung im Bereich der LWR ist die dynamische LWR (dLWR). Hierbei werden dynamische Änderungen des Nickwinkels, die beispielsweise beim Beschleunigen oder durch Bodenunebenheiten auftreten, kompensiert. Allerdings gibt es neben dem oben erwähnten Grenzwert des

Lichtstromes keine weiteren Anforderungen für die dLWR.

Ziel des ersten Teils der hier vorgestellten Untersuchung ist die Überprüfung der Fragestellung, inwieweit die Beladung und die Dynamik eines Fahrzeuges andere Verkehrsteilnehmer hinsichtlich der Blendung beeinflusst. Zusätzlich wird die Frage betrachtet, ob der Parameter Lichtstrom, die Eigenschaften des Fahrwerks oder keines der beiden Parameter im Rahmen einer gesetzlichen Pflicht für das Vorhandensein einer dLWR als Kriterium ausschlaggebend sein sollte. Zu diesem Zweck werden die auf dem Markt befindlichen LWR-Systeme untersucht. Im Anschluss werden repräsentative Fahrzeuge für die durchzuführenden Untersuchungen ausgewählt. Anhand dieser Fahrzeuge wird der Einfluss auf den Nickwinkel unter Berücksichtigung der Parameter Beladung, Fahrwerk und Fahrdynamik untersucht. Aus den Ergebnissen werden anschließend Anforderungen an die dLWR erarbeitet und potenzielle Erweiterungen der bestehenden Regelung vorgeschlagen.

Im zweiten Teil der vorliegenden Untersuchung wird der Scheinwerfereinstellprozess untersucht. Dies ist wichtig, da zu hoch eingestellte Scheinwerfer zwar die Sichtweite und somit auch die Detektionsentfernung von z. B. Hindernissen am Straßenrand erhöhen, gleichzeitig aber zu einer höheren Blendungsbelastung anderer Verkehrsteilnehmer führen kann. Aus diesem Grund schreibt der Verordnungsgeber verschiedene Bedingungen vor, um Scheinwerfer korrekt einzustellen. Ziel dieser Untersuchung ist es einerseits, die Einstellgenauigkeit von Kfz-Werkstätten und andererseits die gesetzlich geforderten Einstellbedingungen auf ihre Relevanz und Einhaltung zu überprüfen. Aus den Ergebnissen des zweiten Untersuchungsteils werden abschließend Verbesserungsvorschläge für die Praxis und Regelungsvorschläge für die Einstellung abgeleitet.

2 Grundlagen zur Blendung

Blendung wird als „unangenehmer Sehzustand durch ungünstige Leuchtdichteverteilungen oder hohe Kontraste“ definiert (DIN EN 12665). Schon im Jahre 1910 beschreibt PARSONS, dass Blendung sowohl eine physiologische als auch psychologische Wirkung hat (PARSONS 1910). Um ein besseres Verständnis für die Untersuchung und de-

ren Ergebnisse zu ermöglichen, wird im Folgenden auf die beiden Arten der Blendung näher eingegangen.

2.1 Physiologische Blendung

Die physiologische Blendung ist ein Sehzustand, in dem eine oder mehrere Lichtquellen im Gesichtsfeld zu einer messbaren Reduzierung der Sehleistung führen. Der Grund hierfür ist, dass durch die Lichtquellen Streulicht im Auge entsteht, welches das eigentliche Bild auf der Netzhaut überlagert und somit die Kontrastempfindlichkeit verringert (HOLLADAY 1926). HOLLADAY veröffentlichte im Jahre 1926 die ersten Ergebnisse, die sich mit der physiologischen Reduzierung der Sehleistung befassen und führte die äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s\ddot{a}q}$ ein. Sie ist nach (HOLLADAY 1926) wie folgt definiert:

$$L_{s\ddot{a}q} = k \cdot \frac{E_B}{\theta^n} \quad (2.1)$$

E_B ist dabei die am Auge gemessene Beleuchtungsstärke, θ der Blendwinkel und k ein Faktor für die Berücksichtigung des Alters (vgl. Kapitel 4.4). Um ein Objekt mit seiner Leuchtdichte wahrnehmen zu können, muss zwischen der Leuchtdichte des Umfeldes, der Umfeldleuchtdichte L_{Umfeld} , und der Leuchtdichte des Objektes, der Objektleuchtdichte L_{Objekt} , eine bestimmte Differenz $\Delta L'$ vorliegen. Falls die Leuchtdichte im Gesichtsfeld durch eine Blendlichtquelle erhöht wird, muss die Differenz $\Delta L'$ ebenfalls größer werden, um das Objekt weiterhin wahrnehmen zu können (KHANH UND SÖLLNER 2014). Dieser Zusammenhang lässt sich durch den Weberkontrast K_W nach 2.2 erklären.

$$K_W = \frac{L_{Objekt} - L_{Umfeld}}{L_{Umfeld}} \quad (2.2)$$

Beim Erscheinen einer Blendlichtquelle ändert sich der Weberkontrast, da sich die Schleierleuchtdichte sowohl über das Objekt als auch über das Umfeld legt bzw. hinzuaddiert.

$$K_{WB} = \frac{(L_{Objekt} + L_{s\ddot{a}q}) - (L_{Umfeld} + L_{s\ddot{a}q})}{L_{Umfeld} + L_{s\ddot{a}q}} \quad (2.3)$$

Nach Umformen der Gleichung ergibt sich:

$$K_{WB} = \frac{L_{Objekt} - L_{Umfeld}}{L_{Umfeld} + L_{s\ddot{a}q}} \quad (2.4)$$

Bei einem Vergleich der Formeln 2.2 und 2.4 fällt auf, dass die äquivalente Schleierleuchtdichte dazu führt, dass der Kontrast K_{WB} kleiner wird. Ein Objekt ist somit schlechter wahrzunehmen. Der Kontrast, bei dem ein Objekt mit einer Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von $p = 50\%$ gerade von seinem Umfeld zu unterscheiden ist, wird Schwellenkontrast $K_{W_{th}}$ genannt und ist nach 2.5 wie folgt definiert:

$$K_{W_{th}} = \frac{\Delta L'}{L_{Umfeld}} \quad (2.5)$$

Der Schwellenkontrast $K_{W_{th}}$ ist demzufolge die Schwellleuchtdichtedifferenz $\Delta L'$ geteilt durch die Umfeldleuchtdichte. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass, falls ein Objekt von seinem Umfeld gerade wahrgenommen werden kann, sich beim Erscheinen einer Blendlichtquelle der Kontrast verringert, wodurch das Objekt nicht mehr von seinem Hintergrund zu unterscheiden ist. Um das Objekt wieder wahrnehmen zu können, muss die Leuchtdichtedifferenz $\Delta L'$ zwischen Objekt zu Umfeld und damit auch der Kontrast vergrößert werden. Als Messgrößen für die physiologische Blendung kann der Schwellenkontrast verwendet werden (SCHMIDT-CLAUSEN UND BINDELS 1971).

2.2 Psychologische Blendung

Die psychologische Blendung bewirkt einen eingeschränkten Sehkomfort bei der geblendeten Person. Als eine Möglichkeit zur Erfassung der psychologischen Blendung wird in der Literatur die „borderline between comfort and discomfort“ (BCD) verwendet. Ein Nachteil dieser Methode besteht jedoch darin, dass die BCD genau und eindeutig definiert sein muss. Zudem muss der Proband den Blendreiz selbst einstellen können, da die Ergebnisse sonst ungenau erscheinen (DE BOER 1967).

Aufgrund dieser Nachteile wird in der Kfz-Lichttechnik meist die subjektive Bewertung auf einer Skala nach DE BOER erfasst (DE BOER und VAN HEEMSKERCK 1955; DE BOER 1967). Diese Skala besteht aus neun Stufen, von denen jede zweite beschrieben ist (DE BOER 1967). Bild 1 zeigt die Bewertungsskala nach DE BOER, wie sie in der vorliegenden Untersuchung zur Erfassung der psychologischen Blendung von Probanden verwendet wird. Zur besseren Übersichtlichkeit der Probanden wurden bei dieser Skala lediglich 3 Beschreibungen bei 9 Bewertungsstufen genutzt.

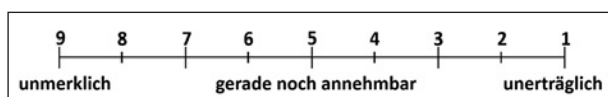


Bild 1: Verwendete Bewertungsskala nach DE BOER

Die DE BOER-Skala beschreibt demnach mit ihrer größten Zahl (9) den geringsten Blendeindruck und mit ihrer kleinsten Zahl (1) den intensivsten Blendeindruck. Die (5) repräsentiert dabei den Wert von „gerade noch annehmbar“ und stellt die Grenze zwischen geblendet und nicht geblendet dar. In der ursprünglichen Version der DE BOER-Skala werden zusätzlich die Zahlen (3) als „störend“ und (7) als „zufriedenstellend“ verbal beschrieben.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Arbeitspakete (AP) näher erläutert.

3 AP 1: Praxisuntersuchung zu am Markt befindlichen LWR-Systemen

Unterschiedliche Beladung, Straßenunebenheiten und Beschleunigungsvorgänge eines Kfz können u. a. zur Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen. Diese wird durch Fahrzeugnickbewegungen verursacht, die eine Änderung des vertikalen Winkels der Lichtverteilung zur Folge haben. Um dies zu vermeiden wird falls erforderlich eine Leuchtweitenregelung verwendet, die gemäß der UN-Regelung Nr. 48 automatisch arbeiten muss (UN-Regelung Nr. 48). Diese gleicht die Nickbewegungen des Kfz aus, indem die Höhe der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) und damit des gesamten Lichtkegels, in Abhängigkeit des Fahrzeugnickwinkels nachgeregelt wird. Es wird zwischen drei Varianten der LWR unterschieden, die im folgenden Kapitel näher erläutert werden. Zusätzlich ist es möglich, die Nickbewegungen durch eine Luftfederung auszugleichen. Diese Einstellung wurde allerdings in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.

3.1 Die Leuchtweitenregelung

Die manuelle LWR wird vom Fahrer betätigt, um Änderungen des Fahrzeugnickwinkels durch die Beladung auszugleichen. Hierbei hat der Fahrer die Möglichkeit, die Scheinwerferneigung bzw. die Lage der HDG mittels Einstellrad in Stufen oder stufenlos einzustellen, wobei der Fahrer nach Beladungszustand eine Einstellung vornehmen sollte (UN-Rege-

lung Nr. 48). Jede Stufe senkt demzufolge den Lichtkegel in Abhängigkeit der Beladung des Kfz. Hierbei bewegt üblicherweise ein Schrittmotor das komplette Lichtmodul, das sich im Scheinwerfer befindet. Der Regelbereich ist hierbei in der UN-Regelung Nr. 48 definiert und basiert auf der maximalen, statischen Beladung eines Fahrzeuges. Die manuelle LWR ist bei Fahrzeugen mit einer Erstzulassung ab dem 01.01.1990 vorgeschrieben (UN-Regelung Nr. 48).

Bei Kfz-Scheinwerfern mit einer Lichtquelle über 2.000 Lumen ist nach der UN-Regelung Nr. 48 ggf. eine aLWR erforderlich. Hierbei messen Sensoren den Abstand zwischen der Fahrzeugkarosserie und der Radaufhängung. Je nach Automobilhersteller werden zwischen einem und vier Sensoren verbaut, deren Daten in einem Steuergerät gesammelt und ausgewertet werden. Dadurch wird der Fahrzeugnickwinkel im Verhältnis zur Straße ermittelt. Mit dieser Information wird der Lichtkegel automatisch an den Fahrzeugnickwinkel angepasst. Um ungewollte Fehleinstellungen von zum Beispiel Bodenunebenheiten zu vermeiden, werden Algorithmen zur Datenglättung verwendet (WÖRDENWEBER 2007). Die aLWR reagiert durch die Algorithmen verzögert auf Neigungsänderungen und wird lediglich zum Ausgleich der Fahrzeugneigung bei Beladungen bzw. Beladungsänderungen wie z.B. das Leeren des Tanks verwendet.

Die dritte Variante der LWR ist die dynamische LWR. Zusätzlich zur Beladungsabhängigkeit der aLWR reagiert diese auf Änderungen der Fahrzeugdynamik. Hierzu zählen beispielsweise Beschleunigen und Abbremsen sowie Fahrbahnunebenheiten. Da eine Regelung der Leuchtweite im Fall der dLWR nicht manuell vom Fahrer durchgeführt wird, gelten die gesetzlichen Anforderungen der aLWR. Die HDG wird von der dLWR auf der Grundeinstellung gehalten. Die Berechnungen zur HDG-Regelung basieren auf der Analyse von Daten des Tachometers, der ABS-Steuereinheit und der Sensoren, welche die Änderungen der Fahrzeugneigung detektieren. Diese Fahrzeugdaten werden über eine verschlüsselte Datenleitung übertragen, auf die nicht universal zugegriffen werden kann. Zusätzlich sind Lage und Anzahl der Neigungssensoren am Fahrzeug nicht einheitlich. Die Geschwindigkeit der Regelung sowie die Latenzzeit des Systems sind nicht von der UN-Regelung bzw. im Rahmen der Typgenehmigungsvorschriften vorgeschrieben. Diese werden von jedem Automobilhersteller individuell festgelegt.

Aus den oben genannten Gründen konnte für die vorliegende Untersuchung nicht auf die Sensordaten des Fahrzeuges zurückgegriffen werden. Deshalb wurde ein eigenes System zur Messung der Fahrzeugdynamik entwickelt. Dieses basiert auf Erkenntnissen der Literatur.

3.2 Literatur

HUHN führte unter anderem im Rahmen seiner Dissertation eine Analyse der Fahrzeugdynamik durch. Dabei wurden die Veränderungen der Lichtverteilung im Bereich der HDG betrachtet. Hierfür untersuchte HUHN die Nickwinkel von acht Fahrzeugen von vier verschiedenen Herstellern. Diese Fahrzeuge wurden sowohl im realen Straßenverkehr als auch auf einem Testgelände beschleunigt und wieder abgebremst. Für die Ermittlung der Nickwinkel verwendete HUHN jeweils einen an Fahrzeugfront und -heck angebrachten Abstandssensor auf der Basis der Laser-Triangulation. Als maximaler Nickwinkel wurde auf dem Testgelände beim Beschleunigen ein Winkel von $\beta_{\max} = +1,49^\circ$ bzw. beim Bremsen von $\beta_{\min} = -1,81^\circ$ ermittelt. Im realen Straßenverkehr absolvierte jedes der acht Fahrzeuge eine Fahrstrecke von 175 km jeweils gleich verteilt auf Stadt, Landstraße und Autobahn. Hierbei ergaben sich ähnliche maximale Nickwinkel beim Beschleunigen, wie sie auf dem Testgelände ermittelt wurden. Beim Bremsen ergab sich ein minimaler Nickwinkel von $\beta_{\min} = -0,56^\circ$ in der Stadt und auf der Landstraße. Auf der Autobahn erhöht sich der Winkel auf $\beta_{\min} = -0,63^\circ$. Ebenfalls ermittelte HUHN den kumulierten Blendanteil je Stunde, bei dem sich der linke Teil der HDG über dem Horizont befindet. Dieser Wert schwankt sehr stark bei den verschiedenen Fahrzeugen und wird durch die „Getriebeübersetzung der unteren Gänge und einer insgesamt forcierten Fahrweise während der Messung“ begründet. „Besonders große Nickwinkel und damit auch die größten Blendanteile wurden bei Fahrzeugen mit großer Motorleistung, kleinem Radstand und weicher Fahrwerksabstimmung nachgewiesen, wobei der Einfluß der Fahrwerksabstimmung überwog.“ (HUHN 1999)

LEHNERT untersuchte den Effekt von Blendreizen auf die Sehkraft des Menschen. Dies ist wichtig, da die vertikale Fahrzeugdynamik, Blendimpulse z. B. bei einem entgegenkommenden Fahrzeug verursachen kann. Aus diesem Grund führte LEHNERT eine Laboruntersuchung durch, bei der die Auswir-

kungen von Blendimpulsen mit einer Länge zwischen 0,3 und 10 Sekunden auf die menschliche Wahrnehmung untersucht wurden. Der Fokus der Studie richtete sich dabei auf die Readaptationszeit nach temporärer Blendung. Diese wurde basierend auf verschiedenen Modellen rechnerisch ermittelt und statistisch ausgewertet. Zusätzlich wurde noch eine Probandenuntersuchung durchgeführt, bei der die psychologische Blendung erfasst und mit der rechnerisch bestimmten Readaptationszeit verglichen wurde. Hierbei saßen die Probanden in einem Fahrzeug und wurden von speziell umgebauten Scheinwerfern geblendet, die es ermöglichten, schnelle vertikale Bewegungen zu vollziehen. Die dadurch entstehenden Blendimpulse wurden mit realen Fahrzeugdynamikbewegungen verglichen. LEHNERT fand eine Korrelation zwischen der Dauer des Blendreizes und der psychologischen Blendung. Allerdings hängt diese Korrelation vom Maximum der Blendreizdauer ab, da eine zeitliche Verlängerung des Blendreizes zu einem stärkeren Gefühl des Unwohlseins führt. Bei einer Blendreizdauer über 0,3 Sekunden erhöhte sich die Readaptationszeit signifikant. Ebenfalls konnte eine lineare Korrelation zwischen der logarithmisch abnehmenden maximalen Blend-Beleuchtungsstärke und der Bewertung der psychologischen Blendung ermittelt werden. (LEHNERT 2001b)

FLANNAGAN untersuchte unter anderem die Vorteile der LWR für aktuelle Abblendlichter in den USA. Diese Untersuchung ist besonders interessant, da in den USA eine LWR für kein Fahrzeug vorgeschrieben ist. Der Grund hierfür ist, dass in der amerikanischen Regulierung hohe Sichtweiten favorisiert werden und Blendung eher eine sekundäre Rolle spielt. Allerdings gab es hier in letzter Zeit mehrere wesentliche Änderungen, bei denen Blendungsaspekte immer mehr an Bedeutung gewinnen. In der Untersuchung von FLANNAGAN wurden eine Familienlimousine, ein Minivan und ein SUV getestet. Die drei Fahrzeuge wurden im vollbeladenen sowie im leeren Zustand untersucht, um die dynamischen Effekte zu bestimmen. Hierzu wurden zwei Laser an der Fahrzeugfront und am Heck befestigt und der Abstand zur Straße mit 100 Hz gemessen. FLANNAGAN stellte fest, dass beladene Fahrzeuge einen höheren Neigungswinkel verursachen als unbeladene. Ebenfalls stellte FLANNAGAN einen Zusammenhang zwischen der gefahrenen Geschwindigkeit und dem Neigungswinkel fest. Bei Geschwindigkeiten unter 50 km/h sind die Schwankungen der Fahrzeugneigung um

ein Vielfaches größer als bei Geschwindigkeiten über 50 km/h. (FLANNAGAN et al. 2007)

ZYDEK untersuchte in seiner Dissertation unter anderem den Einfluss der Fahrzeugbeladung auf die Blendung. Hierfür hat ZYDEK 25 unterschiedliche Serienfahrzeuge mit unterschiedlichen Scheinwerfersystemen und drei unterschiedlichen Beladungszuständen (0%, 50% und 100%) untersucht. 0% entspricht hierbei dem Fahrzeugleergewicht und 100% dem zulässigen Gesamtgewicht des jeweiligen Kfz. In der Untersuchung wurden die Beleuchtungsstärke, die Leuchtdichte und die psychologische Blendung der unterschiedlich beladenen Fahrzeuge untersucht. „Die Bewertungen der psychologischen Blendung der Probanden auf der Fahrer- und Beifahrersitzposition wurden zusammengelegt, da sich kein signifikanter Unterschied der Bewertung ergeben hat.“ ZYDEK konnte eine Abhängigkeit zwischen der DE BOER-Bewertung und der Beladung feststellen. Bei den Zuständen 0% und 50% Beladung wurde eine DE BOER-Bewertung größer 5 ermittelt, eine Bewertung, die für eine geringe Blendung spricht. Bei 100% Beladung wurde dagegen ein DE BOER-Wert von 2,7 ermittelt. Bereits ein Wert von 3 entspricht dabei einer als störend empfundenen Blendung. „Die Mittelwerte der DE BOER-Bewertungen für 0% und 50%, als auch diejenigen für 50% und 100% unterscheiden sich signifikant.“ Die Beladung der Fahrzeuge hat somit einen signifikanten Einfluss auf die Blendungsbewertung der Probanden. Ebenfalls konnte eine Abhängigkeit der DE BOER-Bewertung vom Nickwinkel der HDG ermittelt werden. Die Korrelation besitzt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,78$ und weist eine zunehmende Blendung bei steigendem Nickwinkel auf. Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Lichtquellen – Halogenleuchte, Gasentladungslampe und LED – konnte kein signifikanter Unterschied ermittelt werden. Ebenfalls konnte Folgendes ermittelt werden: „Bei dem Einstellprozess der Scheinwerfer wurde festgestellt, dass sich bei gleicher Beladung der unterschiedlichen Fahrzeuge stark unterschiedliche Werte des sich einstellenden Nickwinkels der HDG ergeben.“ Dies führt zu der Annahme, dass zusätzlich zur Beladung auch das Fahrwerk einen entscheidenden Einfluss auf das Blendungsempfinden aufweist. Nach Auswertung der photometrischen Daten stellte ZYDEK fest, dass die mittlere Beleuchtungsstärke und die maximale Leuchtdichte die geeignetsten Größen sind, „um anhand dieser eine möglichst genaue Aussage über die Blendung von Scheinwerfern zu treffen“.

Allerdings werden durch die Bildung des Mittelwertes die Beleuchtungsstärkedaten geglättet und sind somit für die Betrachtung der Fahrzeugdynamik nur als Richtwert geeignet. ZYDEK schlussfolgerte in seiner Untersuchung, dass die aktuell gültige Kopplung der LWR an einen bestimmten Lampenlichtstrom oder an den Lampentyp LED nicht zielführend ist. (ZYDEK 2014)

KASABA von KOITO Manufacturing stellte während der ISAL 2015 ein System vor, mit dem die Fahrzeugneigung nicht durch konventionelle Abstandssensoren, sondern mit einem Beschleunigungssensor bestimmt werden kann. Dieser soll kleiner, leichter und kostengünstiger sein als die derzeit verwendeten Abstandssensoren. Mit dem Beschleunigungssensor ist es möglich, die dynamischen Fahrzeugnickbewegungen zu berechnen. Als Referenz wird hierbei die Fahrzeugachse verwendet und mittels des Tangenssatzes und der Sensordaten die Fahrzeugneigung berechnet. Die statischen Nickbewegungen, z.B. durch Beladung werden durch einen Gravitationsbeschleunigungssensor ermittelt. Hierbei werden die Sensordaten miteinander verglichen und somit eine mögliche Beladung festgestellt. (KASABA 2015)

4 AP 2: Untersuchung der Neigungswinkel repräsentativer Fahrzeuge unter Berücksichtigung der Parameter Beladung, Fahrwerk und Fahrzeugdynamik

Um den Einfluss der Fahrzeugneigung auf die Blendung zu ermitteln, werden in der vorliegenden Untersuchung zwei unterschiedliche Arten von Fahrzeugen verwendet: Test- und Messfahrzeuge. Die beiden Arten werden im Folgenden näher erläutert. Testfahrzeuge sind die Fahrzeuge, bei denen die Parameter Beladung, Fahrwerk und Fahrzeugdynamik untersucht werden. Messfahrzeuge sind diejenigen Fahrzeuge, in denen die Blendungseigenschaften des Testfahrzeuges gemessen werden.

Im Folgenden wird zuerst die verwendete Messtechnik erklärt, dann die Auswahl der Testfahrzeuge erläutert. Im Anschluss werden der verwendete Versuchsaufbau sowie der Versuchsablauf beschrieben.

4.1 Messtechnik zur Ermittlung der Fahrzeugdynamik und der Blendung

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die für die vorliegenden Untersuchungen verwendete Messtechnik zur Ermittlung der Fahrzeugdynamik sowie der Blendung.

4.1.1 Entwickeltes System zur Bestimmung der Fahrzeugneigung

Aus den Erkenntnissen der in Kapitel 3.2 beschriebenen Literatur, wurde ein eigenes System entwickelt, mit dem die Lage des Kfz zur Straße messtechnisch bestimmt werden kann.

Neigungssensor Karosserie

Zum Einsatz kommt, ähnlich wie bei KASABA, ein Neigungssensor. Mit dessen Hilfe kann der Winkel α des Fahrzeugs zur Horizontalen bestimmt werden. Der Neigungssensor vom Typ UM 7 ist vom Hersteller CH ROBOTICS und kann mit einer zeitlichen Auflösung von 255 Hz ausgelesen werden. Bei Relativmessungen weist dieser Sensor eine Genauigkeit von $\pm 0,5^\circ$ auf.

Abstandssensoren Karosserie

Zusätzlich kommen wie bei HUHNER und FLANNAGAN zwei Abstandssensoren zum Einsatz, die an der Front und am Heck des Fahrzeuges befestigt werden. Diese sind vom Typ GP 2 Y0A 02 YK des

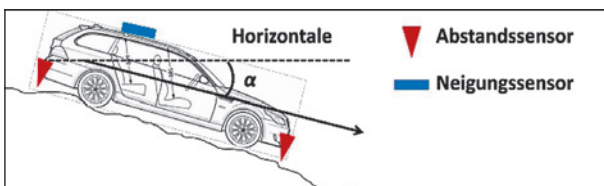


Bild 2: Positionierung der verwendeten Sensoren am Fahrzeug

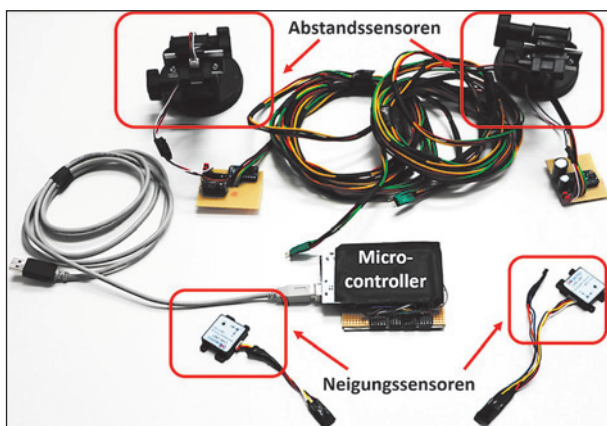


Bild 3: Messtechnik zur Bestimmung der Fahrzeugneigung

Herstellers SHARP. Sie können mit einer zeitlichen Auflösung von 30 Hz ausgelesen werden. Die Abstandssensoren wurden unter Labor- und Realitätsbedingungen charakterisiert und arbeiten in einem Bereich zwischen 20 und 60 cm mit einer Genauigkeit von ± 3 mm. Bild 2 zeigt einen schematischen Aufbau der Positionierung der Messtechnik am Fahrzeug.

Die Positionierung der Abstandssensoren basiert dabei auf den Untersuchungen zur Bestimmung der Fahrzeugneigung von (LEHNERT 2001a; HUHNER 1999; FLANNAGAN et al. 2007).

Elektronik

Die Ansteuerung der Sensoren erfolgt über einen Microcontroller vom Typ Arduino Mega, der wiederum die gesammelten Daten auf einer SD-Speicherkarte ablegt. Die Daten auf der SD-Karte können im Anschluss an einem Computer ausgewertet werden.

Durch die gleichzeitige Verwendung von Abstands- und Neigungssensoren ist es möglich, die Lage des Fahrzeuges in Bezug zur Straße zu bestimmen und dadurch die Fahrzeugdynamik zu ermitteln. In Bild 3 ist die verwendete Messtechnik zur Bestimmung der Fahrzeugneigung, bestehend aus Abstands- und Neigungssensoren zu sehen. Die Abstandssensoren arbeiten auf Basis der Triangulation und liefern ein analoges Ausgangssignal. Dieses wird mit einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert und an den Microcontroller gesendet. Zusätzlich wird die Spannungsversorgung hardwaretechnisch geglättet, da das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) der Betriebsspannung proportional zum SNR der Messergebnisse ist. Dadurch ist es möglich, eine reproduzierbare Genauigkeit von ± 3 mm zu erzielen.

Neigungssensor an der Lichtquelle im Scheinwerfer

Zur Ermittlung des Regelverhaltens der dLWR, wird ein zusätzlicher Neigungssensor direkt am Projektionsmodul des Scheinwerfers befestigt. Dies ist aus Platzgründen nur für Fahrzeuge mit Gasentladungslampen möglich, da die Scheinwerferhersteller zum Tausch der Gasentladungslampe eine Wartungsklappe vorgesehen haben. Halogen-Scheinwerfer besitzen zwar auch eine solche Klappe, allerdings ist wie in Kapitel 3.1 beschrieben, bei Halogen-Scheinwerfern keine dLWR vorgeschrieben. Durch diese Klappe wird ein zweiter Neigungssensor direkt an der Halterung der Gasentladungslampe befestigt, der sich bei jeder Bewegung des Licht-

kegels mitbewegt. Bei diesem Neigungssensor wird aufgrund der hohen Temperaturen der Gasentladungslampe zusätzlich die Temperatur überwacht. Dadurch ist es möglich, die Daten in Abhängigkeit der Umgebungs- bzw. Arbeitstemperatur anzugleichen. Durch die beiden Neigungssensoren, an der Gasentladungslampe und an der Karosserie des Fahrzeuges, ist es möglich, sowohl die Regelgeschwindigkeit als auch die Winkeländerungen des Lichtkegels zu erfassen.

4.1.2 Eingesetzte Messtechnik zur Bestimmung der Blendung

In diesem Kapitel werden alle eingesetzten Messgeräte in Funktion und zeitlicher Auflösung beschrieben.

Beleuchtungsstärke

Grundsätzlich wird in jedem Messfahrzeug die Beleuchtungsstärke auf der Innenseite der Frontscheibe zwischen Fahrer- und Beifahrersitz gemessen (vgl. Bild 8). Diese Position hat sich in ersten Vorversuchen bewährt, da eine Positionierung direkt neben Fahrer oder Beifahrer bereits bei kleinen Bewegungen der jeweiligen Probanden zu einer Schattenbildung auf dem Messkopf geführt hat. Das eingesetzte Beleuchtungsstärkemessgerät vom Typ X-11 der Firma Gigahertz-Optik kann in dem Bereich von 0,1 lx – 5 lx mit einer zeitlichen Auflösung von 50 ms arbeiten. Diese Auflösung ergibt sich aus 20 ms Erfassung und Integration der aktuell gemessenen Beleuchtungsstärke und zusätzlichen 30 ms zur Übertragung des Beleuchtungsstärkewertes an den verwendeten Microcontroller. Die ermittelten Werte haben sich in einem Laborversuch ergeben.

Blendungsknopf

Um ermitteln zu können, zu welchem Zeitpunkt sich die Probanden bei der erfassten Beleuchtungsstärke geblendet fühlen, wurde für die Probanden auf dem Fahrersitz ein sogenannter Blendungsknopf eingesetzt. Die Probanden waren aufgefordert diesen zu drücken, sobald sie sich geblendet fühlen (DE BOER-Bewertung < 5). Der Knopf bewirkt ein Interrupt im Messsystem und der Zeitpunkt wird abgespeichert, so dass später der genaue Zeitpunkt im Beleuchtungsstärkeverlauf ermittelt werden kann.

Kontrastbox

Zur Messung der physiologischen Blendung (vgl. Kapitel 2.1), wird wie bereits in früheren Untersu-

chungen von ZYDEK eine Kontrastbox eingesetzt. Mit dieser ist es möglich, den Schwellenkontrast, also den gerade noch wahrnehmbaren Kontrast, dynamisch zu bestimmen. Hierzu ist in einer schwarzen Box eine weiße LED hinter einer kreisförmigen Streuscheibe angebracht. Während des Versuchs wird die Leuchtdichte der LED automatisch jede 20 ms, um ca. 1 % erhöht. Sobald die LED durch einen Probanden vor dem dunklen Umfeld in der Box wahrgenommen werden konnte, hatten die Probanden die Aufgabe, einen Knopf zur Einstellung der Kontrastbox zu drücken. Das Drücken des Knopfes führte zu einer Reduzierung der LED-Leuchtdichte in der Kontrastbox um ca. 1,5 %. Durch wiederholtes Drücken des Knopfes wurde die Helligkeit der LED immer genau auf der Schwelle zu „gerade noch wahrnehmbar“ gehalten. Diese Kontrastanpassung durch die Probanden erfolgte kontinuierlich während jedes Durchlaufs. Dies hat zur Folge, dass die Kontrastschwelle bei einem sich nähernden Testfahrzeug ansteigt. Die LED muss demzufolge immer heller eingestellt werden, bis das entgegenkommende Kfz das Fahrzeug der Probanden vollständig passiert hatte. Für den Fall, dass kurze Maxima durch das Testfahrzeug entstehen, wird dem Probanden die Möglichkeit gegeben, über einen weiteren Knopf die Helligkeit der LED sprunghaft um ca. 3 % zu erhöhen. Die angegebenen Werte wurden in mehreren Vorversuchen ermittelt. Bild 4 zeigt den schematischen Aufbau, wie der Schwellenkontrast während eines Durchlaufs dynamisch ermittelt wird.

Die Kontrastbox wurde nur für den Beifahrer eingesetzt und so positioniert, als ob der Proband auf dem Beifahrersitz ein Objekt in 50 m Entfernung auf der rechten Straßenseite detektieren würde (vgl. (ZYDEK 2014)). Dieser Abstand entspricht in etwa einem Anhalteweg aus 80 km/h, einer typischen Geschwindigkeit, die auf Landstraßen gefahren

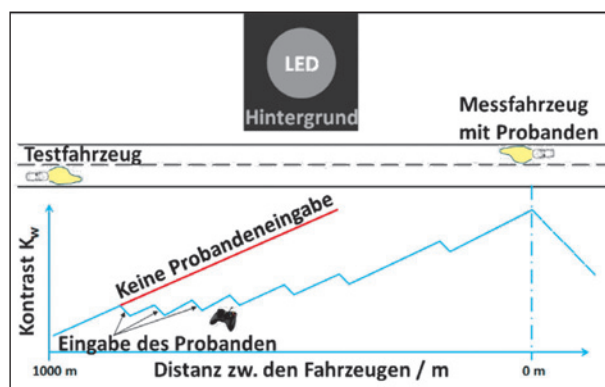


Bild 4: Aufnahme des dynamischen Schwellenkontrastes während eines Durchlaufs (nach (ZYDEK 2014))

wird. Der Anhalteweg beinhaltet dabei die Reaktionszeit und die Bremsverzögerung des Fahrzeugs.

Eye-Tracking und Pupillometrie


Eine weitere Möglichkeit, die physiologische Reaktion des menschlichen Auges auf Lichtreize zu messen, ist die Reaktion der Pupille eines Probanden zu beobachten. Es ist bereits bekannt, dass die Pupille des Menschen sich bei stärkerem Lichteinfall zusammenzieht und bei geringem Lichteinfall ausdehnt. Dieser Umstand soll genutzt werden, um schnelle Änderungen in der Beleuchtungsstärke mit einer Änderung im Pupillendurchmesser zu assoziieren. Hierzu wird in jedem Messfahrzeug am Lenkrad ein Eye-Tracking-System der Firma The Eye Tribe befestigt. Dieses System ist in der Lage, mit einer Auflösung von 30 Hz sowohl die Blickrichtung des Probanden als auch seinen relativen Pupillendurchmesser aufzunehmen. Dieses System wird direkt am Lenkrad befestigt und ermittelt die Pupillendurchmesser des Probanden auf dem Fahrersitz.

4.2 Auswahl repräsentativer Testfahrzeuge

ZYDEK zeigt, dass das Fahrwerk und nicht der Lichtstrom für die hervorgerufene Blendung ausschlaggebend ist und dass eine Korrelation zwischen Fahrzeugnickwinkel und psychologischer Blendung besteht (ZYDEK et al. 2013). Somit ergeben sich zwei unterschiedliche Parameter, die für die Fahrzeugauswahl ausschlaggebend sind: der Lichtstrom und das Fahrwerk. Im Folgenden wird auf die Fahrzeugauswahl in Abhängigkeit der beiden Parameter genauer eingegangen.

Der Lichtstrom ist von der/den verwendeten Lichtquelle(n) abhängig. Drei verschiedene Lichtquellen-typen sind für das hier untersuchte Abblendlicht auf dem Markt erhältlich und von Fahrzeugherstellern verbaut: Halogenglühlampen, Gasentladungslampen und LEDs. Die Verwendung der aLWR ist an den Lichtstrom geknüpft und somit bei der Verwendung von 35 Watt Gasentladungslampen Pflicht. Bei LED-Scheinwerfern ist eine aLWR immer verpflichtend (UN-Regelung Nr. 48). Bei Scheinwerfern mit Halogenglühlampen ist eine aLWR nicht vorgeschrieben, da üblicherweise in Scheinwerfern verwendete Halogenglühlampen einen Lichtstrom unterhalb von 2.000 lm aufweisen. In der vorliegenden Untersuchung wird in einem direkten Vergleich zwischen Lichtquellen oberhalb (z.B. Gasentladungs-

Fahrzeug	Lichtquelle	Fahrwerk	LWR
Peugeot 208	Halogen	Weich	Manuell
Opel Insignia	Halogen	Mittel	Keine
Opel Insignia	Gasentladung	Mittel	Dynamisch
Audi A3	Gasentladung	Mittel	Dynamisch
Audi S3	Gasentladung	Hart	Dynamisch
VW POLO	LED	Hart	Dynamisch



Tab. 1: Übersicht der getesteten Fahrzeuge, deren Lichtquellen, Fahrwerkseigenschaften und LWR

lampen) und unterhalb (z.B. Halogenglühlampen) der Grenze von 2.000 Lumen die Frage geklärt, ob die Verknüpfung der aLWR mit dem Lichtstrom sinnvoll ist oder nicht. Um die Parameter Lichtstrom und Fahrwerk miteinander verknüpfen zu können, wurden zwei Teiluntersuchungen durchgeführt. Bei der ersten Untersuchung wurden bei einem Fahrzeug die Halogen-Scheinwerfer auf Gasentladungs-Scheinwerfer getauscht. Durch die Verwendung von ein und demselben Fahrzeug kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrzeugdynamik identisch ist, wodurch der Einfluss der Lichtverteilung bzw. der Lichtquelle auf die Blendung isoliert untersucht werden kann. Bei der zweiten Teiluntersuchung wurde der Einfluss des Fahrwerks auf die Blendung untersucht. Hierfür wurden zwei Fahrzeuge mit gleichen Scheinwerfern und demzufolge gleicher Lichtverteilung, aber unterschiedlichen Federeigenschaften untersucht. Eine Marktrecherche hat gezeigt, dass bei den Fahrzeugen Audi A3 und Audi S3 unterschiedliche Federeigenschaften und gleichzeitig identische Scheinwerfertypen verbaut sind. Zur Klassifizierung der verbauten Fahrwerke der ausgewählten Fahrzeuge, wurde im statischen Zustand der Nickwinkel bei einer Zuladung von 250 kg gemessen. Hierbei wurde der Abstand im beladenen und unbeladenen Zustand zwischen einer nivellierten Laserlinie und dem hinteren Kotflügel gemessen. Durch die Differenz der beiden Messungen ist es möglich, die verbauten Federn statisch zu klassifizieren. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der getesteten Fahrzeuge zu sehen, die die verwendeten Lichtquellen, die Fahrwerksklassifizierung sowie die Art der verbauten LWR zeigt.

Zu beachten ist, dass der Opel Insignia doppelt gelistet ist, da während des Testdurchlaufs die Scheinwerfer gewechselt wurden. Es konnte das gleiche Fahrwerk (Fahrzeug) benutzt werden, während von

Gasentladung- auf Halogen-Scheinwerfer gewechselt wurde. Durch den Umbau auf Halogen-Scheinwerfer entfällt dabei das Erfordernis einer aLWR. Durch den Umbau war es technisch jedoch nicht möglich, die erforderliche manuelle LWR zu nutzen.

Die fünf verwendeten Testfahrzeuge aus Tabelle 1 lassen sich in drei Gruppen einteilen, je nachdem, wie stark das Heck einfedert. In Bild 5 ist die Differenz zwischen beladenem und unbeladenem Fahrzeug sowie die Einteilung in die vorher erwähnten drei Gruppen zu erkennen. Zu beachten ist hierbei, dass diese Messung lediglich die Federhärte des Fahrzeuges beschreibt, nicht aber die Dämpfungseigenschaften. Diese Messung wurde gewählt, da der Regelbereich der LWR auf statischen Beladungsänderungen basiert und somit ebenfalls die Federhärte berücksichtigt.

Der Audi S3 (Fahrzeug 4) besitzt das härteste Fahrwerk in dieser Untersuchung und dient deshalb als oberster Grenzwert. Das Fahrzeug mit dem weichsten Fahrwerk in dieser Untersuchung, ein Peugeot 208 (Fahrzeug 1) mit Halogen-Scheinwerfern, wird als unterster Grenzwert betrachtet. Als Fahrzeug mit LED-Scheinwerfern wird ein Volkswagen Polo verwendet, da dieser in der Kompaktklasse die meisten Neuzulassungen in Deutschland hat (Statista 2017).

Um die Lichtverteilung der einzelnen Fahrzeuge vergleichen zu können, wurde neben der Fahrbahn eine Leuchtdichtekamera vom Typ LMK 5 Color der Firma Technoteam aufgebaut. Mit dieser wurden Leuchtdichteaufnahmen der Lichtverteilung auf der Straße erzeugt. Für eine bessere Vergleichbarkeit, wurden alle Fahrzeuge, sequentiell an derselben Stelle positioniert.

In Bild 6 sind die Aufnahmen der fünf Fahrzeuge bzw. sechs Scheinwerfersysteme zu sehen. Zu erkennen ist, dass der Peugeot 208 mit Halogen-Scheinwerfern die schmalste und gleichzeitig auch dunkelste Lichtverteilung auf der Straße besitzt. Ebenfalls ist zu sehen, dass der Audi A3 und der Audi S3, wie oben angenommen, dieselben Lichtverteilungen erzeugen. Der Opel Insignia mit Halogen-Scheinwerfern verursacht eine helle und gleichzeitig breite Lichtverteilung. Im direkten Vergleich zum Insignia mit Gasentladungs-Scheinwerfern fällt auf, dass das meiste Licht im Mittelbereich gebündelt ist.

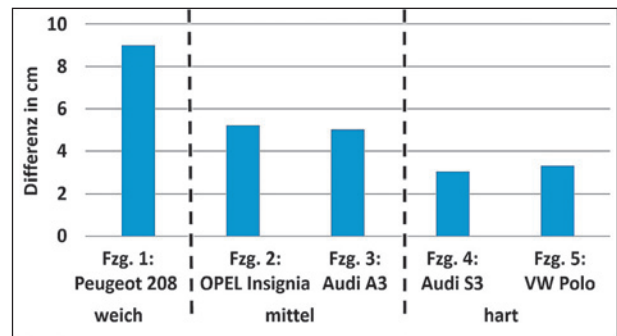


Bild 5: Statische Klassifizierung der Federhärte der Fahrwerke

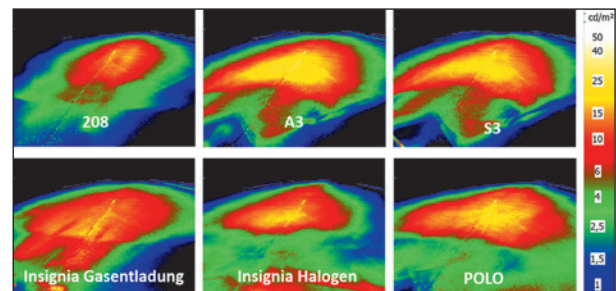


Bild 6: Vorfeld-Leuchtdichte der verwendeten Fahrzeuge

4.3 Versuchsaufbau und -ablauf

Die Untersuchungen wurden auf dem Versuchsgelände der Technischen Universität Darmstadt, dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim bei Darmstadt, durchgeführt. Das Testgelände des Flugplatzes ist unterteilt in eine ca. 1200 m lange Start- und Landebahn und einen parallel dazu verlaufenden Taxiway. Die Untersuchung wurde auf der Start- und Landebahn durchgeführt.

Bei den Testfahrzeugen wurde der Beladungszustand und, falls vorhanden und technisch möglich, die Einstellung der LWR verändert. Um die Auswirkungen der Beladung auf die Fahrzeugdynamik der unterschiedlichen Testfahrzeuge zu überprüfen und sie miteinander vergleichen zu können, wurden alle Testfahrzeuge mit dem gleichen Gewicht beladen. Die Beladung hat ein Gesamtgewicht von 250 kg, die im Kofferraum der Testfahrzeuge positioniert wurden und annähernd der 50 % Nutzlast des verwendeten Kleinwagens entspricht. Zudem handelt es sich in etwa um eine Zuladung von drei Personen inklusive Gepäck.

In Tabelle 2 ist eine Übersicht der untersuchten Parameter der Testfahrzeuge dargestellt. Um die in Tabelle 2 beschriebenen Parameter hinsichtlich Blendung bewerten zu können, wurde eine Probandenstudie durchgeführt, in der folgende Parameter untersucht wurden:

Testfahrzeug	
Beladung	<ul style="list-style-type: none"> • 0 kg • 250 kg
LWR	<ul style="list-style-type: none"> • aktiviert • deaktiviert
Unterschiedliche Federeigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • weich • mittel • hart
Unterschiedliche Scheinwerfer	<ul style="list-style-type: none"> • Halogen • Gasentladung • LED
Neigungswinkel	<ul style="list-style-type: none"> • Abstandssensoren • Neigungssensoren

Tab. 2: Untersuchte Parameter in den Testfahrzeugen

- physiologische Blendung (vgl. 2.1)
- psychologische Blendung (vgl. 2.2)
- Beleuchtungsstärke (vgl. 4.1.2)
- Pupillendurchmesser (vgl. 4.1.2)

Um vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten, wurden alle oben genannten Parameter gleichzeitig untersucht. Hierbei fuhr ein Testfahrzeug nach der Beschleunigung auf 80 km/h mit konstanter Geschwindigkeit entlang der Start- und Landebahn. Währenddessen hatten Probanden in den stehenden Messfahrzeugen im Gegenverkehr die Aufgabe, die physiologische und psychologische Blendung des sich nähernden Testfahrzeuges zu bewerten. Ein solcher Vorgang wird nachfolgend als Durchlauf bezeichnet. Vor jedem Durchlauf wurde die Scheinwerfer-Einstellung kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert. In Bild 7 ist der Versuchsaufbau zu sehen.

Durch die vier stehenden Messfahrzeuge konnten mehrere Probanden gleichzeitig ihre Blendungsbewertung abgeben. Die Messfahrzeuge ID1 bis ID3 waren hierbei mit je zwei Probanden besetzt, welche sowohl die psychologische als auch die physiologische Blendung des jeweiligen Testfahrzeuges bewerteten. Fahrer und Beifahrer in den Messfahrzeugen ID1 - ID3 hatten unterschiedliche Aufgaben. Der Proband auf dem Fahrersitz hatte jeweils die Aufgabe, die psychologische Blendung mithilfe der DE BOER-Skala zu bewerten. Zusätzlich hielt dieser Proband einen Blendungsknopf (vgl. Kapitel 4.1.2) in der Hand, der gedrückt werden sollte, sobald sich der Proband während eines Durchlaufs durch das Testfahrzeug geblendet fühlt (DE BOER-Bewertung < 5). Während eines Durchlaufs wurde ebenfalls der Pupillendurchmesser des Probanden auf dem Fahrersitz mit einem Eye-Tracker gemes-

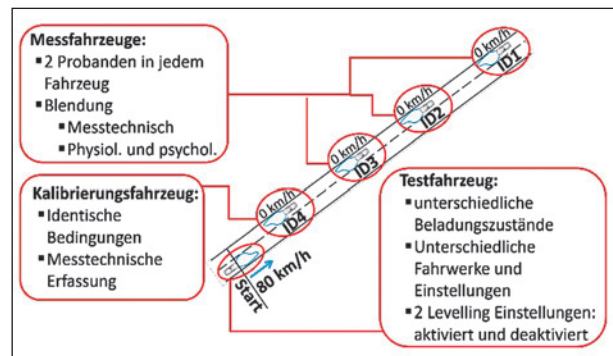


Bild 7: Versuchsaufbau auf dem August-Euler-Flugplatz

sen, um eine Korrelation zwischen Pupillenreaktion und Blendung herzustellen. Die Aufgabe des Probanden auf dem Beifahrersitz bestand darin, für jeden Durchlauf die physiologische Blendung mithilfe der Kontrastbox (vgl. Kapitel 4.1.2) zu bewerten. Hierzu stellte der Beifahrer kontinuierlich den Schwellenkontrast K_{wth} ein (vgl. Kapitel 2.1). Nach jedem Durchlauf wurde auch der Proband auf dem Beifahrersitz aufgefordert, die psychologische Bewertung mittels der DE BOER-Bewertungs-Skala vorzunehmen. Die Probanden sollten sich während der Untersuchung vorstellen, auf einer nächtlichen Landstraße unterwegs zu sein und ihren Blick foveal auf das vorausfahrende Fahrzeug zu richten. Dies definiert einerseits die Adaptation der Probanden und stellt andererseits einen Realitätsbezug dar. Da kein signifikanter Unterschied zwischen den Bewertungen aus Fahrer- und Beifahrerperspektive gefunden werden konnte (vgl. Anhang 1), wurden diese Bewertungen für die weitere Analyse zusammengefasst. Messfahrzeug ID4 diente als Orientierung für die Probanden in Messfahrzeug ID3, damit diese genau wie alle anderen Probanden ihren Blick auf die Heckleuchten eines vor ihnen befindlichen Fahrzeuges richten konnten. Durch diese Bedingung wurde sichergestellt, dass die Adaptation der Probanden in den verschiedenen Messfahrzeugen identisch ist. Weiterhin wurde in ID4 der Beschleunigungsvorgang der entgegenkommenden Testfahrzeuge in Form der Beleuchtungsstärke messtechnisch erfasst. Bild 8 zeigt aus einem Messfahrzeug eine Aufnahme aus Fahrerperspektive. Die Instrumentenbeleuchtung des Messfahrzeuges ist dabei auf minimale Helligkeit eingestellt. Zu erkennen sind der Blendungsknopf, der Eye-Tracker der den Pupillendurchmesser bestimmt, der Beleuchtungsstärkemesskopf sowie die Kontrastbox. Zur Datensynchronisation wurde in jedem Fahrzeug ein GPS-Modul verbaut. Dadurch ist es außerdem möglich, den Abstand zwischen Test- und Messfahrzeug bestimmen zu können.

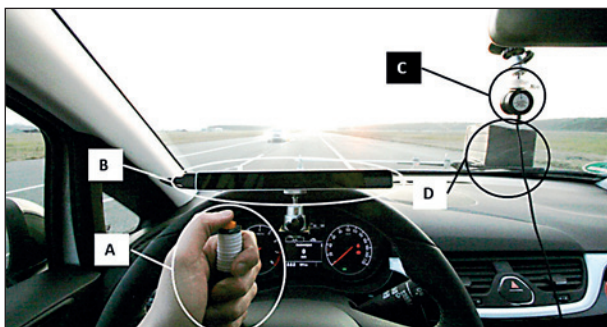


Bild 8: Eingesetzte Messtechnik im Messfahrzeug:
A: Blendungsknopf, B: Kontrastbox,
C: Beleuchtungsstärkemesskopf und D: Eye-Tracker

Die Steuereinheiten der Messtechnik waren in einem Gehäuse verpackt und auf den Rücksitzen der jeweiligen Messfahrzeuge positioniert. Dadurch waren die Steuereinheiten vor den Probanden und äußeren Einflüssen geschützt. Zusätzlich wurde ein Funkmodul verwendet, das nach Abfrage eine Statusmeldung aller angeschlossenen Systeme an den Testleiter sendete. Dadurch konnten die angeschlossenen Steuereinheiten und demzufolge die Messtechnik, kabellos auf dem gesamten Testgelände überwacht werden.

Jeder Durchlauf wurde für die beiden unterschiedlichen Beladungszustände, sowie falls vorhanden, für die unterschiedlichen LWR-Einstellungen jeweils drei Mal wiederholt. Dies ermöglicht es, die Daten der Probanden auf Konsistenz zu prüfen, d. h. „ob eine Person eine bestimmte physikalische Fragestellung zu unterschiedlichen Zeitpunkten in gleicher Weise beantwortet“ (BÖDEKER 2006).

Insgesamt ergaben sich mit allen Testfahrzeugen und Einstellungen an einem Untersuchungsabend 54 Durchläufe. Diese resultieren aus 3 Wiederholungen bei 18 verschiedenen Fahrzeugkombinationen (s. Tabelle 3). Dabei ist zu berücksichtigen, dass beim Polo die dLWR nicht deaktiviert werden konnte. Jeder Durchlauf dauerte jeweils ca. 3 Minuten, wodurch eine rein rechnerische Versuchsdauer von 162 Minuten resultiert. Eine Erhöhung der Wiederholungen ist demzufolge nicht angemessen, da dadurch die Konzentration bzw. Motivation der Probanden erheblich drunter leiden würde. Kurze Pausen entstanden durch den Versuchsablauf selbst, wenn beispielsweise die Testfahrzeuge wieder am Start positioniert wurden. Weitere Pausen wurden je nach Bedarf der Probanden gemacht. Die Untersuchungen fanden innerhalb von 14 Tagen in 8 verschiedenen Nächten statt.

4.4 Probanden

Insgesamt haben 47 Probanden an der Untersuchung teilgenommen. 28 Personen waren unter 30 Jahre alt und werden im Folgenden als „jüngere Probanden“ bezeichnet. 19 Probanden waren über 40 Jahre alt. Auf Basis der Daten von (LERMAN 1980) werden diese Probanden aufgrund der ab dem 40. Lebensjahr deutlich auftretenden Vergilbung und Trübung der Augenlinse im Folgenden als „ältere Probanden“ bezeichnet. Der jüngste Proband war 20 Jahre alt und der älteste 66 Jahre alt.

4.5 Ergebnisse

Die folgenden Abschnitte fassen die Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen von AP 2 zusammen.

Psychologische Blendung

Bei der Betrachtung der DE BOER-Bewertungen der jungen und alten Probanden, ist kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Altersgruppen zu erkennen (vgl. Anhang 5). Das Gleiche gilt auch für die DE BOER-Bewertungen aus Fahrer- und Beifahrerperspektive. Aus diesem Grund werden die Bewertungen zusammenzufassen. Ein Boxplot mit dem Vergleich zwischen jüngeren und älteren Probanden, sowie ein weiterer Boxplot in dem die DE BOER-Bewertungen zwischen Fahrer und Beifahrer verglichen werden, befindet sich im Anhang (vgl. Anhang 1).

Im Anschluss werden die mittleren DE BOER-Bewertungen für die einzelnen Testfahrzeuge, in die Gruppen „blendend“ und „nicht blendend“ eingeteilt. Als blendend gelten alle Testfahrzeuge mit einer mittleren DE BOER-Bewertung von kleiner als fünf. Nicht blendend sind demzufolge Testfahrzeuge, mit einer Bewertung größer als fünf. In Tabelle 3 ist eine Übersicht der Fahrzeuge der beiden Gruppen dargestellt. Die Namensgebung besteht hierbei aus drei Teilen. Der erste Teil ist das Fahrzeugmodell, der zweite gibt an, ob die dLWR aktiviert (An) oder deaktiviert (Aus) ist und der dritte Teil gibt den Beladungszustand an.

Es fällt auf, dass im Allgemeinen keine psychologische Blendung durch ein Testfahrzeug hervorgerufen wird, wenn die dLWR aktiviert (An) ist. Bei deaktivierter dLWR (Aus) fühlen sich die Probanden dagegen in den meisten Fällen geblendet. Zu den blendenden Fahrzeugen zählt der Opel Insignia mit Gasentladungs-Scheinwerfern und deaktivier-

Nicht blendend		Blendend	
208 Halogen	Leer	Insignia	Aus Leer
208 Halogen	Voll	Insignia	Aus Voll
A3	An Leer	Insignia	An Voll
A3	An Voll	Insignia Halogen	Leer
A3	Aus Leer	Insignia Halogen	Voll
A3	Aus Voll	Polo	An Voll
Insignia	An Leer	S3	Aus Leer
Polo	An Leer	S3	Aus Voll
S3	An Leer		
S3	An Voll		

Tab. 3: Gruppierung der Fahrzeuge (18 Fahrzeugkombinationen) nach DE BOER-Bewertung (An / Aus = Zustand der dLWR; Voll / Leer = Zustand der Fahrzeugbeladung)

ter dLWR. Dies ist zu erwarten, da hier die dLWR entgegen den Vorschriften der (UN-Regelung Nr. 48) deaktiviert ist, obwohl diese eigentlich vorgeschrieben ist. Bemerkenswert ist allerdings, dass der Opel Insignia mit aktivierter dLWR und voller Beladung (Insignia An Voll) als blendend bewertet wird, obwohl die dLWR die Nickbewegungen ausgleichen und somit die Blendung vorbeugen sollte. Weiterhin wird der Opel Insignia mit Halogen-Scheinwerfern in beiden Beladungszuständen (Insignia Halogen Leer und Insignia Halogen Voll) als blendend bewertet. Hier ist keine aLWR vorgeschrieben, da die verwendeten H7-Glühlampen einen Lichtstrom von weniger als 2.000 lm aufweisen. Es ist jedoch bereits in den Leuchtdichteaufnahmen aufgefallen, dass dieser Halogen-Scheinwerfer eine helle und im Zentrum konzentrierte Lichtverteilung besitzt (vgl. Bild 6). Weiterhin ist auch der Polo mit aktivierter dLWR und voller Beladung (Polo An Voll) in der Gruppe der blendenden Fahrzeuge. Hier scheint die Beladung, wie bereits beim Opel Insignia, die Fahrzeugneigung soweit zu verändern, dass die dLWR die Fahrzeugbewegungen nicht mehr ausgleichen kann. Es fallen zusammengefasst vier Fahrzeugkombinationen auf, die im Serienzustand als blendend empfunden werden. Diese sind:

- Insignia An Voll
- Insignia Halogen Leer
- Insignia Halogen Voll
- Polo An Voll

Eine mögliche Erklärung für die hervorgerufene psychologische Blendung dieser vier Fahrzeugkombinationen könnte eine erhöhte Belichtung sein.

Die Belichtung ist die Integration der gemessenen Beleuchtungsstärke über die Zeit. Frühere Untersuchungen am Fachgebiet Lichttechnik haben gezeigt, dass eine Entblendung des Gegenverkehrs (Umschalten von Fernlicht auf Abblendlicht zur Blendungsvermeidung) bei 400 m Begegnungsabstand stattfinden sollte (SPRUTE 2012). Um eine Aussage über die Belichtung treffen zu können, wurde die erfasste Beleuchtungsstärke über den Zeitraum der letzten 400 m vor dem Passieren des jeweiligen Messfahrzeuges integriert. Bei einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h benötigt ein Testfahrzeug für die 400 m etwa 18 s. Somit kann die Belichtung mit folgender Formel berechnet werden:

$$H_{0 \text{ bis } 400 \text{ m}} \left(80 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right) = \int_{0 \text{ s}}^{18 \text{ s}} E_v(t) dt \quad (4.1)$$

Nach Berechnung der Belichtung für alle Fahrzeuge fällt auf, dass alle als blendend bewerteten Fahrzeuge, eine erhöhte Belichtung aufweisen. In Bild 9 ist die Korrelation zwischen mittlerer DE BOER-Bewertung und mittlerer Belichtung H für die 18 Fahrzeugkombinationen aus Tabelle 3 zu sehen.

Die in Rot gezeigte Trendlinie weist ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,84$, weshalb von einer Korrelation ausgegangen werden kann. Bei einer Belichtung von etwa 3,5 lx·s sind Probandenbewertungen zu erkennen, die eine vergleichbar große Standardabweichung von bis zu 0,6 Bewertungseinheiten aufweisen (siehe rote Markierung in Bild 9). Das lässt auf eine hohe Probandenunsicherheit um den BCD schließen. Bei der Betrachtung von Belichtung und DE BOER-Bewertung ist zu beachten, dass Fahrzeugdynamikerscheinungen nicht optimal dargestellt werden können, da diese aus Integrationsdaten über den kompletten Durchlauf bestehen. Fahrzeugdynamikerscheinungen wie beispielsweise ein Lichtimpuls beim Überfahren einer Bodenwelle, besteht allerdings aus einem kurzen Lichtimpuls. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf die Daten des Blendungsknopfes eingegangen.

Blendungsknopf

Der Blendungsknopf wird von den Probanden während eines Durchlaufes betätigt, falls ein Lichtimpuls des entgegenkommenden Testfahrzeuges als blendend empfunden wurde (vgl. Kapitel 4.1.2). Da jeder Proband eine individuelle Schwelle für das Drücken des Blendungsknopfes hat, werden vor einem Vergleich der Ergebnisse alle Daten standardisiert (vgl. Anhang 2). Bei der Standardisierung wer-

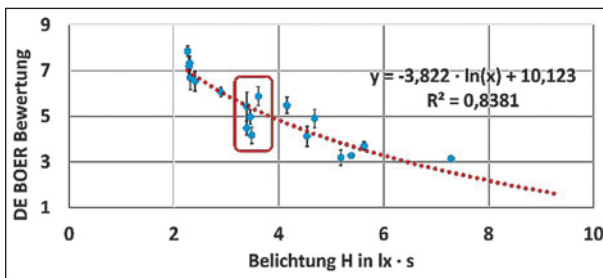


Bild 9: DE BOER-Bewertung über der Belichtung für alle 18 Fahrzeugkombinationen

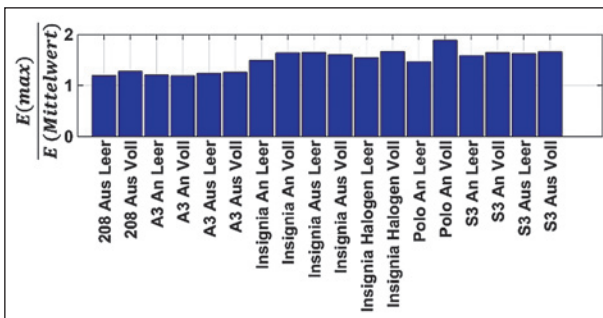


Bild 10: Verhältnis zwischen Maximum und Mittelwert der Beleuchtungsstärke

den die Daten in z-Werte umgerechnet. Die Werte nach der Transformation werden dann in Vielfachen der Standardabweichung gemessen und weisen einen Mittelwert von Null auf (LOHNINGER 2017). Durch die z-Transformation ist es möglich, die Daten von den drei Messfahrzeugen ID1, ID2 und ID3 miteinander zu vergleichen und die Bewertungen auf Signifikanz zwischen leerem und beladenem Fahrzeug zu untersuchen. Bei den Testfahrzeugen Audi A3 und S3 konnten bei der Bewertung durch den Blendungsknopf mit aktivierter dLWR jeweils signifikante Unterschiede zwischen beladen und unbeladen festgestellt werden (A3: $p=0,040$, S3: $p=0,005$). Entgegen den Erwartungen werden beide Fahrzeuge jedoch sowohl beladen als auch unbeladen bei der psychologischen Blendung nach DE BOER als nicht blendend bewertet. Auffällig sind auch der Opel Insignia und der VW Polo. Hier sind ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen beladen und unbeladen für die Bewertung durch den Blendungsknopf erkennbar (Insignia: $p=0,040$; Polo: $p=0,025$). Wie zu erwarten wechseln die DE BOER-Bewertungen von „nicht blendend“ im unbeladenen Zustand auf „blendend“ im beladenen Zustand. Es ergibt sich die Frage, aus welchem Grund es bei den vier erwähnten Fahrzeugen zur Blendung kommt sobald diese beladen werden. Um dies zu analysieren, wird die erfasste Beleuchtungsstärke in dem Zeitraum bis zu einer Sekunde vor dem Drücken des Blendungsknopfes betrachtet. Hierbei

werden folgende Parameter berechnet: Mittelwert, lokale und globale Maxima, Anzahl der Maxima und das Verhältnis von maximaler Beleuchtungsstärke zur mittleren Beleuchtungsstärke innerhalb des Zeitraums von einer Sekunde vor dem Drücken des Blendungsknopfes. Eine Korrelation konnte lediglich für den letzten Parameter gefunden werden, der in Bild 10 dargestellt ist. Dargestellt wird für die 18 Fahrzeugkombinationen aus Tabelle 3, das beschriebene Verhältnis von ermitteltem Maximum zum Mittelwert der Beleuchtungsstärke. Die Balken stellen dabei jeweils den Mittelwert über alle Maximum-zu-Mittelwert-Berechnungen dar, da der Blendungsknopf für jede Fahrzeugkombination in der Regel mehrfach gedrückt wurde.

Alle Daten befinden sich in einem Wertebereich zwischen 1,2 und 1,7 und zeigen nach statistischer Analyse keine signifikanten Unterschiede. Eine Ausnahme bildet hier die Fahrzeugkombination Polo An Voll, die sich signifikant von allen anderen Fahrzeugen unterscheidet ($p=0,053$). Aus Bild 10 ist zu erkennen, dass ein hohes Verhältnis von maximaler zu mittlerer Beleuchtungsstärke (1,984) ein Grund für das Drücken des Blendungsknopfes zu sein scheint.

4.5.1 Auswertung der Daten bei konstanter Fahrt

Nachfolgend werden die Daten zur Fahrzeugneigung und die ermittelten Beleuchtungsstärken bei konstanter Fahrt (ohne Beschleunigungsvorgang) dargestellt.

Neigungsdaten

Die mit den Sensoren erfassten Neigungsdaten der Fahrzeuge dienen dazu, signifikante Einflüsse und eine Korrelation zwischen Blendung und Fahrwerk zu überprüfen. Die Teststrecke lässt sich in zwei Abschnitte einteilen. Im Ersten Abschnitt mit einer Länge von etwa 150 m beschleunigt das Testfahrzeug auf 80 km/h. In diesem Abschnitt treten die größten Fahrzeugneigungswinkel auf. Im zweiten Abschnitt fährt das Testfahrzeug mit Tempomat konstant 80 km/h. In Bild 11 ist ein Boxplot mit den Neigungswinkeln aller fünf untersuchten Fahrzeuge bei konstanter Fahrt dargestellt. Ein Boxplot visualisiert fünf Punkte einer Verteilung. Diese sind:

1. Maximum (obere Antenne)
2. 75% Quartil (oberer Rand der Box)

3. Median (roter Strich in der Box)
4. 25 % Quartil (unterer Rand der Box)
5. Minimum (untere Antenne)

In der Mitte ist in Rot der Median markiert, wobei die umschließende Box durch das 25 %-Quartil q_{25} und das 75 %-Quartil q_{75} begrenzt wird. Das Minimum bzw. Maximum (auch Antennen genannt) wird durch folgende Formel berechnet:

$$\max = q_{75} + w(q_{75} - q_{25}) \quad (4.2)$$

$$\min = q_{25} - w(q_{75} - q_{25}) \quad (4.3)$$

w ist dabei eine Konstante, die mit 1,57 angegeben wird. Die abgebildete Länge der Antennen im Boxplot hängt von den Werten der Daten ab. Daten, die außerhalb des Antennenbereichs liegen, werden mit roten Kreuzen gekennzeichnet und als Ausreißer bezeichnet. (Mathworks 2017)

Bei der Betrachtung der Neigungsdaten für die konstante Fahrt fällt auf, dass 50 % aller Daten in einen Bereich von $\pm 0,1^\circ$ fallen.

Der kleinste abgedeckte Winkelbereich, unter Berücksichtigung aller Ausreißer in den Daten, wird vom Audi A3 im leeren Zustand erreicht und beträgt $0,9^\circ$. Der Opel Insignia hingegen weist im leeren Zustand den maximalen Winkelbereich von $1,7^\circ$ auf. Die maximale Neigungsänderung nach unten beträgt hier etwa -1° (vgl. Kapitel 4.1.1). Zu tief leuchtende Scheinwerfer verursachen eine geringere Sichtweite beim Fahrer. Bei dem beobachteten Neigungswinkel von -1° entspricht dies eine um etwa 20 m reduzierte Sichtweite. Eine dLWR mit geringer Latenzzeit könnte diese Neigungsänderung ausgleichen. Weiterhin fällt auf, dass die vier oben erwähnten auffälligen Fahrzeugkombinationen (Peugeot 208 beladen, Opel Insignia beladen und unbeladen, und Audi S3 beladen) durch die Neigung von mehr als $0,5^\circ$, mit der HDG oberhalb des Horizonts landen. Dies könnte ein potenzieller Grund für die blendende psychologische Bewertung darstellen (vgl. Tabelle 3).

Beleuchtungsstärken

Bei Betrachtung der einzelnen Beleuchtungsstärkeverläufe ist für den Peugeot 208 zu erkennen, dass obwohl die HDG durch die Fahrzeugneigung über den Horizont wandert, sich die Probanden nach der DE BOER-Bewertung, psychologisch nicht geblendet fühlen (vgl. Tabelle 3). Ein möglicher Grund hierfür ist in dem niedrigeren Lichtstrom und der Licht-

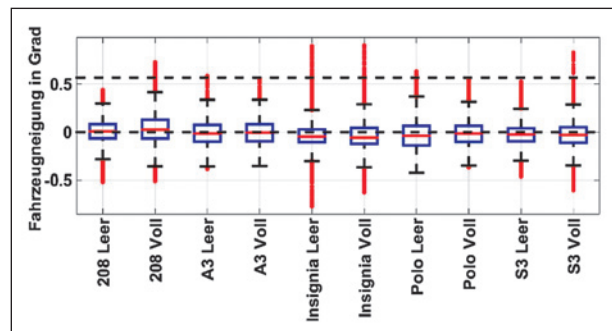


Bild 11: Verteilung der Fahrzeug-Neigungswinkel bei konstanter Fahrt für alle 5 Fahrzeuge; Hilfslinien bei $0^\circ / 0,57^\circ$

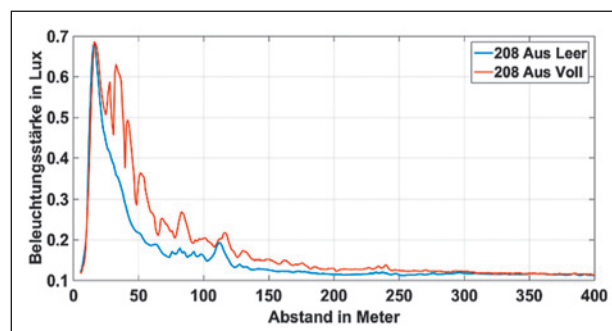


Bild 12: Beleuchtungsstärkeverlauf des Peugeot 208

verteilung der verbauten Halogen-Scheinwerfer zu finden (vgl. Leuchtdichteaufnahmen in Bild 6). In Bild 12 ist der Beleuchtungsstärkeverlauf des Peugeot 208 als Funktion des Abstands dargestellt. Dabei bezieht sich der Abstand auf die Entfernung zwischen dem Peugeot (Testfahrzeug) und Messfahrzeug ID1 (vgl. Bild 7).

Der dargestellte maximale Abstand beginnt in einer Entfernung von 400 m zwischen Testfahrzeug und Messfahrzeug und endet beim vollständigen Passieren beider Fahrzeuge (0 m). Diese Darstellung wird auch im weiteren Verlauf dieses Berichts verwendet. Sowohl im beladenen Zustand (Voll), als auch im unbeladenem Zustand (Leer) wird ein Maximum in der gemessenen Beleuchtungsstärke in Messfahrzeug ID1 von $0,7 \text{ lx}$ erreicht. Auffällig ist, dass die Beleuchtungsstärke im beladenen Zustand deutlich über den Werten des unbeladenen Zustandes verläuft und zahlreiche lokale Maxima entstehen. Dies erhöht die Belichtung von $3,7 \text{ lx}\cdot\text{s}$ (unbeladen) auf $4,4 \text{ lx}\cdot\text{s}$ (beladen). Dennoch werden von den Probanden beide Beladungszustände mit einer mittleren DE BOER-Bewertung von 7,1 (nicht blendend) bewertet.

In Bild 13 sind die Beleuchtungsstärkeverläufe des Opel Insignia mit Gasentladungs-Scheinwerfern über den Abstand im Begegnungsverkehr zwischen

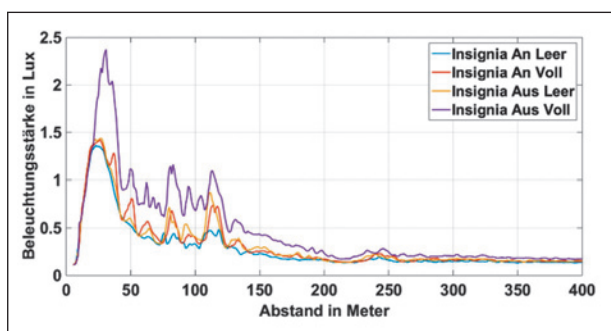


Bild 13: Beleuchtungsstärkeverlauf des Insignia mit Gasentladungsscheinwerfern über den Abstand für dLWR an/aus und unbeladen/beladen)

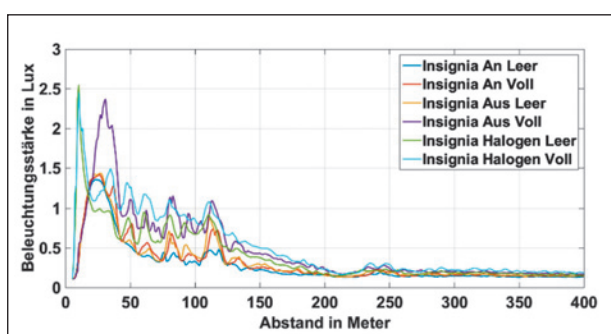


Bild 14: Beleuchtungsstärkeverlauf des Insignia mit Halogen- und Gasentladungsscheinwerfern über den Abstand im unbeladenen/beladenen Zustand

Test- und Messfahrzeug dargestellt. Hierbei wird sowohl zwischen aktivierter (An) und deaktivierter dLWR (Aus), als auch beladen (Voll) und unbeladen (Leer) unterschieden. Die Beleuchtungsstärke erreicht beim Opel Insignia mit Gasentladungsscheinwerfern für aktivierte dLWR (An) im beladenen und unbeladenen Zustand einen maximalen Wert von fast 1,5 lx. Dieser Wert ist im Vergleich zum Peugeot 208 mit Halogen-Scheinwerfern etwa doppelt so hoch. Dies resultiert für beide Beladungszustände in einer im Vergleich zum Peugeot höheren psychologischen Blendung nach DE BOER: Insignia An Voll = 4,8 und Insignia An Leer = 5,5.

Für aktivierte dLWR und beladen (Insignia An Voll) fällt auf, dass im Vergleich zu unbeladen (Insignia An Leer) nicht alle lokalen Maxima durch die dLWR verhindert werden. Die Vermutung liegt nahe, dass die dLWR in diesem Fahrzeug bei Beladung langsam reagiert und dadurch die auftretenden Maxima nicht ausgleicht. Die entstehenden Maxima in der Beleuchtungsstärke weisen teilweise einen ähnlichen Verlauf, wie bei unbeladenem Fahrzeug und deaktivierter dLWR auf (DE BOER = 4,4). Bei deaktivierter dLWR und voller Beladung erreicht die maximale Beleuchtungsstärke einen Wert von etwa 2,4 lx. Auch der Gesamtverlauf der Kurve liegt deut-

lich über den anderen drei Fahrzeugkombinationen die in Bild 13 gezeigt sind. Die hervorgerufene psychologische Blendung erreicht mit einer DEBOER-Bewertung von 3,5 den schlechtesten Wert.

In Bild 14 sind die Beleuchtungsstärkeverläufe des Opel Insignia mit Halogen- und Gasentladungsscheinwerfern, für den beladenen und unbeladenen Zustand, über den Abstand zwischen Test- und Messfahrzeug (ID1) dargestellt. Bei deaktivierter dLWR zeigen sich im direkten Vergleich der Beleuchtungsstärkeverläufe von Insignia Halogen Leer und Insignia Aus Voll (Gasentladungsscheinwerfer) folgende Erkenntnisse: der Insignia mit Gasentladungsscheinwerfern weist mit voller Beladung bei deaktivierter dLWR eine Belichtung von 10 lx·s und eine DE BOER-Bewertung von 3,5. Beim Insignia mit Halogen-Scheinwerfern (keine aLWR vorgeschrieben) werden vergleichbare Werte bereits ohne Beladung erreicht (Belichtung $H=9,6 \text{ lx}\cdot\text{s}$, DE BOER-Bewertung = 3,9).

Dies ist zudem der Fall, obwohl die H7-Lampen der Halogen-Scheinwerfer nach (UN-Regelung Nr. 37) nur einen Nennlichtstrom von 1.500 lm aufweisen (< 2.000 lm). Die Gasentladungslampen weisen dagegen nach UN-Regelung Nr. 99 einen mehr als doppelt so hohen Nennlichtstrom von 3.200 lm (> 2.000 lm) auf (UN-Regelung Nr. 99). Die Verwendung des Lichtstroms der verwendeten Lichtquelle als Kriterium für den verpflichtenden Einsatz einer aLWR scheint auf Basis dieser einzelnen Daten fraglich und sollte ggf. vertieft untersucht werden. Die Beleuchtungsstärkeverläufe der Halogen-Scheinwerfer erreichen für beide Beladungszustände (keine aLWR vorhanden/vorgeschrieben) ein ähnliches Maximum von ca. 2,5 lx. Ein vergleichbares Maximum wird von den Gasentladungsscheinwerfern nur mit deaktivierter dLWR bei voller Beladung erreicht. Ist die dLWR hingegen aktiviert, werden mit den Gasentladungsscheinwerfern im unbeladenen Zustand die niedrigsten Beleuchtungsstärken im Vergleich dieser 4 Fahrzeugkombinationen des Insignia ermittelt.

In Bild 15 ist der Beleuchtungsstärkeverlauf vom Audi S3 über den Abstand dargestellt. Hierbei fällt auf, dass die Beleuchtungsstärkeverläufe für beladen und unbeladen sowie dLWR aktiviert und deaktiviert nahezu keinen Unterschied aufweisen. Dennoch konnten bei der Auswertung des Blendungsknopfes signifikante Unterschiede festgestellt werden (vgl. Blendungsknopf). Die mittlere DE BOER-Bewertung fällt jedoch bei deaktivierter dLWR

tendenziell leicht schlechter aus (DE BOER-Bewertung = 4,6), als das für die aktivierte dLWR der Fall ist (DEBOER-Bewertung = 5,4). Eine mögliche Erklärung ist, dass die Fahrzeugdynamik des Audi S3 viele kleine Maxima im Verlauf der Beleuchtungsstärke erzeugt, die vom Photometer trotz der zeitlichen Auflösung von 50 ms (20 ms Integrationszeit; vgl. Kapitel 4.1.2) nicht erfasst werden. Von den Probanden hingegen könnten diese wahrgenommen werden. Die Aktivierung der dLWR könnte dazu führen, dass diese kurzen Maxima weitgehend ausgeglichen/vermieden werden.

Einen Anhaltspunkt für diese Vermutung zeigt der Vergleich der Neigungsdaten von Audi A3 und S3 im Vergleich. Der Audi A3 weist unter allen untersuchten Fahrzeugen die geringste Streuung in der Änderung des Neigungswinkels bei konstanter Fahrt auf (vgl. Bild 11). Bild 16 zeigt die Neigungsdaten beider Fahrzeuge im direkten Vergleich.

Die hohen Werte im Bereich zwischen 1.000m und 720m sind auf die Beschleunigungsvorgänge zurückzuführen. Zwischen 720m und 300m Abstand (nach Abschluss der Beschleunigungsphase), fallen beim S3 stärkere und schnellere Änderungen in der Neigung der Fahrzeugkarosserie im Vergleich zum A3 auf. Dies ist wahrscheinlich auf das härtere Fahrwerk zurückzuführen, da nicht davon auszugehen ist, dass im S3 eine andere dLWR als im A3 verbaut ist. Dies unterstreicht die Vermutung, dass beim S3 ohne dLWR kurze und gleichzeitig mit dem verwendeten Photometer nicht messbare Maxima in der Beleuchtungsstärke (< 20ms; vgl. Kapitel 4.1.2) entstehen, die von den Probanden als mehr blendend empfunden werden.

In Bild 17 ist der Beleuchtungsstärkeverlauf für die LED-Scheinwerfer des VW Polo (dLWR aktiviert) im beladenen und unbeladenen Zustand für den Abstand von 0–400m dargestellt. Zwischen 400–1.000m liegt die Differenz zwischen beiden Grafen unter 0,04lx. Sowohl im Maximum als auch im Gesamtverlauf ist zu erkennen, dass die Beleuchtungsstärke im beladenen Zustand deutlich über den Werten für den unbeladenen Zustand liegt.

Das zeigt sich auch in den berechneten Werten für die Belichtung. Während diese für den unbeladenen Zustand einen Wert von 3,6 lx·s erreicht, steigt sie im beladenen Zustand auf 5,3 lx·s. Es kann gefolgert werden, dass die eingebaute dLWR nicht in der Lage ist, die Scheinwerfer bei voll beladenem Fahrzeug richtig einzustellen. Diese Tatsache führt

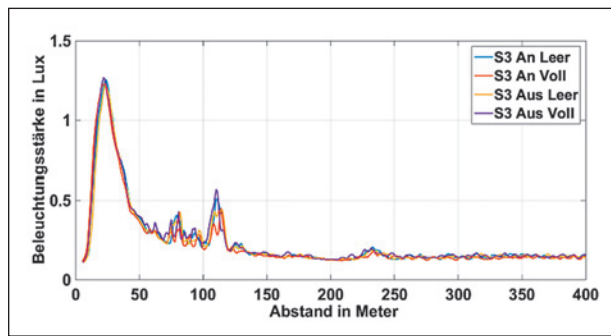


Bild 15: Beleuchtungsstärkeverlauf vom Audi S3 über den Abstand für dLWR aus/an sowie den Beladungszustand leer/voll

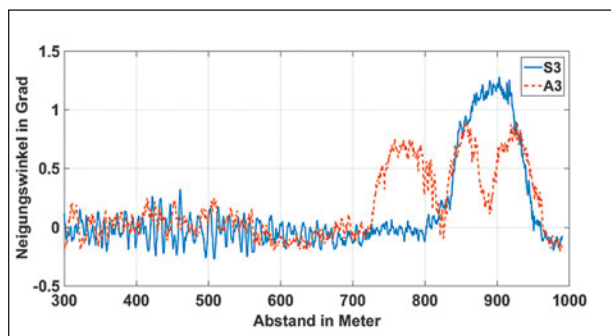


Bild 16: Vergleich der Neigungsdaten der Karosserie bei konstanter Fahrt über den Abstand für Audi A3 und S3; Auflösung: 255Hz (vgl. Kapitel 4.1.1)

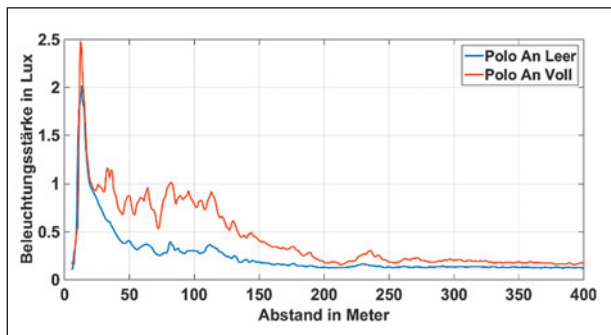


Bild 17: Beleuchtungsstärkeverlauf des VW Polo über den Abstand für beladen/unbeladen

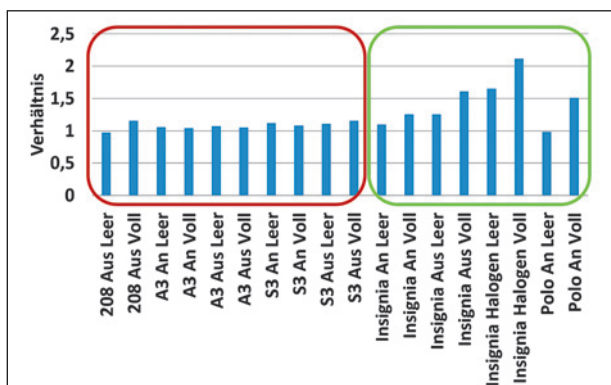


Bild 18: Verhältnis von dynamischer zu quasistatischer Belichtung für alle 18 Fahrzeugkombinationen

dazu, dass sich die Probanden im beladenen Zustand deutlich mehr geblendet fühlen (DE BOER-Bewertung = 3,3), als das für den unbeladenen Zustand der Fall ist (DE BOER-Bewertung = 5,9). Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass die Fahrzeugdynamik und damit die Beschaffenheit des Fahrwerks einen wesentlichen Einfluss auf die erfassten lichttechnischen Eigenschaften hat (Beleuchtungsstärke, psychologische Blendung). Aus diesem Grund wurde neben der bereits beschriebenen Belichtung für den dynamischen Fall (Testfahrzeug fährt mit 80 km/h) zusätzlich die quasistatische Belichtung (Testfahrzeug fährt mit 5 km/h) erfasst. Auf diese Weise ist es durch Vergleich möglich, den Einfluss der Fahrzeugdynamik zu charakterisieren.

Durch Bildung des Verhältnisses zwischen der berechneten Belichtung im dynamischen Fall und bezieht diese auf den quasistatischen Fall, so ergibt sich für alle 18 untersuchten Fahrzeugkombinationen (vgl. Tabelle 3) die Darstellung in Bild 18. Zu erkennen sind zwei Gruppen, die rot bzw. grün umrandet sind. In der ersten Gruppe entspricht die quasistatische Belichtung in etwa der dynamischen Belichtung. Als Folge ergibt sich ein Verhältnis von etwa 1 (rotes Kästchen in Bild 18). Die vorhandenen Bodenunebenheiten können durch die Fahrwerke weitgehend ausgeglichen werden und führen zu keiner großen Bewegung der Fahrzeugkarosserie. Für diese Gruppe ist kein signifikanter Unterschied in der Belichtung zwischen aktivierter und deaktivierter dLWR zu erkennen ($p=0,563$). Zu dieser Gruppe gehören der Peugeot 208, der Audi A3 sowie der S3.

In der zweiten Gruppe ist die dynamische Belichtung größer als im quasistatischen Fall (grünes Kästchen in Bild 18). Für diese Gruppe kann weder das Fahrwerk noch die dLWR die Unebenheiten der Fahrbahn ausgleichen. Zu Gruppe 2 gehören der Opel Insignia mit aktivierter dLWR (unbeladen), der Insignia mit deaktivierter dLWR (beladen/unbeladenen), der Insignia mit Halogen-Scheinwerfern (beladenen/unbeladenen) sowie der VW Polo mit aktivierter dLWR (beladen). Beide Gruppen (rot, grün) unterschieden sich statistisch signifikant voneinander ($p=0,016$).

4.5.2 Auswertung der Daten beim Beschleunigen

Die folgenden Kapitel gehen auf die Neigungsdaten und die Latenzzeiten beim Beschleunigungsvorgang ein.

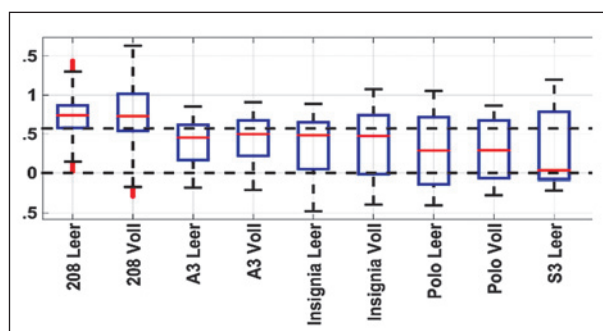


Bild 19: Verteilung der Fahrzeug-Neigungswinkel beim Beschleunigungsvorgang für alle 5 Fahrzeuge

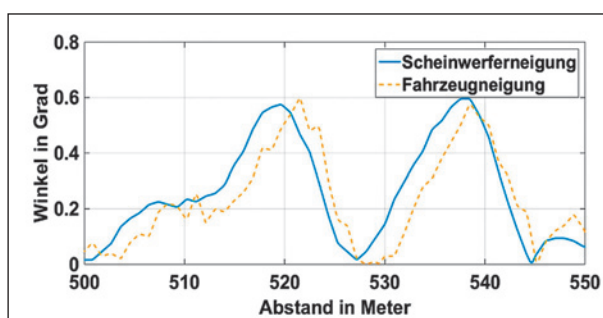


Bild 20: Neigungsdaten für Scheinwerfer und Karosserie des Opel Insignia mit Gasentladungs-Scheinwerfern beim Beschleunigungsvorgang

Neigungsdaten

In Bild 19 sind Boxplots für die Neigungswinkel der Karosserie aller getesteten Fahrzeuge im beladenen und unbeladenen Zustand während des Beschleunigungsvorgangs dargestellt. Die gestrichelte Linie bei $0,57^\circ$ symbolisiert den Horizont aus Scheinwerferperspektive. Durch die Beschleunigung heben sich alle Fahrzeuge vorne zumindest zeitweise so stark an, dass die Scheinwerfer über den Horizont strahlen. Auffällig ist hierbei der Peugeot 208, der durch sein weiches Fahrwerk stets oberhalb des Horizonts liegt. Ähnliches gilt für den Audi S3. Dieser hat zwar das härteste Fahrwerk in dieser Untersuchung, wegen seiner Motorleistung erfährt der S3 jedoch auch die stärkste Beschleunigung und liegt daher trotzdem weitgehend oberhalb des Horizonts.

Latenzzeit der dLWR

Um die Latenzzeit der dLWR bestimmen zu können, wurde auf dem Brenner der Scheinwerfer mit Entladungslampen ein zweiter Neigungssensor angebracht (vgl. Kapitel 4.1.1). Diese Sensordaten wurden mit den Daten des Neigungssensors der Karosserie verglichen. Bild 20 zeigt exemplarisch die Daten der beiden Neigungssensoren des Opel Insignia mit Gasentladungs-Scheinwerfern im unbeladenen Zustand für den Beschleunigungsvorgang.

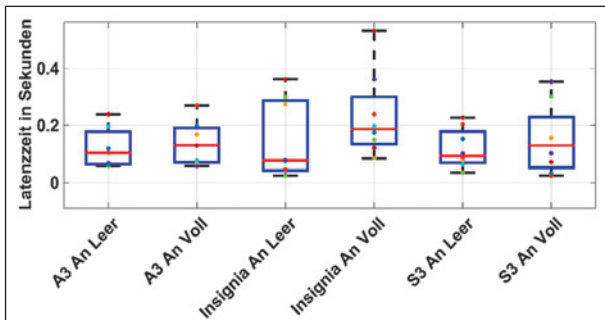


Bild 21: Darstellung der Latenzzeiten der dLWR für alle Fahrzeuge mit Gasentladungs-Scheinwerfern

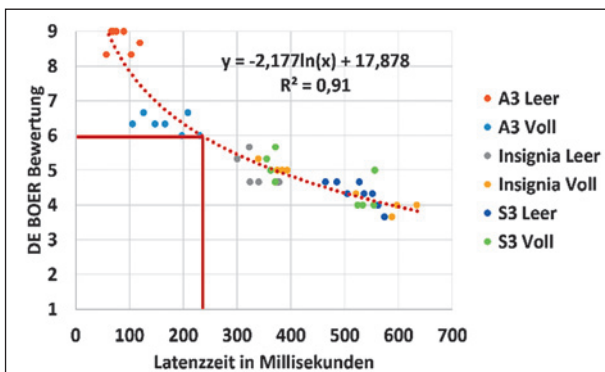


Bild 22: Korrelation von Latenzzeit und DE BOER-Bewertung

Zur besseren Veranschaulichung sind die Daten beider Sensoren, die in ihrer Neigung an sich entgegengesetzt orientiert sind, als Betrag dargestellt. Zudem zeigt Bild 20 nur einen kleinen Ausschnitt des Beschleunigungsvorgangs. Der Vergleich der beiden Sensorkurven weist einen konstanten zeitlichen Offset zwischen Neigung der Karosserie und Neigung des Projektionsmoduls auf. Die Neigung des Projektionsmoduls, geregelt durch die dLWR, erfolgt zeitlich immer später als die auf die Bodenunebenheiten reagierende Fahrzeugkarosserie. Um die zeitliche Verzögerung präziser darstellen zu können, wurden für jede einzelne Fahrt alle auftretenden Maxima der Sensordaten analysiert. Bild 21 zeigt die Boxplots der Latenzzeiten der dLWR für die drei untersuchten Fahrzeuge mit Gasentladungs-Scheinwerfern bei aktivierter dLWR für den beladenen und unbeladenen Zustand. Es zeigt sich, dass die maximale Verzögerung stark schwankt und vom Beladungszustand des Fahrzeuges abhängig sind.

Die beladenen Fahrzeuge weisen dabei eine deutlich größere Latenzzeit auf, sowohl im Median, als auch im Maximum.

Latenzzeit der dLWR und Blendung

Im nächsten Schritt wurden die ermittelten Latenzzeiten mit den DE BOER-Bewertungen auf Korrela-

tion überprüft. Bild 22 zeigt die Korrelation grafisch. Die Daten korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,91$. Auffällig sind die Daten bei einer DE BOER-Bewertung von 9 (unmerkliche Blendung). Sie sind in der Mehrzahl dem Audi A3 zuzuordnen.

Die in Bild 22 gezeigte Korrelation zeigt, dass eine schneller auf Fahrzeugbewegungen reagierende dLWR, zu einer geringeren psychologischen Blendung führt. Dabei zeigt sich, dass bei einer Latenzzeit von 350 ms eine DE BOER-Bewertung von fünf erreicht wird, die einen Übergang zwischen blendend und nicht darstellt. Bei einer konservativeren Blendungs-Betrachtung könnte eine Latenzzeit von unter 220 ms gewählt werden, um eine DE BOER-Bewertung von sechs zu erzielen und somit eine Blendungsbewertung zwischen gerade noch annehmbar und zufriedenstellend zu erreichen. Eine weitere Reduzierung der Latenzzeit ist geeignet die Blendungsbewertung noch weiter zu verbessern.

4.5.3 Eye-Tracking und Kontrastbox

Die folgenden Kapitel gehen auf das Eye-Tracking, die Bestimmung des Pupillendurchmessers sowie Daten der Kontrastbox ein.

Eye-Tracking mit Pupillendurchmesser

Bild 23 zeigt exemplarisch die Messdaten für den Insignia Halogen unbeladen über den Abstand zwischen Test- und Messfahrzeug. Im oberen Teil sind die Beleuchtungsstärkeverläufe (vgl. Bild 8) dargestellt. Der untere Teil zeigt den inversen normierten Pupillendurchmesser, der anhand des Eye-Trackers (vgl. Bild 8) ermittelt wurde, als relative Größe.

Es sind jeweils zwei Bereiche zu identifizieren. Für Entfernungen von mehr als 200 m ist zu erkennen, dass sowohl der Beleuchtungsstärkeverlauf, als auch der inverse Pupillendurchmesser trotz kleiner Schwankungen relativ flach verläuft. Die Pupille reagiert nicht immer auf Änderungen der Beleuchtungsstärke, vermutlich wegen der zu geringen Absolutwerte und der Verlauf entspricht eher einem Rauschen. Deshalb können derartige Daten nicht herangezogen werden, um eine Korrelation zwischen Pupillendurchmesser und psychologischer oder physiologischer Blendung zu überprüfen. Für den Bereich von weniger als 200 m Abstand, steigen beide Kurven in Bild 23 an. Für die in dieser Untersuchung auftretenden Beleuchtungsstärken ergibt sich bei allen Probanden jedoch keine Korre-

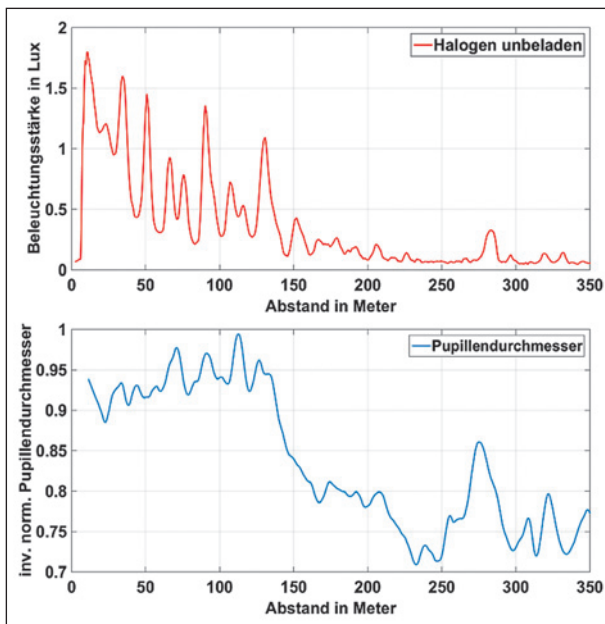


Bild 23: Vergleich von Beleuchtungsstärke und invers. Pupillendurchmesser (Opel Insignia Hal. unbeladen)

lation zwischen Pupillendurchmesser und Beleuchtungsstärke.

In Bild 24 wird der mittlere inverse Pupillendurchmesser für junge und alte Probanden als Boxplot gezeigt. Die roten Boxplots zeigen dabei die Pupillendurchmesser der jungen Probanden und die blauen die der alten. Die Pupillendurchmesser werden in der Grafik anhand Tabelle 3 für ein psychologisch nicht blendendes Fahrzeug (208 Halogen Leer) und ein blendendes Fahrzeug (S3 Aus Voll) dargestellt.

Die in Bild 24 gezeigten Pupillendurchmesser zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen jungen und alten Probanden ($p = 0,926$), sowie zwischen blendendem und nicht blendendem Fahrzeug ($p = 0,512$).

Kontrastbox

Beim Auswerten der Daten der Kontrastboxen (vgl. Kapitel 4.1.2) zeigt sich, dass diese im Vergleich zu den Vortests kaum verwendbar sind. Ein möglicher Grund ist, dass die Testpersonen als lichttechnische Laien durch die Einstellung der Kontrastbox überfordert schienen. Zudem war manchen Probanden trotz vorheriger Einweisung offensichtlich doch nicht ganz bewusst, worin die Aufgabe bei der Einstellung der Kontrastbox genau besteht. Bild 25 zeigt exemplarisch den über Pulsweitenmodulation (PWM) eingestellten Helligkeitsverlauf der LED in der Kontrastbox für einen Durchlauf. Der Proband hat trotz auftretender Blendung durch ein Testfahrzeug darauf verzichtet, die Helligkeit der LED zu ir-

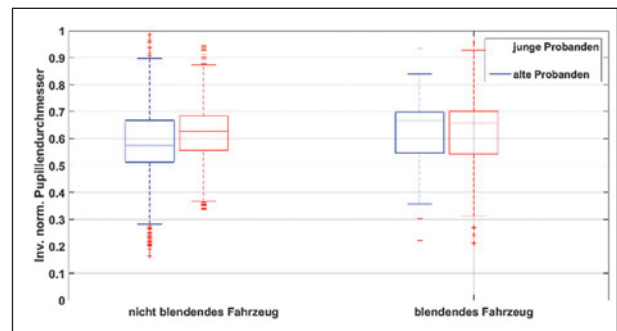


Bild 24: Vergleich des Pupillendurchmessers bei jungen und alten Probanden sowie zwischen blendenden und nicht blendenden Fahrzeugen

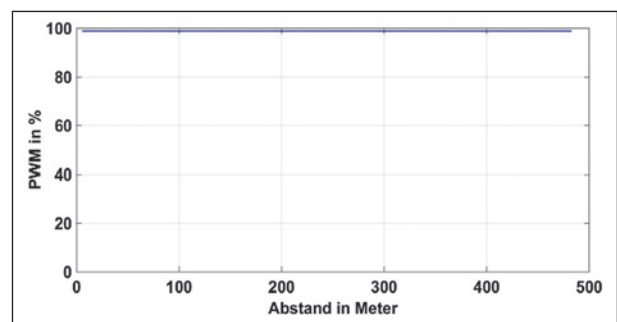


Bild 25: Die Helligkeit der LED der Kontrastbox wird durch den Probanden nicht verändert (Bedienfehler)

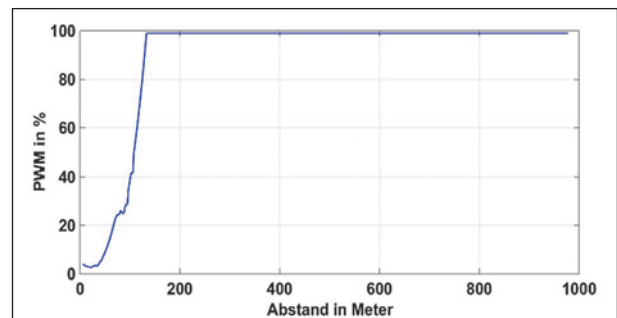


Bild 26: Beispiel der Kontrastbox-Daten

gendem Zeitpunkt einzustellen. Die LED leuchtet deshalb während des kompletten Durchlaufs mit voller Helligkeit. Von einem normalsichtigen Menschen hätte sie auf jeden Fall wahrgenommen und gedimmt werden müssen.

Ein weiteres Beispiel für einen nicht auswertbaren Datensatz ist in Bild 26 zu sehen. Hier stellt der Proband, mit näherkommendem Testfahrzeug, die Helligkeit der LED dunkler ein. Der gemessene Kontrastverlauf ist dementsprechend genau invers zu dem zu erwartenden Verlauf. Der ermittelte Kontrast ist demzufolge für geringe Beleuchtungsstärken maximal und geht gegen 0, sobald die Beleuchtungsstärke ihr Maximum erreicht.

Es stellte sich demzufolge eine hohe Unsicherheit in der Bedienung der Kontrastboxen durch die Pro-

banden ein, obwohl im Vorfeld eine ausführliche Einweisung in die Bedienung erfolgte. Da nicht mit absoluter Sicherheit zwischen relevanten und falschen Datensätzen unterschieden werden kann, wird an dieser Stelle auf eine weitere Betrachtung dieser Daten verzichtet.

4.6 Theoretische Betrachtung von Kuppen und Wannen

In den bisher beschriebenen Abschnitten wurde eine ebene Teststrecke mit Bodenwellen als Basis für die Untersuchungen verwendet. Dies wurde so gewählt, da eine ebene Strecke den einzigen Fall darstellt, an dem eine LWR effektiv arbeitet. In diesem Abschnitt soll die theoretische Relevanz von Blendungssituationen an Kuppen oder Wannen, auch in Kombination mit Kurven betrachtet werden.

Hierzu wurde in einer anderen Forschungsarbeit am Fachgebiet Lichttechnik eine statistische Auswertung zu Streckentopologien deutscher Landstraßen durchgeführt. Über ein Programm können anhand dieser Daten die Erscheinungshäufigkeiten anderer Kfz im Kamerabild des Testfahrzeugs berechnet werden (BURSASIU 2016). Dieses Programm wurde für die vorliegende Untersuchung dazu genutzt, um für verschiedene Verkehrssituationen die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, dass die Augen der Fahrer des entgegenkommenden oder vorausfahrenden Verkehrs in einem bestimmten Bereich um die HDG des Testfahrzeugs liegen.

Zunächst wird im Folgenden die verwendete Datenbasis beschrieben. Danach wird auf die Funktionsweise des Programms eingegangen. Abschließend werden die Ergebnisse in Hinblick auf einen möglichen Nutzen der dLWR diskutiert.

4.6.1 Zugrundeliegende statistische Daten

Die Daten für die statistische Auswertung der Straßentopologie deutscher Landstraßen stammen aus folgenden wissenschaftlichen Arbeiten:

- (DAMASKY 1995)
- (SCHWAB 2003)
- (TOTZAUER 2008)
- (AUSTERSCHULTE et al. 2013)
- (HUMMEL 2009)

Aus diesen Daten wurde ein Modell deutscher Landstraßen erstellt. Das Modell basiert auf einstu-

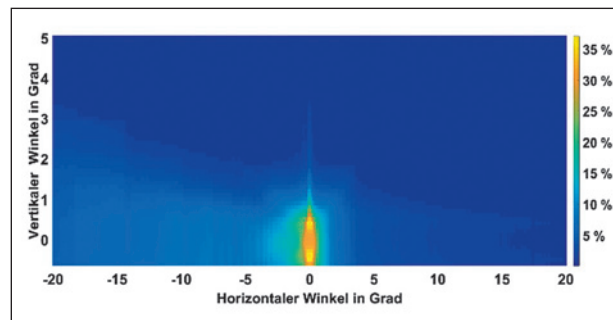


Bild 27: Erscheinungshäufigkeit von anderen Kfz in Kurven, Kuppen und Wannen (ohne Ebenen) in Prozent

rigen Straßen mit einer mittleren Spurbreite von 3,42 m. Bild 27 zeigt die hierdurch erhaltene Erscheinungshäufigkeit für vorausfahrenden und entgegenkommenden Verkehr, für Kurven, Kuppen und Wannen.

Die Erscheinungshäufigkeit in der Ebene ist hier nicht enthalten. Die hohe Erscheinungshäufigkeit im linken Teil des Bildes zeigt deutlich, dass hier Rechtsverkehr simuliert wurde. Jedes simulierte entgegenkommende Fahrzeug passiert das Testfahrzeug auf der linken Seite, unabhängig davon ob eine Links- oder eine Rechtskurve simuliert wurde. Die Erscheinungshäufigkeit ist für diese summierte Betrachtung in der Mitte des Kamerabildes am größten.

4.6.2 Funktionsweise des benutzten Analyseprogramms

Aus der gezeigten Erscheinungshäufigkeit in Bild 27 wird die theoretische Augenposition der Fahrer der jeweils beteiligten Fahrzeuge berechnet. Für das Beispiel verschiedener Wannen mit unterschiedlichen Krümmungsradien sind die Verläufe der Augenpositionen des Gegenverkehrs in Bild 27 zu sehen.

Weiterhin sind zwei horizontale Linien bei $+1,15^\circ$ sowie $-2,29^\circ$ (Referenz: $-0,57^\circ$ = geneigter Scheinwerfer) eingezeichnet. Diese Linien geben den Bereich um die HDG des Testfahrzeugs an, der der zuvor ermittelten maximalen Neigungsänderung eines Testfahrzeugs entspricht (Opel Insignia, vgl. Kapitel 4.5.1). Es wird für alle betrachteten Fälle der zeitliche Anteil gebildet, in dem die Augen der anderen Verkehrsteilnehmer in diesem Bereich liegen. Bei der Betrachtung aller einzelnen Topologie-Situationen ergeben sich die in Tabelle 4 gezeigten zeitlichen Anteile.

Zu den gezeigten Zeitanteilen liegen die Augen der anderen Verkehrsteilnehmer in dem Bereich von

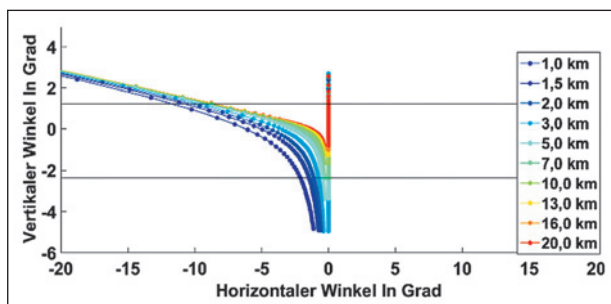


Bild 28: Augenpositionen der Fahrer des Gegenverkehrs in Wannen verschiedener Krümmungsradien in Grad

Topologie-Situation	zeitlicher Anteil in %
Gerade Kuppen	52,7
Gerade Wannen	80,7
Linkskurve mit Kuppen	42,8
Linkskurve mit Wannen	42,8
Rechtskurve mit Kuppen	70,2
Rechtskurve mit Wannen	70,1
Alle Fälle gewichtet (ohne Ebenen)	58,0
Im gesamten Straßenverkehr (inkl. Ebenen)	34,8

Tab. 4: Zeitliche Anteile der einzelnen Situationen

$\pm 1,72^\circ$ um die HDG (Referenz: 0° = nicht geneigter Scheinwerfer). Alle hier gezeigten Daten gelten für Scheinwerfer mit 0,8 m Anbauhöhe. Es ist zu sehen, dass von allen Situationen mit Wannen oder Kuppen der zeitliche Anteil, in dem die Augen anderer Verkehrsteilnehmer im beschriebenen Bereich um die HDG liegen, mit 58 % sehr hoch ist.

Selbst wenn der gesamte Straßenverkehr inklusive Ebenen betrachtet wird, ist dieser Anteil mit ca. 35 % noch sehr hoch. Es kann somit festgehalten werden, dass in diesen Situationen, die Regelung des Scheinwerfer-Nickwinkels durchaus die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer vermeiden könnte. Diese theoretische Betrachtung konnte in der Praxis nicht überprüft werden. Dies liegt an der in Kapitel 3.1 beschriebenen Funktionsweise der dLWR. Sensoren bestimmen Abstand von Karosserie zur Achse und somit zur Straße. Diese Daten werden in eine Winkeländerung zur Korrektur der Scheinwerfer umgerechnet. Fährt ein Fahrzeug auf eine Wanne oder eine Kuppe zu, so ergibt sich jedoch keine Änderung dieses Abstands. Eine dLWR, die auch in diesen Fällen reagiert, muss kamerabasiert sein. Sie muss dabei die Position anderer Verkehrsteilnehmer in Echtzeit bestimmen und die Lichtverteilung der Scheinwerfer entsprechend anpassen können. Ein solches System existiert bereits in einigen Fahrzeugen unter der Be-

zeichnung „gleitende Leuchtweite“. Diese kamera-basierten Systeme zu untersuchen und hier Anforderungen für eine sinnvolle Regelung zu definieren, erfordert jedoch weitere Untersuchungen und war nicht Teil der Aufgabenstellung dieses Projektes.

5 AP 3: Erarbeitung von Anforderungen an eine dLWR und der damit verbundenen Lichtsysteme im Hinblick auf die Verkehrssicherheit

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse aus Arbeitspaket 2 (vgl. Kapitel 4) kurz zusammengefasst, um daraus Anforderungen zur Vermeidung von Blendung für eine dLWR abzuleiten.

Die Ergebnisse der durchgeführten Feldtests haben gezeigt, dass beim Beschleunigen mit weichen Federeigenschaften (vgl. Tabelle 1) sehr hohe Nickwinkel entstehen. Die bei diesen Nickwinkeln entstehenden Beleuchtungsstärken bilden eine potenzielle Blendgefahr für vorausfahrende und entgegenkommende Fahrzeuge. Durch Beladung erhöhen sich die gemessenen Nickwinkel nochmals zusätzlich (vgl. Bild 19). Harte Fahrwerke (vgl. Tabelle 1) sind nicht in der Lage, Bodenunebenheiten auszugleichen (vgl. Bild 11). Die Fahrzeuge weisen dann kontinuierlich schnelle und kurze Änderungen des Nickwinkels (vgl. Bild 16) auf, wodurch viele mit dem Beleuchtungsstärkemesskopf nicht erfassbare Licht-Maxima entstehen, die zu einer erhöhten psychologischen Blendung führen können (vgl. Kapitel 4.5). Mittelharte Fahrwerke wie beim Audi A3 sind einerseits in der Lage die Bodenunebenheiten auszugleichen. Andererseits können wie beim Opel Insignia auch hier große Nickwinkel entstehen, die wiederum zu Blendung führen (vgl. Bild 11). Für den getesteten Insignia kann dies am Alter des Fahrzeugs und damit des Fahrwerks liegen (Baujahr 2010). Bei aktivierter dLWR werden die getesteten Fahrzeuge von den Probanden deutlich seltener als blendend empfunden (vgl. Tabelle 3). Durch Beladung wird allerdings die Fahrzeugdynamik beeinflusst (vgl. Bild 19, Tabelle 3), womit eine potenziell höhere Blendung auftritt. Ein Vergleich der DE BOER-Bewertungen aus dem am weitesten vom Beschleunigungsvorgang entfernten Messfahrzeug ID1 (vgl. Bild 7) und den Daten aus Messfahrzeug ID3 (am dichtesten am Beschleunigungsvorgang) zeigt folgende Tendenz: die Bewertung

der Blendung (Median) fällt in Messfahrzeug ID3 zwar leicht höher aus – der durchgeführte Test auf Signifikanz zeigt jedoch keine Unterschiede (vgl. Anhang 4.). Zusammengefasst kann gesagt werden, dass eine kurze Latenzzeit der dLWR, die Fahrzeugdynamikbewegungen ausgleichen kann und somit eine potenzielle Blendung verringern (vgl. Bild 22).

Anforderungen an die dLWR

Das Hervorrufen von Blendung im dynamischen Verkehr ist immer eine komplexe Verkettung von mehreren Faktoren. Die statische Härte des Fahrwerks, die Beladung, der Lichtstrom der Lichtquellen bzw. Scheinwerfer und die Lichtverteilung zählen dazu. Sie sind aber nicht alleine ausschlaggebend.

Als Fazit aus den bisher gezeigten Ergebnissen lässt sich festhalten: Für das Ziel, die Blendung durch Fahrzeugnickbewegungen auf ein Minimum zu reduzieren, wäre eine verpflichtende Einführung der dLWR für alle Fahrzeuge unumgänglich. Fahrzeuge mit lichtschwachen Scheinwerfern (z. B. der untersuchte Peugeot 208) oder geeignet ausgelegten Fahrwerken (z. B. der Audi A3) erzeugen im Test auch ohne dLWR eine näherungsweise zufriedenstellende psychologische Blendung mit einer DE BOER-Bewertung >6 (vgl. Bild 22). Sie stellen jedoch im Vergleich zu den restlichen Daten (Kombinationen aus Scheinwerfern und Fahrwerk sowie Beladungszustand) eine Ausnahme dar. Die Einführung einer verpflichtenden dLWR alleine reicht jedoch nicht aus, um Blendung konsequent zu reduzieren. In den durchgeführten Untersuchungen zeigt sich, dass die Reaktionsschnelligkeit (niedrige Latenzzeit) ein entscheidender Faktor für eine effektiv arbeitende dLWR ist. Die Untersuchung hat gezeigt, dass für eine annähernde zufriedenstellende Blendung (DE BOER-Bewertung > 6), die System-Latenzzeit unter 220 ms liegen sollte. Bei einer weniger konservativen Betrachtung der Blendung auf einem Niveau von gerade noch annehmbarer Blendung (DE BOER-Bewertung > 5) dagegen kann die System-Latenzzeit auf 350 ms angehoben werden (vgl. Bild 22). Hierbei ist zu beachten, dass dieser Latenzwert auch im beladenen Zustand nicht überschritten werden sollte. Bei den untersuchten Fahrzeugen lag die Latenzzeit hingegen im beladenen Zustand erkennbar über den Werten für den unbeladenen Zustand (vgl. Bild 21). Zusammenfassend lassen sich folgende Anforderungen definieren:

- dLWR verpflichtend für alle Fahrzeuge unabhängig von Fahrwerk und Lichtstromgrenzwerten

- durchschnittliche Latenzzeit des Gesamtsystems unter 220 ms für eine DE BOER-Bewertung > 6 (vgl. Bild 22)
- Überprüfung der Latenzzeiten unter praxisnahen Bedingungen, um die realen Fahrwerkseigenschaften zu berücksichtigen
- Einhaltung der Latenzzeit auch unter voller Beladung des Fahrzeugs

6 AP 4: Überprüfung der Scheinwerfereinstellprozesse unter Miteinbeziehung adaptiver Lichtsysteme und Tagfahrleuchten

In diesem Arbeitspaket wird der Prozess der Scheinwerfereinstellung in Fachwerkstätten überprüft. In diesem Zusammenhang sind zwei relevante Bereiche zu berücksichtigen. Einerseits sind die Geräte bzw. Prozesse der Einstellung von Bedeutung. Andererseits sind die Anforderungen bzw. Bedingungen während des Einstellprozesses zu berücksichtigen. In den folgenden Kapiteln 6.2 und 6.3 wird auf diese Aspekte näher eingegangen.

6.1 Grundlagen

Kfz-Scheinwerfer werden zum ersten Mal am Ende des Produktionsprozesses eines Fahrzeugs bei dem jeweiligen Fahrzeughersteller auf ihre Soll-Lage eingestellt. Hierbei kommen Scheinwerfereinstellsysteme zu Einsatz, die eine halb- oder vollautomatische Einstellung ermöglichen. „In Verbindung mit einem Fahrwerkgeometrieprüfstand erfolgt eine Einstellung der Scheinwerfer unter Berücksichtigung der Fahrwerkgeometriedaten [...], wobei die Analyse und Einstellung der Scheinwerfer kamera-basiert erfolgt“. (Dürr AG 2017)

In Bild 29 ist ein solches System zu sehen, dass von den Fahrzeugherstellern verwendet wird, um Scheinwerfer am Ende des Produktionsprozesses einzustellen. Während der gesamten Lebensdauer eines Kfz wird im Rahmen der periodisch technischen Fahrzeugüberwachung durchschnittlich alle zwei Jahre, bei der sogenannten Hauptuntersuchung (HU) nach § 29 StVZO, die Einstellung der Scheinwerfer überprüft. Auch in Fachwerkstätten kann dies beispielsweise während eines regulären

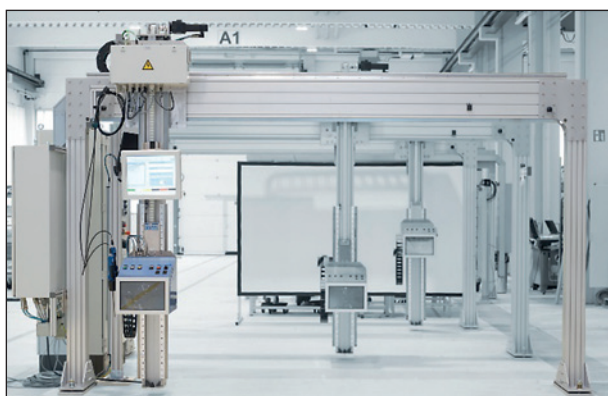


Bild 29: Scheinwerfereinstellsystem der Firma Dürr zur Kontrolle und zum Einstellen der Scheinwerfer am Bandende (Dürr AG 2019)



Bild 30: SEP der Firma Hella



Bild 31: Digitales SEP

Service oder auf Basis von freiwilligen jährlich kostenlos stattfindenden Aktionen wie dem Licht-Test (ZDK 2017) erfolgen.

Beim Überprüfen der Scheinwerfereinstellung während der HU kommen ebenso wie bei Kfz-Werkstät-

ten, Scheinwerfer-Einstellprüfgeräte (SEP) zum Einsatz. In Bild 30 ist ein solches SEP abgebildet.

Diese verfügen über eine Fresnel-Linse, mit der das Scheinwerferlicht gebündelt und entweder auf einen integrierten Messschirm (analoges SEP) oder eine CMOS Kamera (digitales SEP) projiziert wird. Bei der kamerabasierten Version wird durch geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen die Einstellung ermittelt. Anschließend werden Hinweise ausgegeben, ob und wie die Scheinwerfer justiert werden müssen (vgl. Bild 31). Bei der analogen Version des SEP befinden sich auf der Projektionsfläche spezielle Markierungen, die als Referenz zum Einstellen dienen.

Mithilfe dieser Markierungen bzw. der Anweisungen auf dem kamerabasierten Gerät, können die Scheinwerfer mit zwei Einstellschrauben justiert werden. Mit der einen Schraube wird die vertikale und der anderen die horizontale Lage der Abblendlichtverteilung verändert. Das Fernlicht kann nicht separat eingestellt werden, sondern verändert seine Lage zusammen mit der Einstellung des Abblendlichtes. Leuchten für andere Lichtfunktionen, wie z.B. Positionsleuchten und Tagfahrleuchten können generell nicht eingestellt werden. Diese sind im Allgemeinen fest mit dem Scheinwerfergehäuse und dadurch mit der Karosserie des Kfz verbunden. Das gleiche gilt auch für Adaptive Frontbeleuchtungs-Systeme (AFS) und blendfreie Fernlichtsysteme. Diese basieren in ihrer Grundeinstellung auf der Abblendlicht-Einstellung und verändern ihre Lichtverteilung während der Fahrt dann nach Bedarf. Solche Systeme bestehen aus mehreren Komponenten und Algorithmen die aufeinander abgestimmt bzw. kalibriert werden müssen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Lichtverteilung kamerabasiert verändert wird. Eine solche Kalibrierung kann wegen der Komplexität und Funktionsverschachtelung nur in einer entsprechend den Herstellervorgaben ausgestatteten Werkstatt oder Prüfeinrichtung durchgeführt werden. Aus den oben aufgeführten Gründen kann der Scheinwerfereinstellprozess in der vorliegenden Untersuchung nur auf Basis der Abblendlichtverteilung überprüft werden.

Für Fahrzeuge mit einer Höchstgeschwindigkeit ≤ 40 km/h bzw. für Fahrzeuge, deren Scheinwerfer wegen ihrer Anbauhöhe nicht mit dem SEP geprüft werden können, besteht gemäß Anlage 1 der HU-Scheinwerfer-Prüfrichtlinie vom 20.02.2014 die Möglichkeit, das Verfahren mittels Prüffläche zu

verwenden (BMVI 2014, 2017). Hierbei wird die Prüffläche seitlich so ausgerichtet, dass die Zentralmarke in der zur vertikalen Fahrzeuglängsmittelenebene parallelen Ebene liegt, die durch die Mitte des zu prüfenden Scheinwerfers geht. In Höhenrichtung ist die Prüffläche so auszurichten, dass die Trennlinie der Prüffläche (parallel zur Fahrbahn) auf Höhe $h=H-e$ ist. Beträgt der Prüfabstand E weniger als 10 m, ist das Maß e auf den Prüfabstand umzurechnen. (vgl. Bild 32). H gibt in der Gleichung die Scheinwerferanbauhöhe, bzw. den Mittelpunkt der lichtaustretenden Fläche an und e ist das Einstellmaß in cm, um das das Lichtbündel eines Scheinwerfers auf 10 m Entfernung geneigt werden soll (eine Neigung von z.B. 10 cm / 10 m entspricht 1,0 % Neigung).

Mithilfe dieser Vorgaben kann das Abblendlicht eingestellt werden, wobei die Prüfungen für jeden Scheinwerfer einzeln durchgeführt wird. Dazu müssen die anderen Scheinwerfer ggf. ausgeschaltet oder abgedeckt werden.

6.2 Überprüfung der Einstellprozesse

Im folgenden Unterkapitel wird in einem Feldversuch der Scheinwerfereinstellprozess in Werkstätten überprüft. Hierfür wird zuerst der Versuchsablauf mit den verwendeten Fahrzeugen erläutert, gefolgt von den Ergebnissen. Nachdem mehrere deutsche Automobilhersteller eine Untersuchung des Scheinwerfereinstellprozesses am Ende der Fertigungsstrecke ablehnten, wurde die Untersuchung ausschließlich in Kfz-Werkstätten durchgeführt. Von der Durchführung der Untersuchung an Prüfstellen der Technischen Prüfstellen (TP) und der amtlich anerkannten Überwachungsorganisationen wurde bewusst abgesehen, da hier lediglich eine Überprüfung, nicht jedoch eine Einstellung der Scheinwerfer stattfindet.

Versuchsablauf und verwendete Fahrzeuge

Für die Überprüfung des Scheinwerfereinstellprozesses wurden die Halogen- und Gasentladungs-Scheinwerfer von zwei Serienfahrzeugen, sowohl vertikal als auch horizontal, definiert verstellt. Eine Einstellung bzw. Verstellung der vertikalen und horizontalen Scheinwerferlage erfolgte separat. Im Anschluss wurde jedes der beiden Fahrzeuge in zehn ausgewählte Kfz-Werkstätten gebracht, um die Einstellung der Scheinwerfer zu überprüfen und bei Bedarf korrekt einzustellen. Es wird davon ausgegangen, dass die Scheinwerfer in

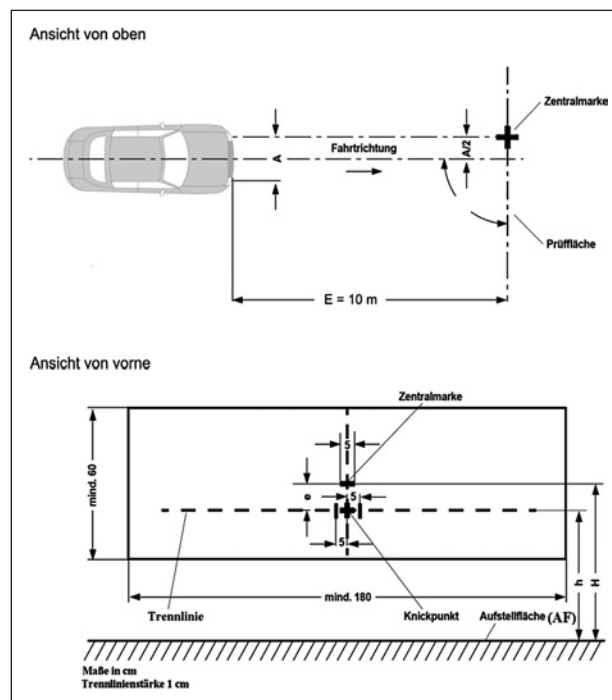


Bild 32: Überprüfung der Einstellung der Scheinwerfer mittels einer Prüffläche (BMVI 2014)

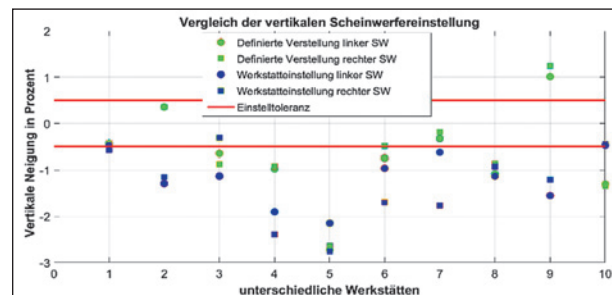


Bild 33: Vertikale Einstellung der Scheinwerfer durch die Werkstätten

den Werkstätten nach denen in Deutschland gültigen Toleranzen überprüft bzw. eingestellt werden. Nach Ende des Werkstattaufenthaltes wurde die Einstellung der Scheinwerfer erneut überprüft. Zur Überprüfung wurde die Einstellung der Scheinwerfer mittels einer Prüffläche nach Bild 32 verwendet, bei dem zusätzlich mithilfe eines Nivellierlasers die Fahrzeugneigung durch mögliche Bodenunebenheiten mitberücksichtigt wurde. Hierzu wurde über den Abstand der Auflagefläche der Reifen zum Nivellierlaser, der Fahrzeugwinkel zum Horizont bestimmt und in die Berechnung der Scheinwerfersollneigung miteinbezogen. Als Abstand zwischen Scheinwerfer und Prüffläche wurden die in Bild 32 (Ansicht von oben) gezeigten 10 m verwendet.

Ergebnisse

Nach Auswertung der Ergebnisse zeigt sich, dass weder horizontal noch vertikal signifikante Unter-

schiede in der Einstellung zwischen Halogen- und Gasentladungs-Scheinwerfern festgestellt werden können. Aus diesem Grund werden beide Gruppen zusammengefasst. Die Boxplots der Daten befindet sich in Anhang 7.

Zwischen den verschiedenen getesteten Werkstätten zeigen sich sehr große Abweichungen in der Einstellung der Scheinwerfer. Im Folgenden wird zuerst auf die vertikale und dann auf die horizontale Werkstatteinstellung eingegangen. Die roten durchgezogenen Linien in den Grafiken symbolisieren die in der HU-Scheinwerferprüfrichtlinie angegebenen Toleranzen (BMVI 2014).

In Bild 33 sind die durch die Werkstätten vorgenommenen vertikalen Einstellungen der Scheinwerfer zu sehen. Für den linken und rechten Scheinwerfer sind die absoluten Messwerte für die definierte Verstellung der Scheinwerfer vor dem Werkstattbesuch und die Werkstatteinstellung dargestellt. Die roten horizontalen Linien zeigen die Einstelltoleranzen, wobei eine vertikale Neigung von 0 % (Einstellmaß $e = 0$) den Sollwert beschreibt. Auf der Abszisse sind die untersuchten Werkstätten und deren vertikale Einstellung auf der Ordinate dargestellt.

Lediglich drei Werkstätten haben die Scheinwerfer innerhalb der vorgeschriebenen Toleranz von $\pm 0,5$ % eingestellt. Zwei Werkstätten haben mindestens einen Scheinwerfer vertikal gar nicht eingestellt und sechs Werkstätten haben die Scheinwerfer nicht parallel eingestellt. Zwei Werkstätten haben richtig eingestellte Scheinwerfer verstellt. Im Mittel wurden die Scheinwerfer um $-1,25$ % zu tief eingestellt, dies führt zu einer deutlich verringerten Sichtweite.

Je tiefer ein Scheinwerfer eingestellt wird, desto geringer ist die Reichweite und somit auch die Sichtweite des Fahrers. Zu hoch eingestellte Scheinwerfer erhöhen zwar die Sichtweite, erzeugen allerdings ein Vielfaches an höherer Blendung.

Bei einer durchschnittlichen Scheinwerferanbauhöhe von 60 cm beträgt die theoretische Reichweite etwa 25 m (mittlere vertikale Verstellung von $-1,25$ %). Dieser Reichweite entspricht einem Bremsweg aus etwa 50 km/h, eine Tatsache die auf Landstraßen bzw. Autobahnen, auf denen erheblich höhere Geschwindigkeiten gefahren werden, ein erhebliches Unfallrisiko birgt.

In Bild 34 ist die horizontale Werkstatteinstellung dargestellt. Diese ist ebenfalls unterteilt in linken

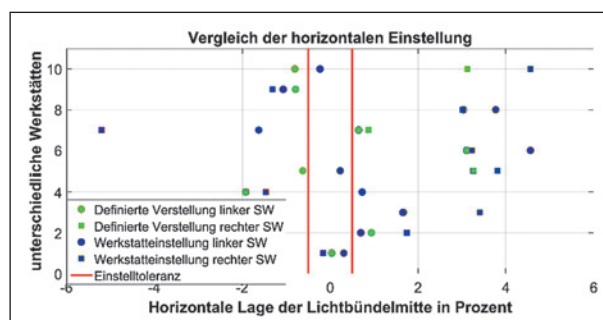


Bild 34: Horizontale Einstellung der Scheinwerfer durch die Werkstätten

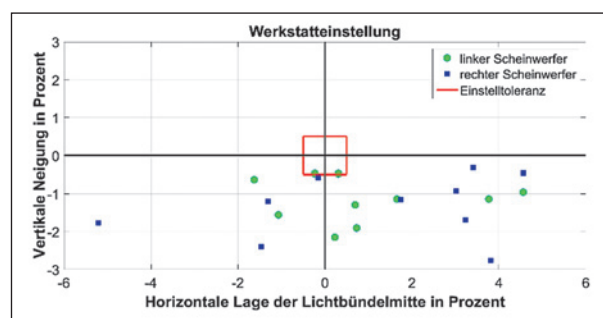


Bild 35: Horizontale und vertikale Scheinwerfereinstellung der Werkstätten

und rechten Scheinwerfer, sowie definierte Verstellung vor dem Werkstattbesuch und Werkstatteinstellung. Die roten vertikalen Linien zeigen die Einstelltoleranzen. Aus Gründen der Übersicht ist der horizontale Winkel auf der Abszisse und die untersuchten Werkstätten auf der Ordinate abgebildet. Bei der horizontalen Einstellung haben drei Werkstätten mindestens einen Scheinwerfer innerhalb der Einstelltoleranz von $\pm 0,5$ % eingestellt. Allerdings hat keine Werkstatt die Scheinwerfer parallel eingestellt.

In Bild 35 sind die Einstellungen der Werkstätten zusammengefasst, indem der vertikale und horizontale Scheinwerferneigungen in einer Abbildung dargestellt werden. Eine Abweichung von 0 cm bei einer Entfernung von 10 m (0 %) von der Zentralmarke gibt auch hier den Sollwert der Scheinwerfereinstellung an. Der grüne Kreis steht für den linken und das blaue Rechteck für den rechten Scheinwerfer. In Rot ist die horizontale und vertikale Einstelltoleranz dargestellt.

Bei Betrachtung der Abbildung fällt auf, dass kein einziger Scheinwerfer oberhalb des Horizontes eingestellt wurde. Dies deutet auf eine konservative Einstellung hin, um den Gegenverkehr nicht zu blenden. Dies verringert allerdings die Sichtweite des Fahrers. Hinsichtlich der horizontalen Einstellung, befindet sich die Mehrheit der untersuchten

Scheinwerfer außerhalb der Einstelltoleranz. Mit Werten die im Maximum näherungsweise - 6 % erreichen, sollte der horizontalen Einstellung eine größere Beachtung geschenkt werden. Zu weit nach links eingestellte Scheinwerfer blenden den Gegenverkehr potenziell mehr. Zusammengefasst wurden insgesamt drei der 20 untersuchten Scheinwerfer innerhalb der in Deutschland geltenden Einstelltoleranz eingestellt. Dies entspricht 15 % der Scheinwerfer.

Die Ergebnisse dieses Feldtests entsprechen älteren Untersuchungen des Fachgebiets. Hier hat KOSMAS die Scheinwerfer von 124 Fahrzeugen überprüft, die einen mittleren Kilometerstand von 10.500 km und im Durchschnitt 3 Monate alt waren. Lediglich 10 % der untersuchten Scheinwerfer waren sowohl vertikal als auch horizontal innerhalb der Einstelltoleranz eingestellt. Im Mittel waren die Scheinwerfer in dieser Untersuchung um -0,7 % zu tief eingestellt und verursachen somit eine um etwa 40 % geringere Sichtweite (KOSMAS UND KHANH 2015).

6.3 Bedingungen zum Einstellen von Scheinwerfern

Die UN-Regelung definiert für die Typgenehmigung bestimmte einzuhaltende Bedingungen, um Scheinwerfer korrekt einstellen zu können (UN-Regelung Nr. 48). Zu diesen Anforderungen gehören:

- ein Gewicht von 75 kg auf dem Fahrersitz,
- ein zu mindestens 90 % gefüllter Tank,
- Reifendruck nach Herstellerangaben und
- ein ebener Untergrund.

Im Rahmen von wiederkehrenden Überprüfungen der Einstellungen der Scheinwerfer (z. B. Inspektion durch eine Werkstatt oder bei der periodisch technischen Überwachung) werden national zusätzliche Anforderungen an die Aufstellfläche bzw. Fahrspuren für das Kraftfahrzeug definiert, die u. a. eine zulässige Unebenheit bei einer Länge von 2 m von 5 mm angeben. Als Längs- bzw. Querneigung der Kfz-Aufstellfläche bzw. der Fahrspuren sind max. 1,5 % zulässig. Für die SEP Aufstellfläche sind Ebenheitsabweichungen, die keine größere Neigung des SEP's als 1 mm/m verursachen, zulässig. Für die zulässigen Längs- und Querneigungen gel-



Bild 36: SEP mit nicht verwendeten Führungsschienen

ten die gleichen Anforderungen wie für die Kfz-Aufstellfläche (BMVI 2014).

In dem in Kapitel 6.2 durchgeführten Werkstatt-Test wurde augenscheinlich keine der ersten drei Bedingungen von den untersuchten Werkstätten eingehalten bzw. überprüft. Ob ein ebener Untergrund (gemäß der HU-Scheinwerfer-Prüfrichtlinie) vorlag konnte nicht verifiziert werden.

Für die horizontale Positionierung des SEP sind Führungsschienen, die gegen Beschädigung durch Überfahren geschützt sind, zu empfehlen, um eine exakte Positionierung vor dem Fahrzeug bzw. Scheinwerfer zu garantieren. Vorhandene Schienen, die nicht die Vorgaben der HU-Scheinwerfer-Prüfrichtlinie erfüllen (krumm durch hohe Belastung) können die gleichen negativen Auswirkungen wie ein schlechter Bodenbelag haben. Diese Schienen waren zwar bei allen 10 Werkstätten vorhanden, wurden aber nicht immer verwendet. In Bild 36 wird ein SEP mit zugehörigen aber nicht verwendeten Führungsschienen gezeigt.

In einer weiteren überprüften Werkstatt wurde die Einstellung der Scheinwerfer auf einer Hebebühne durchgeführt. Es handelte sich dabei um eine 2-Säulen-Hebebühne mit vier Tragarmen, die das Fahrzeug an der Fahrzeugkarosserie anhebt. Das Verwenden solcher Hebebühnen zum Einstellen der Scheinwerfer würde voraussetzen, dass die Neigung der Karosserie exakt derjenigen entspricht, die das Fahrzeug beim Stehen auf den Reifen aufweist. Eine derartige Methode ist für eine korrekte Einstellung der Scheinwerfer gänzlich ungeeignet. Während der durchgeführten Werkstatt-Tests ist zudem aufgefallen, dass die Scheinwerfereinstellung

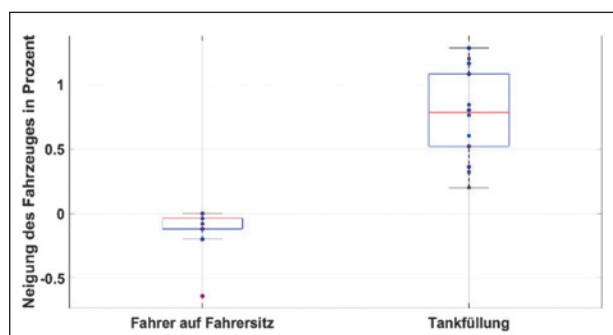


Bild 37: Einfluss des Fahrergewichtes und der Tankfüllung auf die Fahrzeugneigung

meist von Lehrlingen ausgeführt wurde. Dies könnte eine Erklärung dafür sein, dass die wesentlichen Anforderungen für die korrekte Einstellung der Scheinwerfer nicht beachtet wurden.

Einfluss auf die Einstellgenauigkeit

Im Folgenden wird der Einfluss der genannten Anforderungen auf die Einstellgenauigkeit der Scheinwerfer betrachtet. Hierfür wurden 15 Kfz aus unterschiedlichen Fahrzeugklassen bei einer Autovermietung untersucht. Das unbeladene Fahrzeug mit der aktuellen Tankfüllung wurde jeweils als Referenz definiert. Ausgehend von diesem Zustand wurde der Einfluss der drei Parameter, Fahrergewicht, Tankfüllung und Reifendruck untersucht. Um die Veränderungen messen zu können, wird mithilfe eines Nivellierlasers der vordere und hintere Abstand von der Karosserie zur Laserlinie gemessen. Dies wird nach jeder Zustandsänderung auf beiden Fahrzeugseiten wiederholt, um so die Änderung der Neigung des Fahrzeugs zu bestimmen. In Bild 37 sind in einem Boxplot die Ergebnisse für Fahrergewicht und Tankfüllung dargestellt.

Hierbei steht „Fahrer auf Fahrersitz“ für die Neigungsänderung des Fahrzeuges, die dadurch entsteht, wenn sich ein Fahrer in ein Fahrzeug setzt. „Tankfüllung“ steht für die Neigungsänderung eines leeren im Vergleich zu einem vollen Tank. Dieses Verhalten wurde durch entsprechende Zuladung im Fahrzeug simuliert. Bei der Bedingung „Fahrer auf dem Fahrersitz“ neigt sich das Fahrzeug im Mittel um -0.1% . Ein einziges Fahrzeug weist eine vergleichsweise extreme Neigungsänderung von -0.6% auf. Bei diesem Fahrzeug handelt es sich um ein Fahrzeug mit einem sehr weich ausgelegten Fahrwerk. Bei der Bedingung „Tankfüllung“ ist ein großer und signifikanter Einfluss auf die Fahrzeugneigung zu erkennen. Bei einem vollen Tank neigt sich die Karosserie im Vergleich zu einem leeren Tank im Mittel um $0,75\%$. Dies hat zur Folge, dass

eine korrekte Einstellung der Scheinwerfer bei Nichtbeachtung der richtigen Tankfüllung nicht möglich ist. Daraus ist auch die Notwendigkeit zu erkennen, dass alle Fahrzeuge eine aLWR besitzen sollten, um dieser Zuladung durch Kraftstoff oder andere transportierte Lasten entgegenzusteuern.

Bei der Bedingung „Reifendruck“ ergab sich lediglich bei dem Extremfall, dass beide Reifen einer Achse komplett ohne Luft waren, eine Neigungsänderung von 1% . Dies ist allerdings ein Extremfall bei dem das Fahrzeug auch nicht mehr fahrtüchtig wäre.

7 AP 5: Überprüfung der bestehenden Vorschriften und ggf. Erstellung eines Änderungsentwurfs zu den internationalen Bau- und Betriebsvorschriften

In diesem Arbeitspaket wird eine Zusammenfassung der für die LWR relevanten UN-Regelung und Vorschriften der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) gegeben. Die in AP 3 und AP 4 gewonnenen Erkenntnisse werden hier aufgelistet, um einen neuen Regelvorschlag bzw. Änderungsvorschlag zu erhalten.

7.1 Vorschriften und Normen

Technische und lichttechnische Anforderungen für Kfz-Scheinwerfer werden von der UN-Regelung geregelt. Diese regelt unter anderem die verwendeten Leuchtmittel, die Einstellung der Scheinwerfer sowie die Lichtverteilung. Die UN-Regelung finden aktuell in Deutschland und weiteren 56 Ländern Anwendung (UN-Regelung 2017).

In der UN-Regelung Nr. 48 werden die einheitlichen Bedingungen für die Genehmigung von bestimmten Fahrzeugen (Fahrzeugklassen M, N und O) hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen geregelt. In dieser Regelung wird auch die LWR für Abblendlicht beschrieben. Diese ist bei allen Fahrzeugen mit einer Erstzulassung ab dem 01.01.1990 vorgeschrieben. Hierbei ist darauf zu achten, dass die vertikale Neigung der HDG für definierte Beladungsbedingungen in einem

vorgegebenen Bereich liegt. Dieser Bereich ist beispielsweise für eine Scheinwerferanbauhöhe von unter 80 cm zwischen -0,5 % und -2,5 % angegeben. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, ist der Regelbereich der aLWR beladungsabhängig und reicht von „nur Fahrer auf dem Fahrersitz“ bis hin zu „alle Sitzplätze besetzt und Kofferraum bis zum Erreichen der maximalen Achslast befüllt“. Durch die Beladung des Fahrzeugs verschiebt sich die HDG nach oben und führt daher zu einem erhöhten Blendungsrisiko. Die LWR soll diesem Verhalten entgegenwirken und arbeitet, wie oben beschrieben, je nach Scheinwerferanbauhöhen in einem definierten Winkelbereich. Für „Abblendlichtscheinwerfer deren Soll-Lichtstrom 2.000 Lumen übersteigt, [...] ist eine LWR erforderlich und muss automatisch arbeiten“. In der StVZO aus dem Jahre 2016 ist eine aLWR für „Kraftfahrzeuge mit Scheinwerfern für Fern- und Abblendlicht, die mit Gasentladungslampen ausgestattet sind“ vorgeschrieben. Aktuell gibt es keine weiteren Vorschriften, sowohl in der UN-Regelung, als auch in der StVZO, die eine Verwendung der aLWR regeln. Die dLWR wird in keiner Norm erwähnt.

In der UN-Regelung Nr. 48 stehen ebenfalls die Bedingungen, die eingehalten werden müssen, um Kfz-Scheinwerfer korrekt einstellen zu können. Wie schon in Kapitel 6.3 erwähnt, handelt es sich um folgende vier Bedingungen:

- 75 kg auf dem Fahrersitz
- Kraftstoffbehälter zu mindestens 90 % gefüllt,
- Reifendruck nach Herstellerangaben,
- ebener Untergrund.

Diese Einstellbedingungen werden zusammen mit den Vorschriften für die LWR im folgenden Kapitel mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung verglichen.

7.2 Vergleich mit den aus AP 3 und AP 4 gewonnenen Aspekten

Kriterien für die Verwendung einer aLWR/dLWR

Zusammengefasst lässt sich feststellen: für die (verpflichtende) Verwendung der aLWR bestehen aktuell in Deutschland drei wesentliche Kriterien. Eine dLWR wird bislang nicht explizit mit zusätzlichen Anforderungen erwähnt. Diese Kriterien für

den Einsatz einer aLWR und damit auch einer dLWR (nach StVZO) sind:

- Regelbereich (Winkel) der LWR basierend auf der statisch maximalen Zuladung (UN-Regelung Nr. 48),
- Verwendung von Gasentladungslampen für Fern- und Abblendlicht (StVZO),
- Verwendung von Lichtquellen/LED-Modulen >2.000 lm Soll-Lichtstrom für das Hauptlichtbündel (UN-Regelung Nr. 48).

Abhängig von der Scheinwerferanbauhöhe muss die LWR die HDG in einem vertikalen Bereich von -0,5 % bis -2,5 % regeln können. Dies entspricht in Grad einen Bereich von -0,29° bis -1,49°. -0,57° entsprechen dabei einer möglichen Grundeinstellung eines Scheinwerfers für einen vorgegebenen Nickwinkel von -1 %, ausgehend von der Projektion der optischen Achse des Scheinwerfers.

Fahrzeuge mit einer Scheinwerferanbauhöhe über 1 m und Fahrzeuge der Klasse N₃G (Geländefahrzeuge mit Scheinwerferanbauhöhe >1,2 m) müssen zwischen -1 % und -3 % (bzw. zwischen -1,5 % und -3,5 %) regeln können. Da in der vorliegenden Untersuchung ausschließlich PKW mit einer Scheinwerferanbauhöhe von unter 1 m untersucht wurden, wird auf deren Regelbereich Bezug genommen. Bei Fahrzeugen mit höherer Scheinwerferanbauhöhe ist auch von einem veränderten Fahrwerk und dementsprechend einem veränderten Nickverhalten auszugehen. Daher kann hier keine Aussage getroffen werden.

In AP 3 wurde gezeigt, dass die größten Fahrzeugnickwinkel beim Beschleunigen eines Fahrzeugs entstehen. Hierbei treten beim Peugeot 208 im beladenen Zustand die maximal gemessenen Fahrzeugneigungen von ca. 1,6° auf. Diese maximale Fahrzeugneigung könnte demzufolge von einer dLWR nicht ausgeglichen werden. Allerdings wäre die dLWR in der Lage die Scheinwerferneigung soweit anzupassen, dass der Nickwinkel sich innerhalb der Einstelltoleranz befindet und dadurch eine potenzielle Blendung verringern könnte.

Die zweite bzw. dritte Anforderung, die Verwendung einer aLWR an die verwendete Lampenart bzw. den Lichtstrom zu koppeln, kann durch die vorliegende Untersuchung nicht bestätigt werden. Es hat sich gezeigt, dass ein getestetes Fahrzeug mit Halogen-Scheinwerfern ähnlich hohe Beleuchtungsstärken für den Gegenverkehr erzeugt, wie getestete

Fahrzeuge mit Gasentladungs-Scheinwerfern und deaktivierter dLWR. Eine dLWR würde die auftretende Blendung vermeiden oder zumindest deutlich reduzieren. Aus diesem Grund wird empfohlen, eine dLWR für alle Fahrzeuge unabhängig von der verwendeten Lampenart zu verwenden. Zusätzlich zu den genannten Anforderungen in AP 3, sollte der Regelbereich der dLWR auf der maximalen Fahrzeugzuladung beruhen.

Kriterien für die Scheinwerfereinstellung

Ein Fahrer mit 75 kg Körpergewicht auf dem Fahrersitz führt lediglich zu geringen Änderungen der Fahrzeugneigung (vgl. Bild 37). Als Anforderung für den Scheinwerfer-Einstellvorgang scheint dies kein zwingendes Kriterium zu sein.

Die korrekte Tankmenge sowie der richtige Reifendruck erweisen sich hingegen als Faktoren mit deutlichem Einfluss auf die Fahrzeugneigung. Auf diese Kriterien im Sinne einer Vereinfachung zu verzichten, würde zu einer falschen Einstellung der Scheinwerfer führen.

Als ein entscheidendes, bislang nicht ausreichend berücksichtigtes Kriterium hat sich bei den Werkstatt-Tests die fachliche Qualifikation des Werkstatt-Personals herausgestellt. Fehlt an dieser Stelle die notwendige Qualifikation und Sensibilisierung für die Erfordernisse des Einstellprozesses, so kann das erzielte Ergebnis nur unzufriedenstellend sein. Eine regelmäßige Qualifizierung des Personals und die strikte Einhaltung der vorgegebenen Einstellbedingungen erscheinen hier unabdingbar. Insbesondere die Positionierung bzw. Ausrichtung des SEP und der Zustand der vorhandenen Kfz-Aufstellflächen bieten viel Spielraum für Fehler. Es ist erforderlich, der Scheinwerfereinstellung den notwendigen Stellenwert zu geben.

8 Fazit

Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, dass eine dLWR in allen Fahrzeugklassen im Sinne der Blendungsvermeidung bzw. -reduzierung sinnvoll erscheint. Die Kopplung einer aLWR an den Lichtstrom von mehr als 2.000 lm, kann auf Basis der vorliegenden Daten nicht gestützt werden. Weiterhin zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung, dass insgesamt die folgenden wesentlichen Bedingungen nötig sind, um Blendung durch Kfz-Scheinwerfer zu minimieren:

1. dLWR für alle Scheinwerfersysteme
2. Regelbereich (Winkel) der dLWR an die Fahrzeugneigung bei maximaler Zuladung geknüpft
3. Mittlere Latenzzeit des Gesamtsystems im unbeladenen und beladenen Zustand unter 220 ms für eine DE BOER-Bewertung von 6 bzw. unter 350 ms für eine DE BOER-Bewertung von 6 (gerade noch annehmbare Blendung – vgl. Kapitel 4.5.2)

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass nur dann eine komplette und flächendeckende Vermeidung von Blendung zu erreichen ist, wenn ohne Ausnahme eine dLWR eingesetzt wird. Zudem wurde für jedes getestete Fahrzeug festgestellt, dass eine Änderung des Beladungszustands eine direkte Auswirkung sowohl auf die Dynamik des Fahrzeugs, als auch auf die Regeleffizienz der dLWR hat. In der Praxis sollten die geforderten Latenzzeiten der dLWR deshalb sowohl im unbeladenen, als auch im beladenen Zustand eingehalten werden.

Der Prozess der Scheinwerfereinstellung ist bereits geregelt (BMVI 2014). Die offensichtlich nicht immer ausreichende Qualifikation des Werkstatt-Personals führt in der Praxis jedoch dazu, dass die gegebenen Vorschriften kaum Anwendung finden. Wesentliche Voraussetzungen zum korrekten Einstellen von Scheinwerfern sind:

- 75 kg auf dem Fahrersitz,
- mindestens ein zu 90 % gefüllter Tank,
- ein den Herstellerangaben entsprechender Reifendruck,
- ebener Untergrund sowohl für das SEP als auch für das Fahrzeug und
- parallele Ausrichtung des SEP zum Fahrzeug.

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass lediglich das Gewicht auf dem Fahrersitz zur Vereinfachung vernachlässigt werden kann, ohne die Qualität der Scheinwerfereinstellung signifikant zu verschlechtern. Alle anderen Bedingungen müssen eingehalten werden, um Scheinwerfer innerhalb der gesetzlich festgelegten Toleranz einstellen zu können.

Literatur

- AUSTERSCHULTE, ARMIN; DREIER, BERND; ROSENHAHN, ERNST-OLAF (2013): Analysis of Safety Aspects for LED Matrix High Beam Functions. In: Tran Quoc Khanh (Hg.): Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL). International Symposium on Automotive Lighting (ISAL). Darmstadt, 23.–25. September 2013. Technische Universität Darmstadt. München: Herbert Utz Verlag GmbH (Darmstädter Lichttechnik, 15), S. 330–339.
- BÖDEKER, KATJA (2006): Die Entwicklung intuitiven physikalischen Denkens im Kulturvergleich. Münster, München [u. a.]: Waxmann (Internationale Hochschulschriften, 464).
- BORTZ, JÜRGEN (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Mit 242 Tabellen. 6., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, zuletzt geprüft am 15.08.2014.
- BORTZ, JÜRGEN; SCHUSTER, CHRISTOF (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Mit ... 163 Tabellen. 7. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer.
- BMVI (2014): Verkehrsblatt - Amtsblatt des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur der Bundesrepublik Deutschland. Richtlinie für die Überprüfung der Einstellung der Scheinwerfer von Kraftfahrzeugen bei der Hauptuntersuchung nach § 29 StVZO (HU-Scheinwerfer-Prüfrichtlinie) (5) (LA 20/7345.2/80-4), S. 174–183.
- BMVI (2017): Verkehrsblatt – Amtsblatt des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur der Bundesrepublik Deutschland. Bekanntmachung der Änderung der Richtlinie für die Überprüfung der Einstellung der Scheinwerfer von Kraftfahrzeugen bei der Hauptuntersuchung nach § 29 StVZO (HU-Scheinwerfer-Prüfrichtlinie) (2) (LA 20/7345.2/80-4), S. 52–73.
- BURSASIU, DAN (2016): Optimierung von Pixelscheinwerfergrenzen auf Basis aktueller Verkehrs- und Straßendaten. Masterarbeit. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Fachgebiet Lichttechnik.
- DAMASKY, JOACHIM (1995): Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt. Fachgebiet Lichttechnik.
- DE BOER, J. B. (1967): Visual perception in road traffic and the field of vision of the motorist. In: J. B. de Boer (Hg.): Public Lighting. London: Cleaver-Hume (Philips Technical Library), S. 11–96.
- DE BOER, J. B.; VAN HEEMSKERCK, VEECKENS J. F. T. (1955): Observations on discomfort glare in street lighting; influence of the colour of the light. CIE. Zürich.
- Dürr AG (2017): Dürr Assembly Products. Vehicle Assembly and Testing. Online verfügbar unter <http://www.durr-ap.com/index.php?id=58&L=4%27>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2017.
- FAHRMEIR, LUDWIG (2004): Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. Berlin [u. a.]: Springer (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter http://download.springer.com/static/pdf/314/bok%253A978-3-540-69739-8.pdf?auth66=1423337866_c63bc066ee4ad7531e6ad73b05ab3e14&ext=.pdf.
- FLANNAGAN, MICHAEL J.; SIVAK, MICHAEL; SCHOETTLE, BRANDON (2007): Benefits of headlamp leveling and cleaning for current U.S. low beams. Hg. v. Transportation Research Institute (UMTRI) (UMTRI-2007-46). Online verfügbar unter <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/58733/100247.pdf>, zuletzt geprüft am 10.06.2016.
- HOLLADAY, L. L. (1926): The fundamentals of glare and visibility. In: J. Opt. Soc. Am. A. 12, S. 271–319.
- HUHN, WOLFGANG (1999): Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Fachgebiet Lichttechnik.
- HUMMEL, BENJAMIN (2009): Matrix-Beam – an Adaptive Driving Beam System (ADB). In: Tran Quoc Khanh (Hg.): Proceedings of the

- 8th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL). International Symposium on Automotive Lighting (ISAL). Darmstadt, 29.-30. September 2009. Technische Universität Darmstadt. München: Herbert Utz Verlag GmbH (Darmstädter Lichttechnik, 13), S. 297–306.
- KASABA, YUSUKE (2015): An auto-leveling system using an acceleration sensor. In: Tran Quoc Khanh (Hg.): Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL). International Symposium on Automotive Lighting (ISAL). Darmstadt, 28.-30. September 2015. Technische Universität Darmstadt. München: Herbert Utz Verlag GmbH (Darmstädter Lichttechnik, 16), S. 29–37.
- KHANH, TRAN QUOC; SÖLLNER, STEFAN (2014): Lichttechnik I. Skript. TU Darmstadt, Darmstadt. Fachgebiet Lichttechnik, zuletzt geprüft am 01.12.2014.
- KOSMAS, KYRIAKOS; KHANH, TRAN QUOC (2015): Field study of headlamp alignment for avoiding glare and reaching a maximal detection distance. In: CIES (Hg.): Proceedings of the 3rd International Forum on Automotive Lighting (IFAL). International Forum on Automotive Lighting (IFAL). Kunshan, 17.-19. Juni 2015. China Illuminating Engineering Society (CIES).
- KOSMAS, KYRIAKOS; POLIN, DMITRIJ; SCHILLER, CHRISTOPH; KOBBERT, JONAS; KHANH, TRAN QUOC (2015): Comparing the glare load of low beam, high beam and glare-free high beam under different traffic conditions on the road. In: Tran Quoc Khanh (Hg.): Proceedings of the 11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL). International Symposium on Automotive Lighting (ISAL). Darmstadt, 28.-30. September 2015. Technische Universität Darmstadt. München: Herbert Utz Verlag GmbH (Darmstädter Lichttechnik, 16), S. 229–237.
- LEHNERT, PETER (2001a): Auswirkungen der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung von Scheinwerfern. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Fachgebiet Lichttechnik. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=sqUH39igX5YC>.
- LEHNERT, PETER (2001b): Disability and Discomfort Glare under dynamic Conditions. The Effect of Glare Stimuli on the Human Vision. In: Hans-Joachim Schmidt-Clausen (Hg.): Proceedings of the Symposium Progress in Automobile Lighting. International Symposium on Progress in Automobile Lighting (PAL). Darmstadt, 25.-26. September 2001. Technische Universität Darmstadt. München: Utz Verlag GmbH (Darmstädter Lichttechnik, 8 & 9), S. 582–592.
- LERMAN, SIDNEY (1980): Radiant energy and the eye. New York: Macmillan (Functional ophthalmology).
- DIN EN 12665, 2011: Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung; Deutsche Fassung EN 12665:2011.
- LOHNINGER, HANS (2017): Grundlagen der Statistik. z-Transformation. Online verfügbar unter http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/ee_ztransform.html, zuletzt aktualisiert am 09.01.2017.
- Mathworks (2017): Boxplot. Online verfügbar unter <https://de.mathworks.com/help/stats/boxplot.html?>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2017.
- PARSONS, J. HERBERT (1910): Glare, its causes and effects. In: The Lancet 175 (4508), S. 234–236. DOI: 10.1016/S0140-6736(01)14325-4.
- PERSIKE, MALTE (2012): Mathematische und statistische Methoden II. Psychologisches Institut Johannes Gutenberg Universität Mainz. Online verfügbar unter http://psymet03.sowi.uni-mainz.de/download/Lehre/SS2012/StatistikII/2012_05_29_VL.pdf, zuletzt aktualisiert am 03.08.2017, zuletzt geprüft am 03.08.2017.
- SCHENDERA, CHRISTIAN F. G (2007): Datenqualität mit SPSS. Ausreißer – Erkennen, Interpretieren und Umgehen. München [u. a.]: Oldenbourg.
- SCHMIDT-CLAUSEN, HANS-JOACHIM; BINDELS, JOHANNES TH. H. (1971): Die Schwellenleuchtdichteerhöhung als Blendungsbewertungskriterium. I. Untersuchungen über den

Einfluß der Blendbeleuchtungsstärke und des Blendwinkels auf die Schwellenleuchtdichte. In: *Lichttechnik* 23 (10), S. 547–552.

SCHWAB, GABRIEL (2003): Untersuchungen zur Ansteuerung adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfer. Zugl.: Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2003. Osnabrück: Der Andere Verl. (Publikationsreihe des Fachgebiets Lichttechnik in Ilmenau, 5).

SPRUTE, JAN HOLGER (2012): Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Fachgebiet Lichttechnik.

Statista (2017): Automodelle mit den meisten Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2016. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/3149/umfrage/automodelle-mit-den-meisten-neuzulassungen-in-deutschland/>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2017.

TOTZAUER, ALEXANDER (2008): Erarbeitung einer effizienten Fernlichtunterteilung. Studienarbeit. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Fachgebiet Lichttechnik.

UN-Regelung Nr. 37, 10.06.2014: Uniform provisions concerning the approval of filament lamps for use in approved lamp units of power-driven vehicles and of their trailers.

UN-Regelung Nr. 99, 10.06.2014: Uniform provisions concerning the approval of gas-discharge light sources for use in approved gas-discharge lamp units of power-driven vehicles.

UN-Regelung Nr. 48, 30.09.2016: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices [2016/1723].

UN-Regelung (2017): Mission. Online verfügbar unter www.unece.org/mission.

WÖRDENWEBER, BURKARD (2007): Automotive lighting and human vision. Berlin, New York: Springer. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/185022114>.

ZDK (2017): Licht-Test 2017. Hg. v. Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe e. V. Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe e. V. Online verfügbar unter <http://www.licht->

test.de/, zuletzt aktualisiert am 23.04.2018, zuletzt geprüft am 23.04.2018.

ZYDEK, BASTIAN WALTER (2014): Blendungsbeurteilung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Fachgebiet Lichttechnik, zuletzt geprüft am 04.08.2014.

ZYDEK, BASTIAN WALTER; HAFERKEMPER, NILS; KHANH, TRAN QUOC (2013): Klettwitz Levelling Test: Analysis of Photometric Data and Comprehension. In: Tran Quoc Khanh (Hg.): Proceedings of the 10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL). International Symposium on Automotive Lighting (ISAL). Darmstadt, 23.-25. September 2013. Technische Universität Darmstadt. München: Herbert Utz Verlag GmbH (Darmstädter Lichttechnik, 15), S. 110–115.

Bilder

- Bild 1: Verwendete Bewertungsskala nach DE BOER
- Bild 2: Positionierung der verwendeten Sensoren am Fahrzeug
- Bild 3: Messtechnik zur Bestimmung der Fahrzeugneigung
- Bild 4: Aufnahme des dynamischen Schwellenkontrastes während eines Durchlaufs (nach (ZYDEK 2014))
- Bild 5: Statische Klassifizierung der Federhärte der Fahrwerke
- Bild 6: Vorfeld-Leuchtdichte der verwendeten Fahrzeuge
- Bild 7: Versuchsaufbau auf dem August-Euler-Flugplatz
- Bild 8: Eingesetzte Messtechnik im Messfahrzeug: A: Blendungsknopf, B: Kontrastbox, C: Beleuchtungsstärkemesskopf und D: Eye-Tracker
- Bild 9: DE BOER-Bewertung über der Belichtung für alle 18 Fahrzeugkombinationen
- Bild 10: Verhältnis zwischen Maximum und Mittelwert der Beleuchtungsstärke
- Bild 11: Verteilung der Fahrzeug-Neigungswinkel

- bei konstanter Fahrt für alle 5 Fahrzeuge; Hilfslinien bei $0^\circ / 0,57^\circ$
- Bild 12: Beleuchtungsstärkeverlauf des Peugeot 208
- Bild 13: Beleuchtungsstärkeverlauf des Insignia mit Gasentladungs-Scheinwerfern über den Abstand für dLWR an/aus und unbeladen/beladen)
- Bild 14: Beleuchtungsstärkeverlauf des Insignia mit Halogen- und Gasentladungs-Scheinwerfern über den Abstand im unbeladenen/beladenen Zustand
- Bild 15: Beleuchtungsstärkeverlauf vom Audi S3 über den Abstand für dLWR aus/an sowie den Beladungszustand leer/voll
- Bild 16: Vergleich der Neigungsdaten der Karosserie bei konstanter Fahrt über den Abstand für Audi A3 und S3; Auflösung: 255 Hz (vgl. Kapitel 4.1.1)
- Bild 17: Beleuchtungsstärkeverlauf des VW Polo über den Abstand für beladen/unbeladen
- Bild 18: Verhältnis von dynamischer zu quasistatischer Belichtung für alle 18 Fahrzeugkombinationen
- Bild 19: Verteilung der Fahrzeug-Neigungswinkel beim Beschleunigungsvorgang für alle 5 Fahrzeuge
- Bild 20: Neigungsdaten für Scheinwerfer und Karosserie des Opel Insignia mit Gasentladungs-Scheinwerfern beim Beschleunigungsvorgang
- Bild 21: Darstellung der Latenzzeiten der dLWR für alle Fahrzeuge mit Gasentladungs-Scheinwerfern
- Bild 22: Korrelation von Latenzzeit und DE BOER-Bewertung
- Bild 23: Vergleich von Beleuchtungsstärke und invers. Pupillendurchmesser (Opel Insignia Hal. unbeladen)
- Bild 24: Vergleich des Pupillendurchmessers bei jungen und alten Probanden sowie zwischen blendenden und nicht blendenden Fahrzeugen
- Bild 25: Die Helligkeit der LED der Kontrastbox wird durch den Probanden nicht verändert (Bedienfehler)
- Bild 26: Beispiel der Kontrastbox-Daten
- Bild 27: Erscheinungshäufigkeit von anderen Kfz in Kurven, Kuppen und Wannen (ohne Ebenen) in Prozent
- Bild 28: Augenpositionen der Fahrer des Gegenverkehrs in Wannen verschiedener Krümmungsradien in Grad
- Bild 29: Scheinwerfereinstellsystem der Firma Dürr zur Kontrolle und zum Einstellen der Scheinwerfer am Bandende (Dürr AG 2019)
- Bild 30: SEP der Firma Hella
- Bild 31: Digitales SEP
- Bild 32: Überprüfung der Einstellung der Scheinwerfer mittels einer Prüffläche (BMVI 2014)
- Bild 33: Vertikale Einstellung der Scheinwerfer durch die Werkstätten
- Bild 34: Horizontale Einstellung der Scheinwerfer durch die Werkstätten
- Bild 35: Horizontale und vertikale Scheinwerfereinstellung der Werkstätten
- Bild 36: SEP mit nicht verwendeten Führungsschienen
- Bild 37: Einfluss des Fahrergewichtes und der Tankfüllung auf die Fahrzeugneigung

Tabellen

- Tab. 1: Übersicht der getesteten Fahrzeuge, deren Lichtquellen, Fahrwerkseigenschaften und LWR
- Tab. 2: Untersuchte Parameter in den Testfahrzeugen
- Tab. 3: Gruppierung der Fahrzeuge (18 Fahrzeugkombinationen) nach DE BOER-Bewertung (An / Aus = Zustand der dLWR; Voll / Leer = Zustand der Fahrzeugbeladung)
- Tab. 4: Zeitliche Anteile der einzelnen Situationen

Anhang

A.1 Statistische Tests

„Ein statistischer Test ist eine Regel, die es erlaubt, für jedes Stichprobenergebnis eine Entscheidung zwischen der Null- und der Alternativhypothese zu treffen“ (BORTZ UND SCHUSTER 2010). Ziel ist es zu entscheiden, ob das für die gezogene Stichprobe beobachtete Verhalten auch für die Grundgesamtheit gilt. Die interessierende Forschungshypothese wird dabei als statistische Alternativhypothese (kurz: Alternative, H_1) über den entsprechenden Parameter formuliert. Diese muss sich gegen die Nullhypothese (kurz: Hypothese, H_0) durchsetzen. Anhand einer Prüfgröße entscheidet man über die Ablehnung der Nullhypothese zugunsten der Alternative (FAHRMEIR 2004). „Die Nullhypothese ist eine Negativhypothese, mit der behauptet wird, dass die zur Alternativhypothese komplementäre Aussage richtig sei. [...] Bei ungerichteten Alternativhypothesen (zwischen den beiden Merkmalen besteht ein Zusammenhang) lautet die Nullhypothese: Zwischen den beiden Merkmalen besteht kein Zusammenhang. [...]. Die Prüfung der statistischen Alternativhypothese läuft nun darauf hinaus zu zeigen, dass die Nullhypothese vermutlich nicht richtig ist, um dann im Umkehrschluss auf die Richtigkeit der statistischen Alternativhypothese zu schließen. Nur wenn die Realität praktisch nicht mit der Nullhypothese zu erklären ist, darf sie zugunsten der neuen Alternativhypothese verworfen werden.“ (BORTZ 2005).

Bei einer vorab definierten Irrtumswahrscheinlichkeit – üblicherweise $\alpha=5\%$ – wird die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese verworfen, wenn die Prüfgröße $p < 0,05$ ist.

A.2 Statistik: Standardisierung (z-Transformation)

„Gelegentlich steht man vor der Aufgabe, den Testwert einer Person mit den Testwerten anderer Personen in Beziehung zu setzen, um zu beurteilen, ob es sich bei diesem Wert um einen „hohen“ bzw. „niedrigen“ Wert handelt. Im Alltag verwenden wir oft den Mittelwert als Referenzpunkt und bezeichnen einen Wert als über- oder unterdurchschnittlich. [...]. Allerdings wird häufig ein anderes Vorgehen gewählt, das den Mittelwert sowie die Standardab-

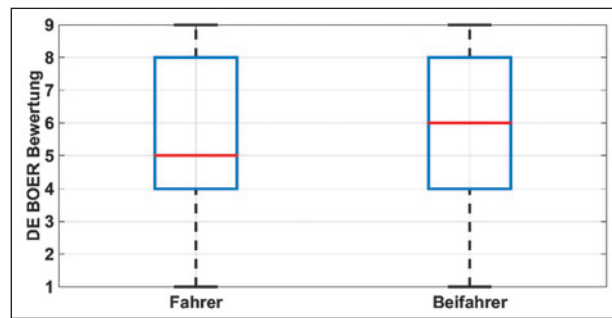


Bild A-1: Boxplot aller DE BOER-Bewertungen für Fahrer- und Beifahrerposition des Messfahrzeugs ID1

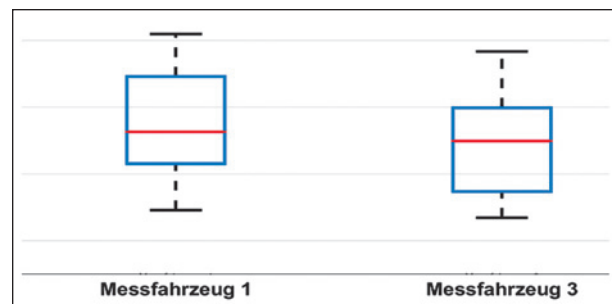


Bild A-2: Boxplots der DE BOER-Bewertung von Messfahrzeug ID1 und ID3 für alle Probanden

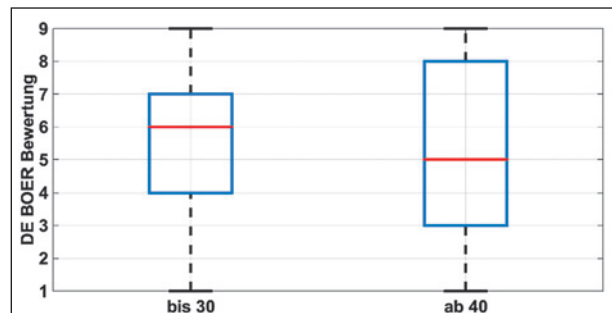


Bild A-3: DE BOER-Bewertung für die gewählten Altersgruppen (Fahrer- und Beifahrerposition für die Messfahrzeuge ID1-ID3 zusammengefasst)

weichung der Stichprobe verwendet, um den Testwert zu transformieren. Es handelt sich dabei um die z-Transformation“. (BORTZ UND SCHUSTER 2010)

Beim Vergleich von mehreren Standardabweichungen miteinander muss immer der Mittelwert einbezogen werden. Dieser ist bei verschiedenen Standardabweichungen jedoch nur im Ausnahmefall identisch, so dass ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Zwei identische Standardabweichungen können auch bei verschiedenen Mittelwerten miteinander verglichen werden, wenn die Daten zuvor einer z-Transformation unterzogen wurden (SCHENDERA 2007). „Durch die z-Transformation können sämtliche Normalverteilungen standardisiert werden, d. h. auf einen Standard gebracht werden“ (BORTZ 2005). Messdaten mit beliebigem Mit-

telwert und Standardabweichung können somit in Daten transformiert werden, die einen definierten Mittelwert und Standardabweichung aufweisen (PERSIKE 2012). „Eine z-transformierte Verteilung hat einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung von 1,0. Beliebige Normalverteilungen werden durch die z-Transformation in die Standardnormalverteilung überführt (BORTZ UND SCHUSTER 2010).

A.3 Vergleich der DE BOER-Bewertungen der Probanden nach Sitzposition

Bild A-1 zeigt die DEBOER-Bewertungen der getesteten Probanden für Fahrer und Beifahrer. Der Boxplot zeigt die exemplarische Verteilung für ID1. Für die anderen Messfahrzeuge (ID2 und ID3) ergibt sich eine ähnliche Verteilung. Die Überprüfung der Bewertungen mittels eines nichtparametrischen Rangsummentests auf Signifikanz ergibt, dass die Bewertungen der Probanden für Fahrer- und Beifahrersitz für die Messfahrzeuge ID1 ($p = 0,113$), ID2 ($p = 0,461$) und ID3 ($p = 0,217$) jeweils zusammengefasst werden dürfen.

A.4 Vergleich der DE BOER-Bewertungen der Messfahrzeuge ID1, ID2 und ID3

Bild A-2 zeigt exemplarisch den Vergleich der Boxplots von ID1 und ID3. Bei einem Vergleich der DE BOER-Bewertungen, aufgeteilt nach den Messfahrzeugen ID1, ID2 und ID3, können keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden ($p = 0,704$).

Somit können alle Bewertungen zusammengefasst werden.

A.5 Vergleich der DE BOER-Bewertungen der Probanden nach Alter

Bild A-3 zeigt in einem Boxplot die DE BOER-Bewertungen der gewählten Altersgruppen für die Probanden auf Fahrer- und Beifahrerposition (vgl. Anhang 1) und alle Messfahrzeuge (vgl. Anhang 4). Statistisch kann jedoch kein signifikanter Unterschied in der Bewertung der Blendung beider Gruppen festgestellt werden ($p = 0,100$).

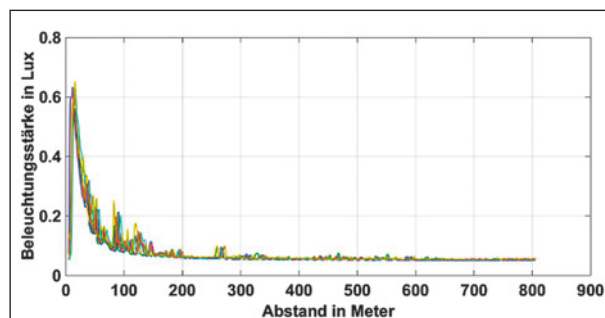


Bild A-4: Beleuchtungsstärke über den Abstand von allen 24 Fahrten an den 8 unterschiedlichen Test-Tagen

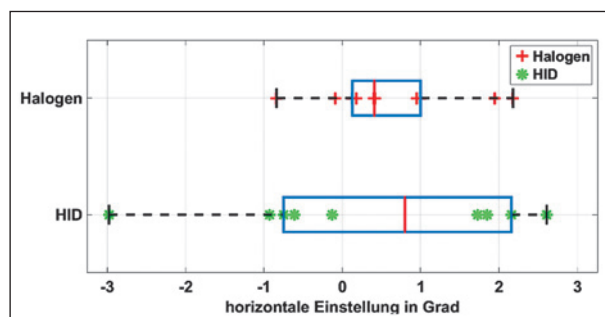


Bild A-5: Horizontale Einstellung aller Scheinwerfer in den Kfz-Werkstätten

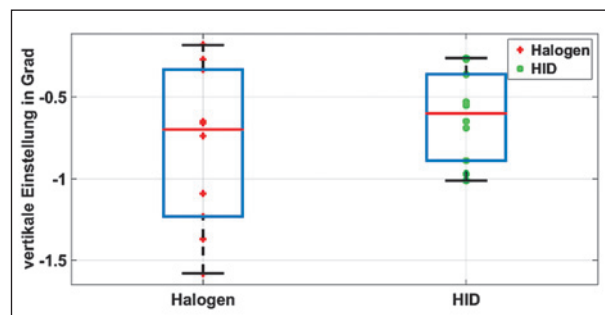


Bild A-6: Vertikale Einstellung aller Scheinwerfer in den Kfz-Werkstätten

A.6 Reproduzierbarkeit der photometrischen Messungen

Jeder Durchlauf wurde an einem Abend drei Mal wiederholt. Hierbei waren die Einstellungen beim Testfahrzeug stets identisch. Da die gesamte Untersuchung an acht Abenden stattgefunden hat und jeder Durchlauf drei Mal wiederholt wurde, ergeben sich $n=3 \cdot 8=24$ Fahrten. In Bild A-4 wird die Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit vom Abstand für alle 24 Fahrten in einer Grafik gezeigt.

Die Beleuchtungsstärke weist bei allen Fahrten eine maximale Differenz von 0,15 lx und eine Standardabweichung von 0,1 lx auf. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrten an den unterschiedlichen Tagen miteinander vergleichbar sind und dass die Messungen reproduzierbar und wiederholbar sind.

A.7 Vergleich der Werkstatteinstellung zwischen Halogen- und Gasentladungsscheinwerfern

Bild A-5 und Bild A-6 zeigen die vertikale und horizontale Einstellung der Halogen- und Gasentladungsscheinwerfer in den 10 ausgewählten Kfz-Werkstätten.

Zur Verdeutlichung ist der Boxplot für die horizontale Einstellung um 90° gedreht und somit ebenfalls horizontal dargestellt. Trotz der Abweichung zwischen den Einstellungen von Halogen- und Gasentladungsscheinwerfern, besteht kein signifikanter Unterschied für die beiden Lichtquellen.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2012

F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe Gasser, Arzt, Ayoubi, Bartels, Bürkle, Eier, Flemisch, Häcker, Hesse, Huber, Lotz, Maurer, Ruth-Schumacher, Schwarz, Vogt € 19,50

F 84: Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen – Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendwarnungen Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks, Mühlbacher € 17,00

F 85: Cooperative Systems Stakeholder Analysis Schindhelm, Calderaro, Udin, Larsson, Kernstock, Jandrisits, Ricci, Geißler, Herb, Vierkötter € 15,50

2013

F 86: Experimentelle Untersuchung zur Unterstützung der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für ältere Kraftfahrer Hoffmann, Wipking, Blanke, Falkenstein € 16,50

F 87: 5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 88: Comparative tests with laminated safety glass panes and polycarbonate panes Gehring, Zander € 14,00

F 89: Erfassung der Fahrermüdigkeit Platho, Pietrek, Kolrep € 16,50

F 90: Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit Nuß, Eckstein, Berger € 17,90

F 91: Standardisierungsprozess für offene Systeme der Straßenverkehrsstelematik Kroen € 17,00

F 92: Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung Beyer, Blumenschein, Bönninger, Grohmann, Lehmann, Meißner, Paulan, Richter, Stiller, Calker € 17,00

2014

F 93: Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung beim Motorradfahren Buld, Will, Kaussner, Krüger € 17,50

F 94: Biokraftstoffe – Fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen Pellmann, Schmidt, Eckhardt, Wagner € 19,50

F 95: Taxonomie von Fehlhandlungen bei der Fahrzeugführung Oehme, Kolrep, Person, Byl € 16,50

F 96: Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von Pkw Schönemann, Henze € 15,50

F 97: Matrix von Lösungsvarianten Intelligenter Verkehrssysteme (IVS) im Straßenverkehr Matrix of alternative implementation approaches of Intelligent Transport Systems (ITS) in road traffic Lotz, Herb, Schindhelm, Vierkötter Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 98: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung Weitzel, Winner, Peng, Geyer, Lotz Sefati € 16,50

F 99: Study on smoke production, development and toxicity in bus fires Hofmann, Dülsen € 16,50

2015

F 100: Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver Powelleit, Muhrer, Vollrath, Henze, Liesner, Pawellek € 17,50

F 101: Altersabhängige Anpassung von Menschmodellen für die passive Fahrzeugsicherheit Wagner, Segura, Mühlbauer, Fuchs, Peldschus, Freßmann € 19,00

F 102: 6th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 103: Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen Süßmann, Lienkamp Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 104: Abbiege-Assistenzsystem für Lkw – Grundlagen eine Testverfahrens Schreck, Seiniger € 14,50

F 105: Abgasverhalten von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Feldüberwachung Schmidt, Georges € 14,50

F 105b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – In-service conformity Schmidt, Johannsen Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 106: Untersuchung des Abgasverhaltens von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Austauschкатаlysatoren Schmidt, Johannsen € 13,50

F 106b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – Replacement catalytic converters Schmidt, Johannsen Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 107: Sicherheitsaspekte beim Laden von Elektrofahrzeugen Vogt, Link, Ritzinger, Ablingyte, Reindl € 16,50

F 108: Interoperabilität zwischen öffentlichem Verkehrsmanagement und individuellen Navigationsdiensten – Maßnahmen zur Gewährleistung von der Ruhren, Kirschfink, Ansoerge, Reusswig, Riegelhuth, Karina-Wedrich, Schopf, Sparmann, Wöbbeking, Kannenberg € 17,50

F 109: Ermittlung des Umfangs von Abweichungen bei Durchführung der Abgasuntersuchung zwischen Messung am Auspuff und Abfrage des On-Board-Diagnosesystems
Schröder, Steickert, Walther, Ranftl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 110: Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen
Altinsoy, Landgraf, Rosenkranz, Lachmann, Hagen, Schulze, Schlag
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 111: Geräuschminderung von Dünnschichtbelägen
Schulze, Kluth, Ruhnau, Hübelt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

F 112: Ersatz von Außenspiegeln durch Kamera-Monitor-Systeme bei Pkw und Lkw
Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens € 17,50

F 112b: Final Report Camera-Monitor-Systems as a Replacement for Exterior Mirrors in Cars and Trucks
Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 113: Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe
Bergk, Heidt, Knörr, Keller € 15,50

F 114: Barrierefreiheit bei Fernlinienbussen
Oehme, Berberich, Maier, Böhm € 17,50

F 115: Statischer und dynamischer Fahr Simulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit
Frey
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

F 116: Lang-Lkw – Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt
Süßmann, Förg, Wenzelis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 117: 7th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference 2016 at Hannover Medical School
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 118: Bedeutung kompensativer Fahrerstrategien im Kontext automatisierter Fahrfunktionen
Voß, Schwalm € 16,50

F 119: Fahrzeugtechnische Eigenschaften von Lang-Lkw
Förg, Süßmann, Wenzelis, Schmeiler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 120: Emissionen von über 30 Jahre alten Fahrzeugen
Steven, Schulte, Hammer, Lessmann, Pomsel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 121: Laufleistungsabhängige Veränderungen der CO₂-Emissionen von neuen Pkw
Pellmann, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

F 122: Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge – Bedarfsanalyse auf Basis einer Vorstudie
Auf der Maur, Strassburg, Knörr, Heidt, Wuethrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 123: Motorradsschutzhelme – Identifizierung ihres Verbesserungspotenzials unter Berücksichtigung des Motorradunfallgeschehens
Pollak, Schueler, Bourdet, Deck, Willinger € 19,50

F 124: Aufbau eines Qualitätsmanagementsystems für die Erfassung und Weiterverarbeitung von Daten für IVS-Dienste
Heinrich, Pollesch, Schober, Stamatakis, Grzebellus, Radike, Schneider, Stapelfeld, Huber
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 125: Untersuchung zu Elektrokleinstfahrzeugen
Bierbach, Adolph, Frey, Kollmus, Bartels, Hoffmann, Halbach € 19,50

2019

F 126: Einfluss zunehmender Fahrzeugautomatisierung auf Fahrkompetenz und Fahrkompetenzerwerb
Weißgerber, Grattenthaler, Hoffmann € 15,50

F 127: Erhöhung der Verkehrssicherheit älterer Kraftfahrer durch Verbesserung ihrer visuellen Aufmerksamkeit mittels „Sehfeldassistent“
Kupschick, Bürglen, Jürgensohn € 16,50

F 128: Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung
Rösener, Sauerbier, Zlocki, Eckstein, Hennecke, Kemper, Oeser
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 129: Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer
Kosmas, Kobbert, Khanh € 15,50

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.