

Lichttechnische Untersuchung bei Fahrzeugen mit adaptiven Lichtsystemen Teil 2

Von Verena Brei, Tim Hoger, Martin Schachner, Hermann Steffan *

Lichttechnische Untersuchungen (LTU) werden benötigt, um die Erkennbarkeitsentfernungen bei Unfällen in der Dunkelheit zu bestimmen. Diese Untersuchungen werden bislang ausschließlich statisch vorgenommen. Da neuere Scheinwerfersysteme die Ausleuchtung dynamisch an die Fahrsituation anpassen können, ist eine statische Untersuchung gegebenenfalls nicht mehr zielführend. Es wird somit eine Methode benötigt, mit deren Hilfe eine lichttechnische Untersuchung mit adaptiv angepasstem Licht ermöglicht wird. Eine solche Methode wurde von der Autorin im Rahmen ihrer Masterarbeit im Studiengang „Traffic Accident Research“ an der TU Graz sowie in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Schimmelpfennig+Becke entwickelt.

Bisher wird eine LTU üblicherweise mit einer kalibrierten Kamera im Stand durchgeführt, um einerseits die bei Dunkelheit benötigten langen Belichtungszeiten gewährleisten und andererseits eine genaue Positionierung des Fahrzeugs zum Fußgänger erreichen zu können. Der Lösungsansatz ist ein dynamischer Versuchsaufbau. Zur Validierung werden die Ergebnisse aus der statischen und dynamischen Untersuchung einander gegenübergestellt.

Nachdem in Teil 1 die Grundlagen der statischen LTU behandelt wurden, wird in Teil 2 auf die Methodik zur Durchführung einer dynamischen LTU und deren Ergebnisse am Beispiel von zwei Versuchsfahrzeugen eingegangen.

5 Dynamische Lichttechnische Untersuchung

5.1 Relevante Eigenschaften der Versuchsfahrzeuge

5.1.1 Funktionstests des adaptiven Fernlichts am VW

Um festzustellen, inwieweit eine LTU mit Fahrzeugen mit adaptiven Lichtsystemen überhaupt möglich ist, muss zunächst die Funktionsweise des adaptiven Lichts untersucht werden. Hierbei ist die Abhängigkeit des Schaltzustandes des Lichts von der Fahrzeuggeschwindigkeit von besonderer Bedeutung. Dazu wurden zunächst Testfahrten mit einem VW Touareg (im Weiteren als VW bezeichnet) mit adaptivem Xenon-Scheinwerfersystem für zwei relevante Unfallszenarien durchgeführt.

In der ersten Situation wurde ein Fußgänger am Fahrbahnrand plat-

ziert und ein weiteres Fahrzeug mit eingeschalteten Scheinwerfern im Gegenverkehr. Die Annäherung erfolgte mit adaptivem Fernlicht. Ist das Licht des Fahrzeugs im Gegenverkehr nicht eingeschaltet, erkennt das System das Fahrzeug nicht, wie die zweite Versuchsreihe zeigte. Nach den Versuchen ließ sich resümieren, dass durch den VW nur eine Teilausblendung des Fernlichtes aufgrund des Gegenverkehrs erfolgte.

Ohne eingeschaltetes Licht des Fahrzeugs im Gegenverkehr entspricht die Situation in etwa der Ausleuchtung mit dem Fernlicht, sodass bei vergleichbaren Unfallsituationen eine statische LTU mit Fernlicht durchgeführt werden kann. Dies gilt jedoch nur, solange das Fernlicht nicht adaptiv angepasst wird, also zum Beispiel durch eine geschwin-

digkeitsabhängige Veränderung der Ausleuchtung.

Bei adaptiven Lichtsystemen kommt es zum eigenständigen Aufblenden des Fahrzeugs von Abblendlicht auf Fernlicht ab einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich. Die untere Geschwindigkeitsschwelle hat sich bei den Tests als zu hoch erwiesen, um das Fahrzeug bei einer dynamischen LTU einerseits sicher einsetzen zu können und gleichzeitig Lichtbilder mit guter Qualität aus dem fahrenden Fahrzeug aufnehmen zu können. Daher wurde zusätzlich untersucht, ab welcher Geschwindigkeit das adaptive Licht wieder abblendet und ob sich diese Geschwindigkeit für eine LTU eignet.

Der Abgleich der Tacho- und GPS-Geschwindigkeiten erwies sich hierbei als hilfreich, um die genauen Geschwindigkeitsschwellen zu ermitteln und um den Abstand der Fahrzeugpositionen zwischen den aufgenommenen Bildern und relativ in der Örtlichkeit zu ermitteln.

5.1.2 Dokumentation der Änderung der Lichtverteilung

Um die Veränderung der Lichtverteilung bei einem adaptiven Lichtsystem während der Fahrt von außen sichtbar zu machen, wurden zwei Plexiglasscheiben an einem Stativ befestigt und auf der Motorhaube vor dem rechten Scheinwerfer des VW mithilfe eines Fahrradträgers montiert.

Als Leinwand wurde ein Karton verwendet, der sich im Fahrzeug vor dem Beifahrersitz befand. Eine Lenkraddrehung im Stand führte zu keiner Änderung des Scheinwerferprofils, da hierdurch nur das Kurvenlicht in Form der jeweiligen Nebelscheinwerfer aktiviert wurde. **BILD 14** zeigt den ferti-

gen Halter und die erste Montage am Fahrzeug.

Der Test des Aufbaus fand bei Dunkelheit statt. Der VW wurde auf über 60 km/h beschleunigt (untere Schaltschwelle des adaptiven Fernlichts) und anschließend mit konstanter Geschwindigkeit gefahren.

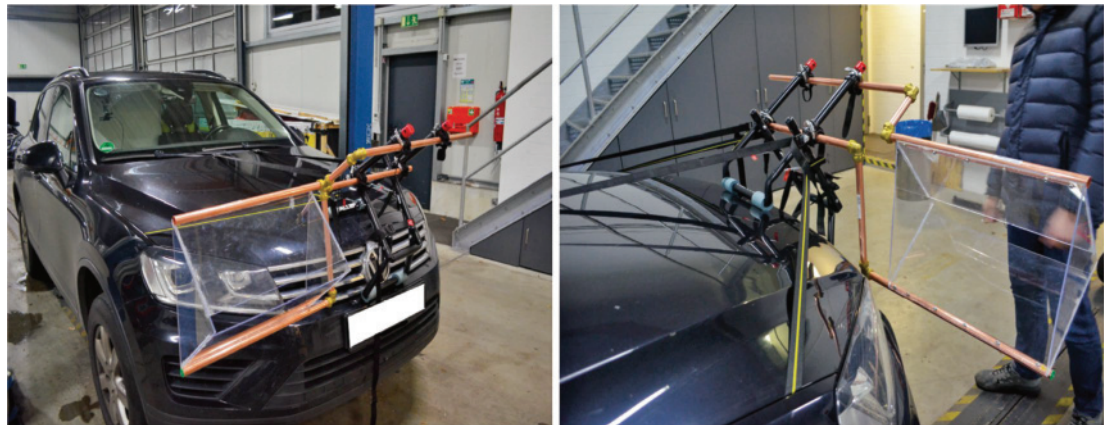
Zur Dokumentation der Lichtverteilung wurde die Leinwand im Fahrzeug

mit einer Dashcam gefilmt. **BILD 15** zeigt exemplarisch Einzelbilder aus dem aufgenommenen Video. Bild 15c zeigt die Standard-Lichtverteilung bei adaptivem, aktiviertem Fernlicht. Aufgrund des sich nähernden Gegenverkehrs (Bild 15b) und Vermeidung von Blendung wurde der rechte Bereich des Fernlichts automatisch abgeblendet (Bild 15d).

5.1.3 Tachoabgleich über GPS

Zur Ermittlung der Abweichung zwischen der über den Tacho angezeigten und der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit wurde das Testfahrzeug mit zwei zeitsynchronen Dashcams mit GPS-Signal sowie einer Digitalkamera für die Aufnahmen des Sichteindrucks ausgestattet. Eine Dashcam zeichnete die Umgebung in

BILD 14: Aufbau zur Dokumentation der Lichtverteilung am VW
FIGURE 14: Set-up for documenting the light distribution on the VW



(a) Fernlicht



(b) Fernlicht Gegenverkehr ausgeblendet

BILD 15: Dokumentation der Lichtverteilung während des Fahrbetriebs mit Gegenverkehr

FIGURE 15: Documentation of the light distribution while driving with oncoming traffic



(c) Fernlicht



(d) Gegenverkehr ausgeblendet



BILD 16: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Geschwindigkeitsschwelle beim Mercedes
FIGURE 16: Test setup for determining the speed threshold on the Mercedes

Fahrtrichtung auf, die andere Dashcam das Kombiinstrument. In der Videoaufnahme werden die aktuelle Zeit und die GPS-Geschwindigkeit eingeblendet, die sich einmal pro Sekunde aktualisiert. **BILD 16** zeigt dazu exemplarisch den Versuchsaufbau in einer Mercedes S-Klasse (S 560 aus 2018 – im Weiteren als Mercedes bezeichnet), die neben dem VW als zweites Testfahrzeug zur Verfügung stand.

Beim Versuch mit dem VW wurden die Geschwindigkeiten 50, 70, 100 und 130 km/h über eine längere Zeit konstant mit Tempomat gefahren und im Anschluss wurde die dabei aufgezeichnete Geschwindigkeit der Dashcam mit der eingestellten Geschwindigkeit verglichen.

TABELLE 2 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung des VW. Bei 50, 70 und 130 km/h ist zu erkennen, dass die von der Kamera aufgezeichnete Geschwindigkeit zwischen zwei Werten schwankt. Bei 100 km/h ist die per GPS ermittelte Geschwindigkeit (97 km/h) konstant. Die Tachogeschwindigkeit weicht zur GPS-Geschwindigkeit demnach um rund 3 % nach oben ab.

TABELLE 2: Abweichung der Tacho- zur GPS-Geschwindigkeit bei dem VW
TABLE 2: Deviation of the speedometer speed from the GPS speed on the VW

v (Tacho)	v (GPS)	Abweichung [%]	Abweichung [km/h]
50 km/h	48-49 km/h	2-4 %	1-2 km/h
70 km/h	67-68 km/h	3-4 %	2-3 km/h
100 km/h	97 km/h	3 %	3 km/h
130 km/h	126-127 km/h	2-3 %	3-4 km/h

Auch die Abweichungen der anderen Geschwindigkeiten befinden sich in diesem Toleranzbereich. Die Tachogeschwindigkeit des VW weist daher, unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit, eine Abweichung zur GPS-Geschwindigkeit von rund 3 % nach oben auf.

Der Abgleich der angezeigten Geschwindigkeiten von Tacho und GPS wurde auch mit dem Mercedes durchgeführt, **TABELLE 3**. Der Bereich der prozentualen Abweichung ist größer und inkonsistenter als beim Versuch mit dem VW. Im Mittel liegt die Abweichung bei circa 6 %.

5.1.4 Schaltschwellen des adaptiven Fernlichts

Um zu ermitteln, bei welcher Geschwindigkeit das dynamische Lichtsystem von Abblendlicht auf Fernlicht wechselt und ab welcher Schwelle es wieder abblendet, wurden weitere Versuche durchgeführt. Die Versuchsfahrt mit dem VW beinhaltete Stadt- sowie Überlandverkehr und dauerte jeweils etwa 15 min. Es wurde darauf geachtet, wie sich der Lichtkegel in der Aufblendphase verändert und bei welchen Geschwindigkeitsschwellen das System zwischen Fern- und Abblendlicht wechselt. Der Lichtkegel wird

beim Abblenden nach oben geöffnet. Für die Geschwindigkeitsschwellen zum Auf- und Abblenden konnten für den VW anschließend Bereiche eingegrenzt werden: Bei 60 bis 65 km/h wird auf Fernlicht aufgeblendet. Der Bereich des Abblendens konnte auf 30 bis 35 km/h eingegrenzt werden. Die Ergebnisse stimmten mit den Angaben in der VW-Bedienungsanleitung überein.

Für den verwendeten Mercedes gibt die Betriebsanleitung nicht nur Schwellen für den Wechsel zwischen Abblendlicht und Fernlicht an, sondern auch die dynamische Variation des Lichtkegels in den einzelnen Modi selbst. Ab 30 km/h wird das automatische Fernlicht eingeschaltet, solange kein Gegenverkehr vorliegt und sich das Fahrzeug außerorts befindet. Ab

40 km/h wird das sogenannten „Ultra-Range-Fernlicht“ eingeschaltet, mit dem die Umgebung noch heller und weiter beleuchtet wird. Über 50 km/h wird die Leuchtweite des Fernlichts automatisch an den Abstand zu vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern angepasst. Unter 25 km/h wird das Fernlicht wieder ausgeschaltet, ebenso wie in ausreichend beleuchteter Umgebung [17].

In den selbst durchgeführten Fahrversuchen ließen sich die angegebenen Geschwindigkeitsschwellen für das Auf- und Abblenden des Mercedes bestätigen. Das Aufblenden des Mercedes konnte bei einer Geschwindigkeit von $31 \text{ km/h} \pm 1 \text{ km/h}$ festgestellt werden, **BILD 17**. Abgeblendet wurde dreimal bei 25 km/h und einmal bei 24 km/h (laut Tacho-Ablesung).

5.2 Methodik für die dynamische LTU

5.2.1 Kameraeinstellungen für die Aufnahme der Sichtbilder

Um bei einem dynamischen Versuch auswertbare Bilder während der LTU aufnehmen zu können, wurde anhand der zuvor ermittelten Schaltschwellen eine konstante Fahrzeuggeschwindigkeit von 36 km/h gewählt. Somit werden die Bilder automatisch alle 10 m aufgenommen, wenn die Aufnahme jede Sekunde erfolgt. Dennoch muss der Abstand des Fahrzeugs zum Kollisionsort während der Aufnahme bekannt sein, um das Bild für die spätere Auswertung der Fußgängererkennbarkeit verwenden zu können. Folglich muss eine Möglichkeit gefunden werden, den Bildern die jeweilig zugehörige Entfernung zuzuordnen.

Die Sichtfotos wurden, genau wie bei der statischen LTU, mit einer Festbrennweite von 30 mm und aus dem Blickfeld des Fahrers aufgenommen. In mehreren Aufnahmedurchgängen wurden der ISO-Wert und die Belichtungszeit der Kamera verändert und später die Güte der aufgenommenen Bilder beurteilt.

TABELLE 4 zeigt die verschiedenen getesteten Kameraeinstellungen und

TABELLE 3: Abweichung der Tacho- zur GPS-Geschwindigkeit beim Mercedes
TABLE 3: Deviation of the speedometer speed from the GPS speed on the Mercedes

v (Tacho)	v (GPS)	Abweichung [%]	Abweichung [km/h]
50 km/h	46-47 km/h	6-8 %	3-4 km/h
70 km/h	66 km/h	6 %	4 km/h
100 km/h	95-96 km/h	4-5 %	4-5 km/h



BILD 17: Geschwindigkeitsschwelle zum Aufblenden des Mercedes
FIGURE 17: Speed threshold for fading in the Mercedes

deren entsprechende Bildqualitäten. Bei starker Fahrbahnunebenheit sind die Bilder bei der langen Belichtungszeit so stark verwackelt, dass eine Auswertung nicht möglich ist. Unabhängig vom Schaltzustand des Lichts (Abblend- oder Fernlicht) ist eine Bildaufnahme möglich. Generell gilt, je heller die Umgebung, desto einfacher die Bildaufnahme.

Das **BILD 18** zeigt ein Beispiel zur aufgenommenen Bildqualität während der Fahrt mit dem VW. Die hier verwendeten Kameraeinstellungen (Belichtung 1/20 s, Blende F/2.2, ISO-1600) wurden auch bei den weiteren Versuchen verwendet. Einen Vergleich der Kameraeinstellungen bei der statischen und der dynamischen LTU zeigt die **TABELLE 5**. Bei der dynamischen LTU ist zu beachten, dass der deutlich höhere ISO-Wert für mehr Körnung im Bild sorgt.

5.2.2 Bestimmung Distanz Fahrzeug / Fußgänger

Das **BILD 19** zeigt den Unterschied zwischen der Aufnahme des Sichteindrucks im Stillstand und während der

Fahrt mit einer Geschwindigkeit von knapp 40 km/h. Im statischen Fall ist das Bild scharf und nicht verschwommen. Beim Bild aus dem dynamischen Versuch ist der Vordergrund, in dem die Markierungen auf der Fahrbahn zu erkennen sind, etwas unscharf.

Der weiter entfernte Bereich auf Höhe des Fußgängers ist aber annähernd genauso scharf zu erkennen wie beim statisch aufgenommenen Bild. Insgesamt sind diese Bilder somit für die

lichttechnische Auswertung gut zu gebrauchen.

Anhand des Vergleichs wird deutlich, warum die Markierungen bei der dynamischen Untersuchung nur als Richtwerte und nicht als Absolutwerte für die genaue Entfernung nutzbar sind. Zum einen sind die Markierungen auf einigen Bildern nicht eindeutig zu erkennen und zum anderen ist der

TABELLE 4: Kameraeinstellungen und Resultate der Bildaufnahme bei einer Geschwindigkeit von 36 km/h

TABLE 4: Camera settings and results of the image recording at a speed of 36 km/h

Situation	Kameraeinstellung	Ergebnis
Abblendlicht	Belichtung: 1/10 s ISO-1000	Bilder verwackelt, aber alles Wesentliche erkennbar
Abblendlicht	Belichtung: 1/20 s ISO-1600	Bilder verwackelt, besser erkennbar als beim ersten Durchgang
Abblendlicht	Belichtung: 1/10 s ISO-800	Versuch mit Gegenverkehr, Wesentliches erkennbar
Abblendlicht	Belichtung: 1/10 s ISO-800	Bilder verwackelt, aber verwendbar
Fernlicht	Belichtung: 1/10 s ISO-800	bei Unebenheiten stark verwackelt, ansonsten verwendbar



BILD 18: Sichtaufnahme während der Fahrt; Abblendlicht, Belichtung 1/20 s, Blende F/2.2, ISO-1600

FIGURE 18: Visual image while driving; low beam, exposure 1/20 s, aperture F/2.2, ISO-1600

TABELLE 5: Kameraeinstellungen für die LTU mit Abblendlicht (statisch und dynamisch)

TABLE 5: Camera settings for the LTU with low beam (static and dynamic)

Parameter	statisch	dynamisch
Brennweite	30 mm	30 mm
Blende	F/2.2	F/2.2
Belichtungszeit	1/2 s	1/20 s
ISO-Wert	ISO-200	ISO-1600

genaue Abstand der Fahrzeugfront zur im Bild erkennbaren, nächsten Entfernungsmarkierung nicht bekannt. In Bild 19 sieht man auf den Bildern die 30-m-Markierungen. Das Fahrzeug befindet sich allerdings 35 m vom Fußgänger entfernt, wie aus der statischen Untersuchung hervorgeht. Hierdurch entsteht bei der dynamischen LTU eine Ungenauigkeit in der Positionierung des Fahrzeugs von mehreren Metern.

Der Ansatz zur Eingrenzung der Fahrzeugposition unter Berücksichtigung der geometrischen Optik wurde bereits in Teil 1 der Veröffentlichung vorgestellt. Hierbei ist festzuhalten, dass die Warnleuchten, die auf dem Boden positioniert und eingemessen wurden, weniger Abweichung bei der Berechnung erwarten lassen als die Leitpfosten. Dies ist dadurch begründet, dass die Leitpfosten zwar ortsfest sind, aber nicht exakt auf einer Höhe stehen und häufig etwas schräg zueinander sind. Es bietet sich an, für (mindestens) eine Fahrzeugposition die Entfernung zu den Warnleuchten vor Ort zu mes-

sen, um eine leichtere Übertragbarkeit für die weiteren Messungen zu erhalten.

5.3 Messergebnisse

Die dynamische LTU wurde sowohl mit Abblendlicht als auch mit Fernlicht durchgeführt und mit den Aufnahmen aus der statischen LTU verglichen. Bei allen Versuchen wurde der Fußgänger als Frontsilhouette mittig auf der Fahrspur des Pkw platziert und das Fahrzeug aus einer Entfernung von rund 100 m an den Fußgänger angenähert. Im dynamischen Fall erfolgte die Annäherung bis zu einem Abstand von 20 m, wobei auch die Markierungen von 15 m und 10 m noch auf die Straße angebracht wurden. Im Anschluss wurde das Fahrzeug links am Fußgänger vorbei gelenkt, um einen Zusammenstoß auszuschließen.

Da der Schwerpunkt der Untersuchung auf der Überprüfung der Vergleichbarkeit der dynamischen mit der statischen LTU lag, wurden i. a. keine Fahrzeuge im Gegenverkehr positioniert. In der Unfallanalytik sind

die meisten Unfälle mit Fußgängern bei Dunkelheit auf eine schlechte Ausleuchtung der Straße zurückzuführen, die bei eingeschaltetem Fernlicht nicht zu erwarten ist. Inwieweit sich das adaptive Fernlicht von dem manuell eingeschalteten Fernlicht in einer Unfallsituation unterscheidet, wurde daher für die nachgestellte Unfallsituation zunächst als vernachlässigbar eingestuft. Ob diese Einstufung tatsächlich zutrifft, wird am Ende zu diskutieren sein.

5.3.1 Fußgängererkennbarkeit – VW mit Xenonscheinwerfern

BILD 20 und BILD 21 zeigen den Sichteindruck aus dem VW ab 50 m bei Annäherung an den Fußgänger im statischen (Bild 20) und dynamischen (Bild 21) Aufnahmezustand bei Abblendlicht. Die Auswertung der Bilder gemäß dem nachfolgenden Abschnitt erfolgte direkt in den Bildern. Auf der rechten Seite ist eine Vergrößerung des relevanten Bildbereichs dargestellt, um die Positionierung der Messbereiche für die Auswertung nachvollziehbar zu machen. Mit den roten Rechtecken wurden der Oberkörper des Fußgängers (IO) und der Hintergrund neben dem Oberkörper (IH) markiert. Analog erfolgte die Erfassung der Beine und des dazugehörigen Hintergrundes über die blauen Rechtecke. Das grün markierte Rechteck zeigt die Übersättigung einzelner Bildpunkte des gewählten Messbereiches an.

Die Bilder des statischen Versuchs (Bild 20) wurden mit einer Belichtungszeit von 0,5 s und einem ISO-

BILD 19: Gegenüberstellung der Sicht aus 35 m Entfernung (statische und dynamische Aufnahme)

FIGURE 19: Comparison of the view from a distance of 35 m (static and dynamic image)



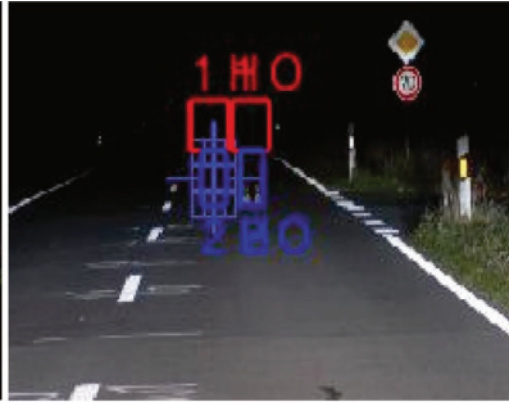
(a) statisch



(b) dynamisch



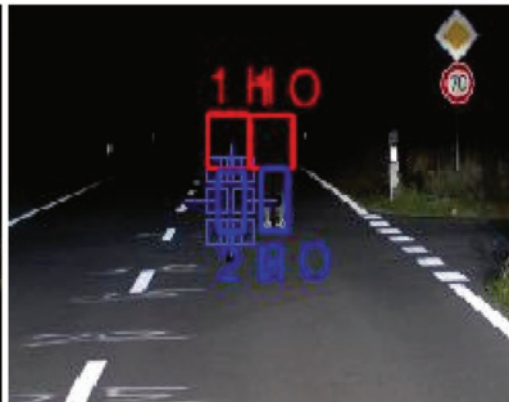
(a) 50 m Entfernung



(b) 50 m Entfernung - Ausschnitt



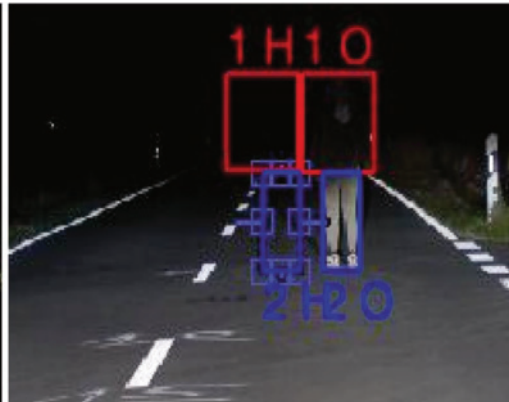
(c) 40 m Entfernung



(d) 40 m Entfernung - Ausschnitt



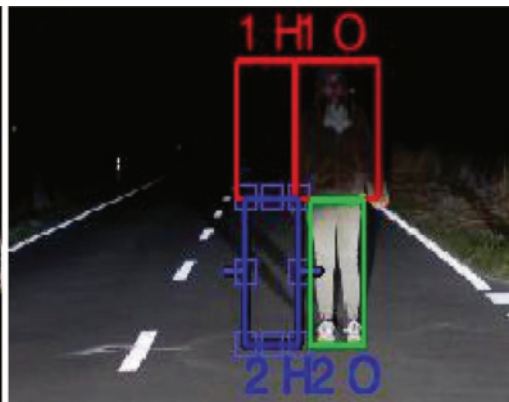
(e) 30 m Entfernung



(f) 30 m Entfernung - Ausschnitt



(g) 20 m Entfernung



(h) 20 m Entfernung - Ausschnitt

BILD 20: Sicht aus dem VW mit Abblendlicht (statische Aufnahme) – Umgebungsleuchtdichte 0,5 cd/m², Belichtungszeit ½ s, ISO-200

FIGURE 20: Evaluation of the images VW Touareg low beam static – Ambient luminance 0.5 cd/m², exposure time ½ s, ISO-200



(a) 50 m Entfernung

(b) 50 m Entfernung - Ausschnitt



(c) 40 m Entfernung

(d) 40 m Entfernung - Ausschnitt



(e) 31 m Entfernung

(f) 31 m Entfernung - Ausschnitt



(g) 21 m Entfernung

(h) 21 m Entfernung - Ausschnitt

BILD 21: Sicht aus dem VW mit Abblendlicht (dynamisch) – Umgebungsleuchtdichte $0,5 \text{ cd/m}^2$, Belichtungszeit $1/20 \text{ s}$, ISO-1600

FIGURE 21: Analysis of the VW Touareg low beam images dynamic – ambient luminance 0.5 cd/m^2 , exposure time $1/20 \text{ s}$, ISO-1600

Wert von 200 aufgenommen. Im Vergleich dazu wurden die Bilder beim dynamischen Versuch (Bild 21) mit einer Belichtungszeit von 1/20 s und einem ISO-Wert von 1600 aufgenommen. Für die Versuche mit Fernlicht wurden die Kameraeinstellungen übernommen. Die Umgebungsleuchtdichte L_U wurde bei Einsatz des Abblendlichts zu $0,50 \text{ cd/m}^2$ und bei Einsatz des Fernlichts zu $0,51 \text{ cd/m}^2$ bestimmt, wobei beim Fernlicht eine größere Entfernung des Adaptionsbereichs vom Pkw verwendet wurde.

5.3.2 Vergleich der Auswertung bei Abblendlicht

Die SI-Diagramme in BILD 22 zeigen den Verlauf der Leuchtdichtedifferenz der Beine zum Hintergrund in Abhän-

gigkeit von der Fahrzeugentfernung bei eingeschaltetem Abblendlicht – bei der statischen Messung (oben) und bei der dynamischen Messung (unten). Die grüne Gerade bildet die erforderliche Schwellleuchtdichtedifferenz, gewichtet mit dem Praxisfaktor 4, und die rote Gerade eine Gewichtung mit dem Praxisfaktor 3 ab. Die messtechnisch ermittelten Leuchtdichtedifferenzen in Abhängigkeit von der Entfernung wurden mit blauen Kreisen im Diagramm kenntlich gemacht

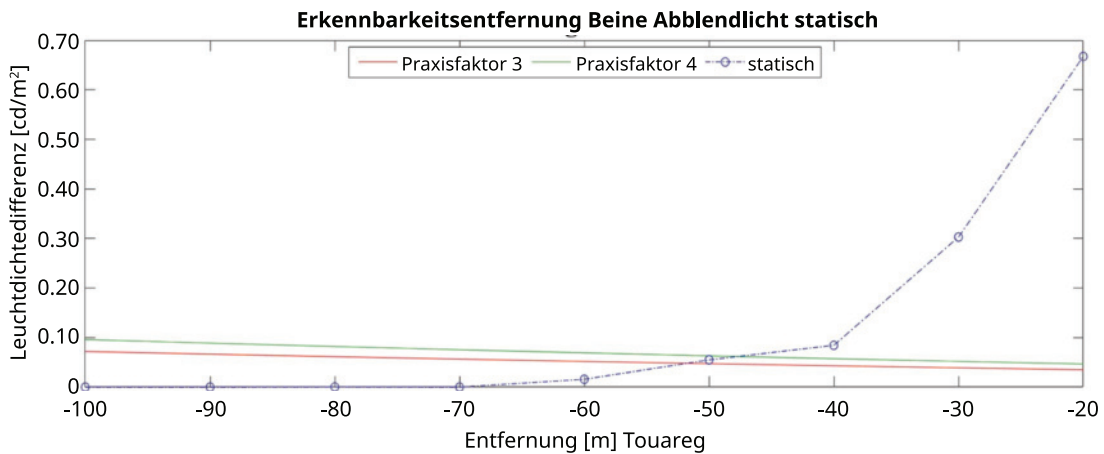
Die Messwerte zu der Erkennbarkeit des Oberkörpers wurden bei der Untersuchung ebenfalls aufgenommen. Zur Vereinfachung wird nachfolgend nur ein Vergleich der dynamischen zur statischen LTU anhand der Fußgängererkennbarkeit im Beinbereich durch-

geführt, da die Messwerte für den Oberkörper beim Abblendlicht kaum zur Erkennbarkeit beitragen.

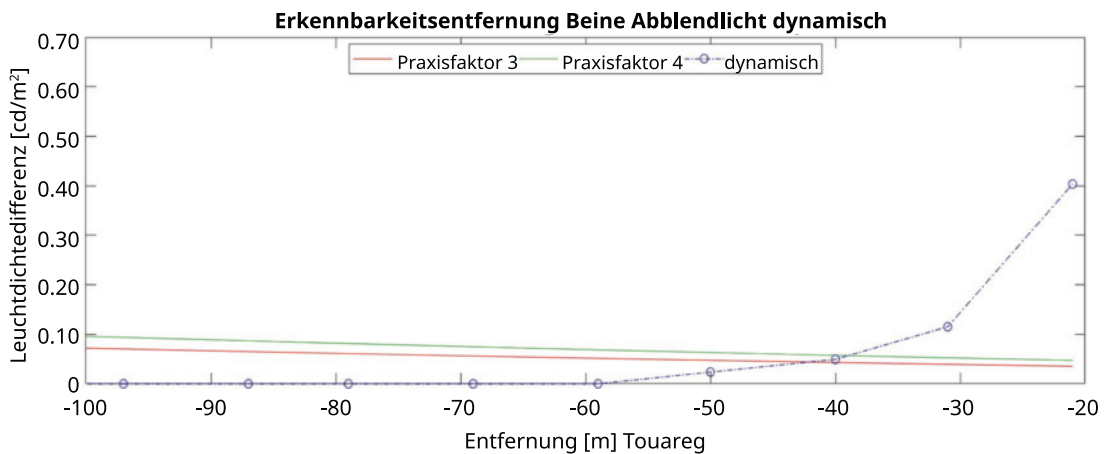
Das SI-Diagramm in Bild 22a zeigt die Ergebnisse der statischen LTU. Messbare Leuchtdichtedifferenzen zwischen den Beinen und dem Hintergrund liegen erst unterhalb einer Entfernung von 60 m vor. Die Erkennbarkeitsentfernung der Beine bei der statischen LTU mit Abblendlicht ließ sich zwischen etwa 51 bis 45 m eingrenzen.

In Bild 22b sind die Ergebnisse der dynamischen LTU dargestellt. Die erste messbare Leuchtdichtedifferenz lag in einer Entfernung von 50 m vor. Die Erkennbarkeitsentfernung lässt sich zu etwa 42 bis 39 m ablesen.

Der Vergleich der Auswertung zu gleichen Entfernungen des Pkw zum



(a) Beine Abblendlicht statisch Touareg - Belichtungszeit 1/2s, ISO-200



(b) Beine Abblendlicht dynamisch Touareg - Belichtungszeit 1/2s, ISO-1600

BILD 22: Vergleich der SI-Diagramme (statisch / dynamisch) für die Beinerkennbarkeit beim VW mit Abblendlicht-Umgebungsleuchtdichte $0,5 \text{ cd/m}^2$

FIGURE 22: Comparison of the SI diagrams for the legs of the VW Touareg with low beam-ambient luminance 0.5 cd/m^2

Fußgänger zeigt, dass alle Leuchtdichtedifferenzen der dynamischen Untersuchung unterhalb der statischen Werte liegen. Eine Diskussion dieses Effektes erfolgt am Ende des Beitrags.

5.3.4 Vergleich der Auswertung bei Fernlicht

In **BILD 23** sind die Ergebnisse aus der dynamischen und der statischen LTU mit Fernlicht gegenübergestellt. Bild 23a zeigt, dass die erforderliche Leuchtdichtedifferenz zur Fußgängererkennung bei 100 m bereits erreicht wird, sodass der Fußgänger während des gesamten Versuchs sichtbar war.

In Bild 23b ist das SI-Diagramm der dynamischen LTU unter gleichen Bedingungen gezeigt. Auch hier weichen die gemessenen Leuchtdichtediffe-

renzen bei gleichen Entfernungen von den Leuchtdichtedifferenzen in der statischen Untersuchung nach unten ab, was sich u. a. an der geringeren Erkennbarkeitsentfernung von 95 bis 85 m bemerkbar macht.

5.3.5 Fußgängererkennung – Mercedes mit LED-Scheinwerfer

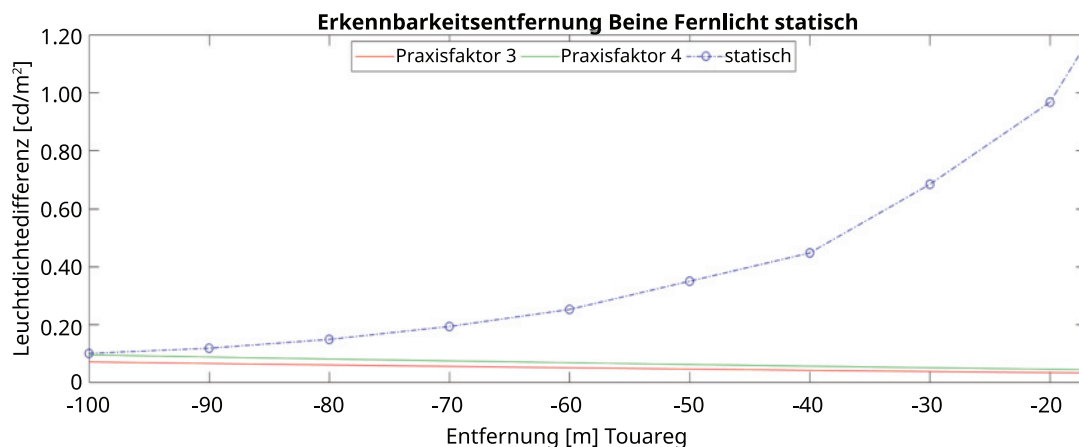
Mit dem Mercedes wurden die gleichen lichttechnischen Untersuchungen analog zum VW durchgeführt. **BILD 24** und **BILD 25** zeigen den Sichteindruck aus dem Mercedes in einer Entfernung unter 50 m und die gewählten Messbereiche bei der statischen und dynamischen LTU mit Abblendlicht. Die Anordnung der Messfelder ist äquivalent zu den zuvor ausgewerteten Bildern des VW. Anders als beim VW wurden die statischen und dynamischen

Bilder mit der gleichen Kameraeinstellung aufgenommen, um auszuschließen, dass die unterschiedlichen Einstellungen der Kamera für die o. a. Abweichungen verantwortlich waren. Die Belichtungszeit betrug $1/20$ s, der ISO-Wert 1600.

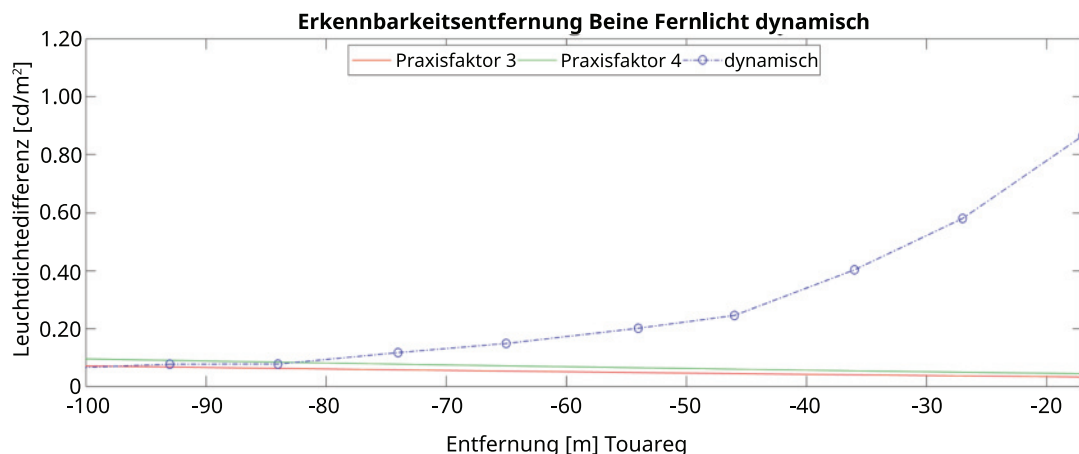
Die Umgebungsleuchtdichte L_U bei dem Mercedes unter Berücksichtigung von Abblendlicht betrug $1,5 \text{ cd/m}^2$. Bei Fernlicht wurde eine Umgebungsleuchtdichte von $1,9 \text{ cd/m}^2$ gemessen.

5.3.6 Vergleich der Auswertung bei Abblendlicht

Der Vergleich der Erkennbarkeitsentfernungen der Beine bei Abblendlicht für die statische und dynamische LTU ist in **BILD 26** dargestellt. Bild 26a zeigt das SI-Diagramm für die Beine bei Abblendlicht für den statischen Ver-



(a) Beine Fernlicht statisch Touareg



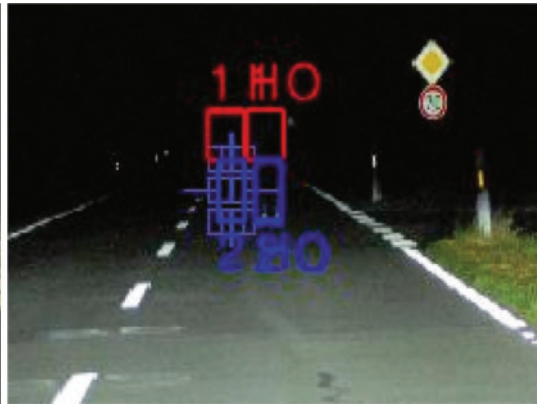
(b) Beine Fernlicht dynamisch Touareg

BILD 23: Vergleich der SI-Diagramme (statisch / dynamisch) für die Beinerkennung beim VW mit Fernlicht

FIGURE 23: Comparison of the SI diagrams for the legs of the VW Touareg with high beam



(a) 50 m Entfernung



(b) 50 m Entfernung - Ausschnitt



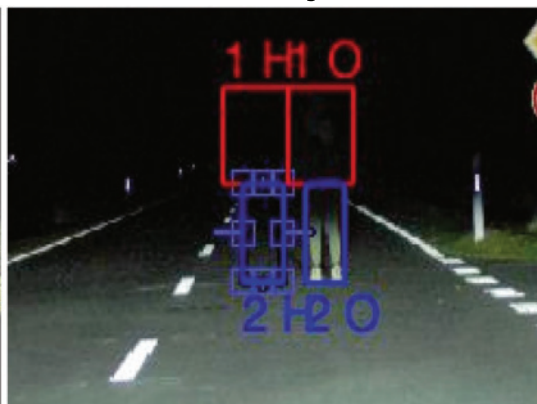
(c) 40 m Entfernung



(d) 40 m Entfernung - Ausschnitt



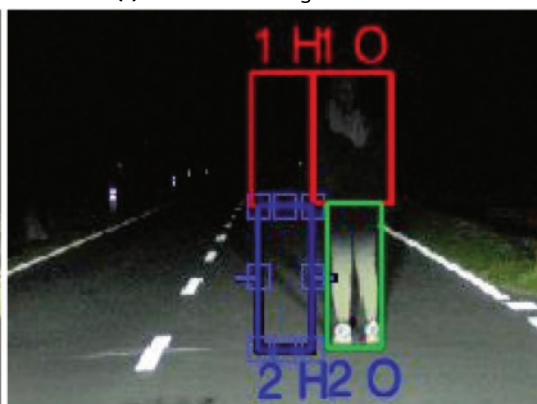
(e) 30 m Entfernung



(f) 30 m Entfernung - Ausschnitt



(g) 20 m Entfernung

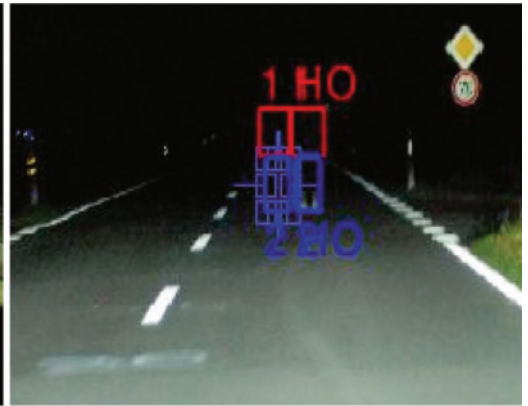


(h) 20 m Entfernung - Ausschnitt

BILD 24: Sicht aus dem Mercedes mit Abblendlicht (statisch) – Umgebungsleuchtdichte 1,48 cd/m², Belichtungszeit 1/20 s, ISO-1600
FIGURE 24: Evaluation of the Mercedes-Benz S-Class dipped beam images static – ambient luminance 1.48 cd/m², exposure time 1/20 s, ISO-1600



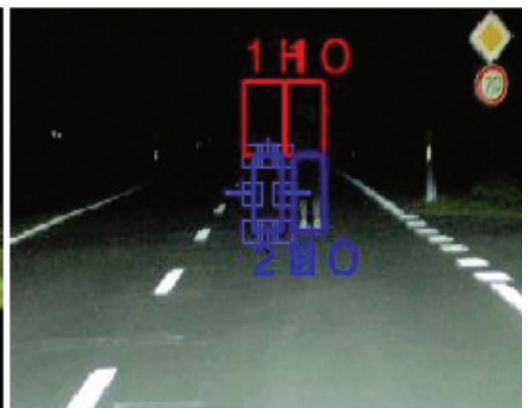
(a) 43 m Entfernung



(b) 43 m Entfernung - Ausschnitt



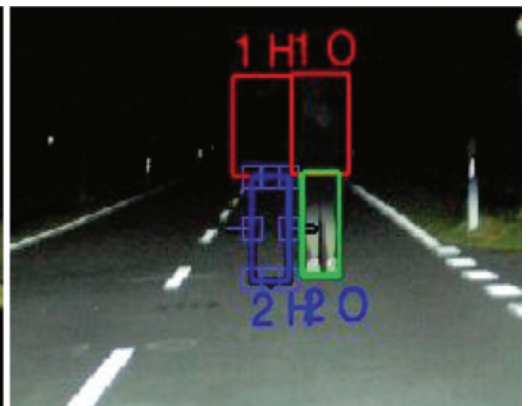
(c) 35 m Entfernung



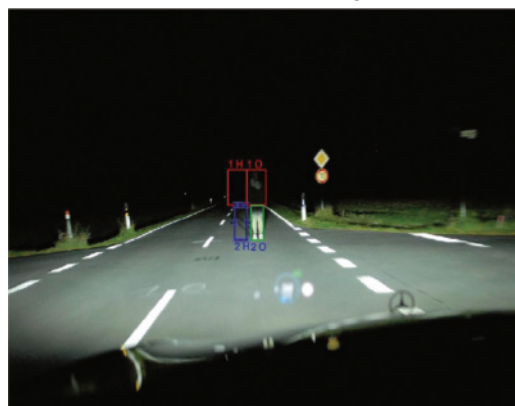
(d) 35 m Entfernung - Ausschnitt



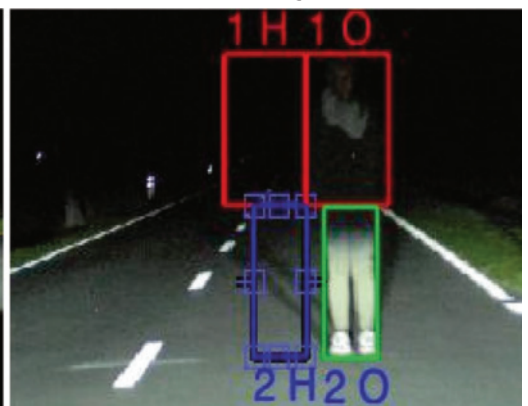
(e) 26 m Entfernung



(f) 26 m Entfernung - Ausschnitt



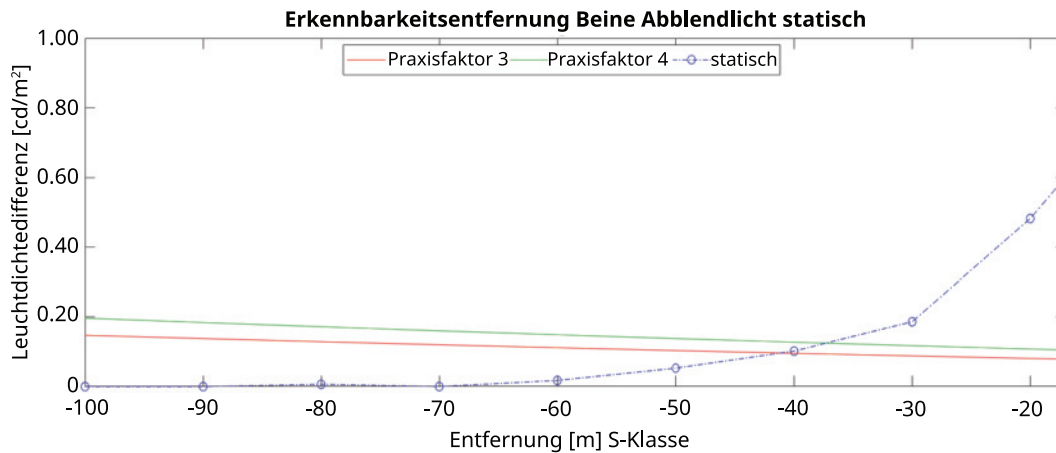
(g) 17 m Entfernung



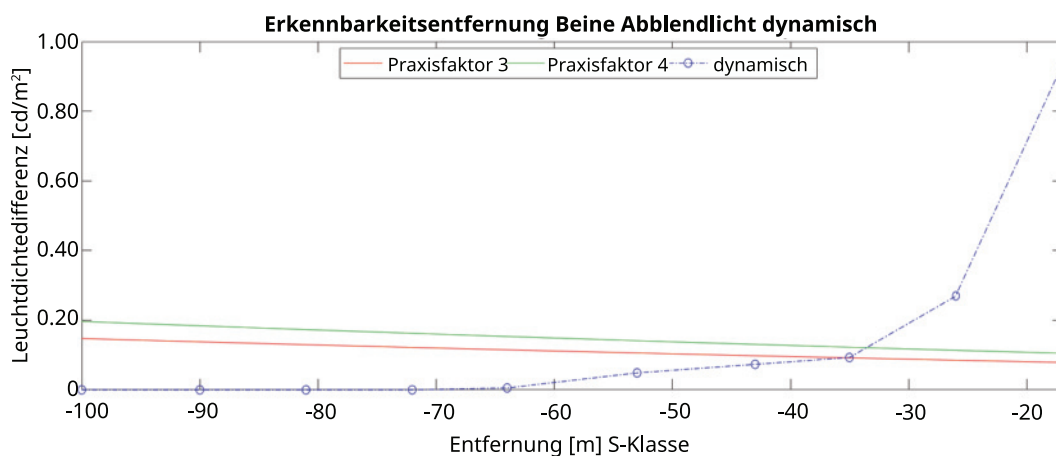
(h) 17 m Entfernung - Ausschnitt

BILD 25: Sicht aus dem Mercedes mit Abblendlicht (dynamische Aufnahme) – Umgebungsleuchtdichte 1,48 cd/m², Belichtungszeit 1/20 s, ISO-1600

FIGURE 25: Analysis of the Mercedes-Benz S-Class low beam images dynamic – ambient luminance 1.48 cd/m², exposure time 1/20 s, ISO-1600



(a) Beine Abblendlicht statisch S-Klasse



(b) Beine Abblendlicht dynamisch S-Klasse

BILD 26: Vergleich der SI-Diagramme für die Beine bei der Mercedes-Benz S-Klasse mit Abblendlicht
FIGURE 26: Comparison of the SI diagrams for the legs of the Mercedes-Benz S-Class with low beam

such. Die Erkennbarkeitsentfernung liegt bei etwa 40 m. Die erste messbare Leuchtdichtedifferenz liegt bei einer Entfernung von unter 80 m vor.

Das SI-Diagramm in Bild 26b für den dynamischen Versuch zeigt eine Erkennbarkeitsentfernung von etwa 35 m. Im Gegensatz zum VW ist der Verlauf der Leuchtdichtedifferenzen beim Mercedes bei der statischen Aufnahme und bei der dynamischen Aufnahme sehr ähnlich.

5.3.7 Vergleich der Auswertung bei Fernlicht

Das BILD 27 zeigt die SI-Diagramme für die Beine bei Fernlicht. Das Diagramm in Bild 27a zeigt die Leuchtdichtedifferenzen über die Entfernung für den statischen Fall. Die Ergebnisse aus der dynamischen LTU sind im Diagramm Bild 27b aufgezeigt. In einer Entfernung von 100 m liegt ei-

ne Leuchtdichtedifferenz von rund 0,8 cd/m² vor, die bei der weiteren Annäherung in beiden Untersuchungen bis auf knapp 3,5 cd/m² zunimmt. In beiden Untersuchungen ist somit der Fußgänger bereits in Entfernungen von deutlich über 100 m zu erkennen und wird in der weiteren Annäherung bis zu einer Entfernung von 30 m immer deutlicher erkennbar.

5.4 Diskussion

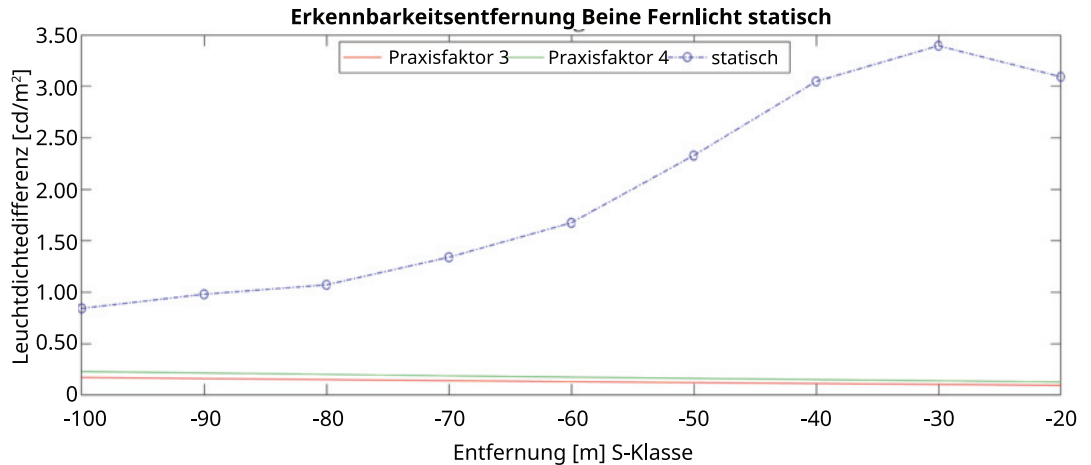
In den durchgeführten Versuchen mit dem VW zeigte sich, dass die aus den Leuchtdichtedifferenzen gewonnene Erkennbarkeitsentfernung in der dynamischen Untersuchung kleiner war als in der statischen Untersuchung.

In BILD 28 sind die Leuchtdichtedifferenzen für die statische Untersuchung durch blaue Kreise markiert, für die dynamische Untersuchung in Violett. Ab einer Entfernung von etwa

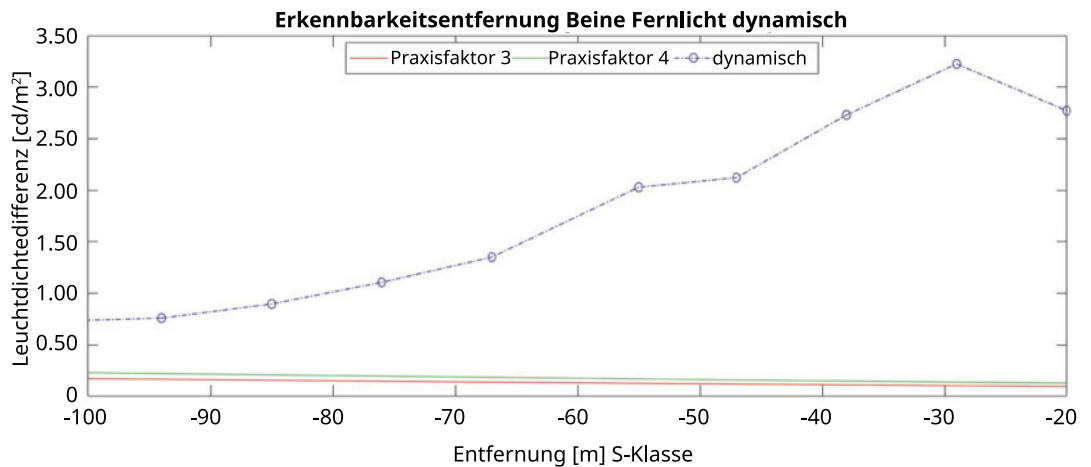
60 m bis zu einer Entfernung von rund 20 m vor dem Kollisionsort weichen die dynamischen von den statischen Werten alle um etwa 10 % nach unten ab.

Diese Abweichung war unabhängig von der Kameraeinstellung und war auch nicht auf eine falsche Entfernungsbestimmung zurückzuführen, weshalb eine während der Fahrt leicht abgesenkte Lichteinstellung ursächlich sein könnte.

Betrachtet man die Messwerte für den Mercedes in BILD 29, so stimmen hier die Messwerte der dynamischen und statischen Untersuchung bis in eine Entfernung von rund 30 m im Rahmen der Messtoleranz überein. Unterhalb von 30 m liegen die Messwerte für die dynamische Messung deutlich oberhalb der statischen Messung. Ursächlich hierfür könnte die dynamische Lichtbewegung beim



(a) Beine Fernlicht statisch S-Klasse



(b) Beine Fernlicht dynamisch S-Klasse

BILD 27: Vergleich der SI-Diagramme für die Beine bei der Mercedes-Benz S-Klasse mit Fernlicht
FIGURE 27: Comparison of the SI diagrams for the legs of the Mercedes-Benz S-Class with high beam

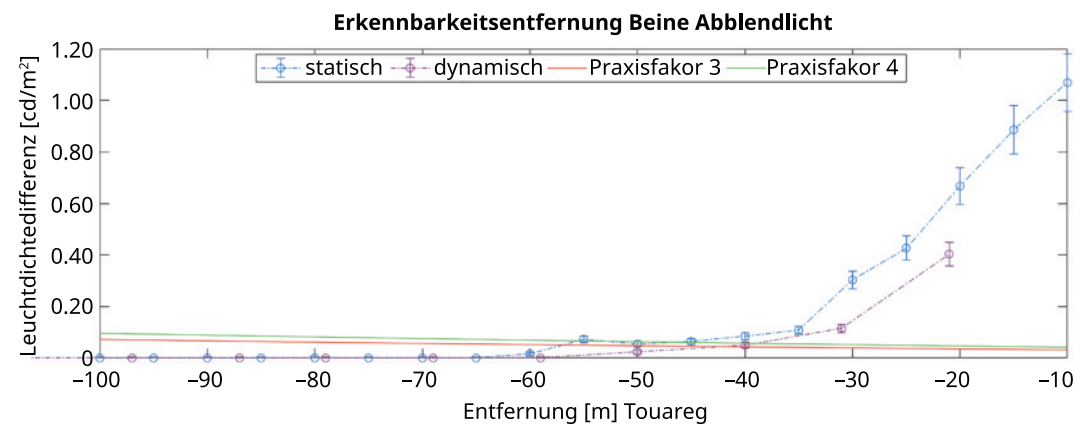


BILD 28: Vergleich der Erkennbarkeitentfernungen (VW mit Abblendlicht) bei der statischen (blau) und dynamischen (violett) Bildaufnahme
FIGURE 28: Comparison of recognisability distances (VW with dipped beam) for static (blue) and dynamic (violet) image recording

Ausweichen in Annäherung an den Fußgänger sein, bei der das asymmetrische Licht nach links schwenkt.

Insgesamt ist es somit möglich, durch eine kurze Belichtungszeit und einen hohen Iso-Wert auswertbare Lichtbilder während einer (langsamen)

Fahrt zu erstellen. Dies ist einerseits bei dynamischen Lichtsystemen erforderlich, die nur während der Fahrt regeln. Andererseits kann dieses Verfahren auch dann eingesetzt werden, wenn ein Anhalten für eine statische Untersuchung – beispielsweise eines

Zuges – nicht möglich ist, da ansonsten ein Alarm ausgelöst wird. Die genaue Entfernung zum Unfallort während der Lichtbildaufnahme in Fahrt kann mithilfe einer Lichtbildauswertung über zuvor eingemessene Marker bestimmt werden.

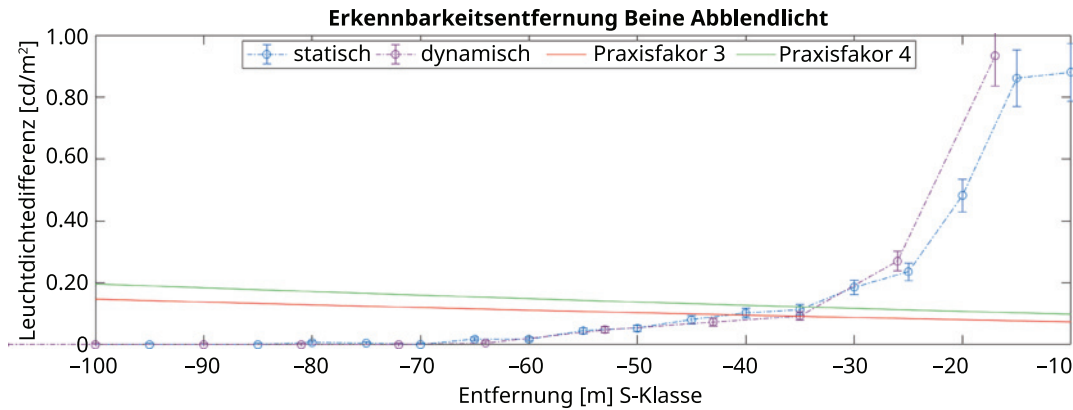


BILD 29: Vergleich der Erkennbarkeitsentfernung (Mercedes mit Abblendlicht) bei der statischen (blau) und dynamischen (violett) Bildaufnahme
FIGURE 29: Comparison of the recognisability distance (Mercedes with dipped beam) for static (blue) and dynamic (violet) image recording

Das tatsächlich geschaltete Lichtprofil kann über einen Doppelspiegel auf einen Schirm umgelenkt werden, sodass die Lichteinstellung nachempfunden werden kann, solange die Verkehrssituation annähernd bekannt ist. Ob das dynamische Licht eingeschaltet war, wird sich häufig nicht im Nachhinein klären lassen, solange dies nicht durch entsprechende Einträge in der Bordelektronik gespeichert wird.

Wenn das dynamische Lichtsystem aktiviert ist, stellt sich die Sichtsituation für den Fahrer auf den entgegenkommenden Fußgänger trotz Gegenverkehr in etwa so dar, wie es in dem **BILD 30** gezeigt ist. Durch das (Fern-)Licht wird der gesamte Fußgänger angestrahlt und nicht nur der Beinbereich, wie beim Abblendlicht. Der Fuß-

gänger wird dann – abhängig von der genauen Kleidung – bereits in so großer Entfernung (circa 100 m) erkennbar, dass ein rechtzeitiges Anhalten auch bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h auf nasser Straße ermöglicht wird.

6 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde eine Methode vorgestellt, mit der eine LTU, die üblicherweise statisch erfolgt, auch dynamisch durchgeführt werden kann. So kann den adaptiven Lichtsystemen Rechnung getragen werden, die die Ausleuchtung dynamisch an die Fahr-situation anpassen. Adaptive Lichtsysteme sind u. a. geschwindigkeitsabhängig, sodass diese nicht im Rahmen

einer statischen LTU berücksichtigt werden können.

Um eine dynamische LTU durchzuführen, muss sich zunächst mit dem adaptiven Lichtsystem des Versuchsfahrzeugs vertraut gemacht werden. Daher sind u. a. die Geschwindigkeitsschwellen zu ermitteln, bei denen die Systeme in ein anderes Lichtprofil wechseln. So kann meist ein Geschwindigkeitsbereich gewählt werden, bei dem eine dynamische LTU noch möglich ist. Der Geschwindigkeitsbereich sollte möglichst niedrig sein und muss für jedes System individuell ermittelt werden.

Bei der dynamischen LTU erfolgt die Bildaufnahme per Intervallauslösung jede Sekunde mit einem hohen Iso-Wert und einer geringen Belich-

Unfallforschung Schadensanalyse Fahrzeugtechnik

Fundiertes Wissen
von Experten für Experten

Für Abonnenten
kostenloser
Download von
2D DXF-Daten

Ihre Vorteile:

- 11 Ausgaben
- Exklusive Prämie Ihrer Wahl
- Digitales Heftarchiv seit 1/2006
- Technische Datenblätter

www.VKUonline.de/abo

VKU
Ist eine Marke von:
Springer Automotive Media



BILD 30: Sichtfoto bei Annäherung an den Fußgänger mit teilausgeblendetem Fernlicht aufgrund von Gegenverkehr

FIGURE 30: Visibility photo when approaching the pedestrian with partially faded out high beam due to oncoming traffic

tungszeit. Die genaue Position des Fahrzeugs während der Bildaufnahme in der Örtlichkeit kann durch zuvor eingemessene Marker auf der Straße durch eine Bildauswertung bestimmt werden.

Zur Überprüfung der Methodik einer dynamischen LTU wurden mit einem VW und einem Mercedes LTU statisch und dynamisch durchgeführt und die ermittelten Leuchtdichtedifferenzen miteinander verglichen. Die dynami-

sche und die statische LTU lieferten ähnliche Ergebnisse. Eine dynamische LTU ist somit grundsätzlich möglich. Die Ergebnisse aus den dynamischen Versuchen mit dem VW wichen im Vergleich zu den statischen Versuchen nach unten ab, während die Ergebnisse der Untersuchung mit dem Mercedes übereinstimmten. Verschiedene Ursachen hierfür wurden untersucht, ohne jedoch einen eindeutigen Zusammenhang beim VW finden zu können.

Lighting technology investigation of vehicles with adaptive lighting systems

Technical lighting examinations (LTU) are required to determine the recognisability distances in the event of accidents in the dark. To date, these tests have only been carried out statically. As newer headlamp systems can dynamically adapt the illumination to the driving situation, a static analysis may no longer be expedient. A method is therefore needed to enable a photometric investigation with adaptively adjusted light. Such a method was developed by the author as part of her master's thesis in the "Traffic Accident Research" degree programme at Graz University of Technology and in collaboration with the engineering firm Schimmelpfennig+Becke.

Until now, an LTU has usually been carried out with a calibrated camera at a standstill in order to ensure the long exposure times required in the dark and to achieve precise positioning of the vehicle in relation to the pedestrian. The solution approach is a dynamic test setup. For validation, the results from the static and dynamic tests are compared with each other.

After the basics of static LTU were dealt with in Part 1, Part 2 deals with the methodology for carrying out a dynamic LTU and its results using the example of two test vehicles.

Möglich ist, dass der VW während der Fahrt den Lichtkegel der Scheinwerfer dynamisch leicht absenkt.

Die geringen Unterschiede können dahingestellt bleiben, wenn das adaptive Lichtsystem aktiviert wurde, da dann der Fußgänger i. a. bereits in sehr großen Entfernungen erkennbar wird. LTU mit Gegenverkehr und adaptivem Licht können in Zukunft mit dieser Methode durchgeführt werden.

Literaturhinweis

- [17] Mercedes-Benz: Onlinebetriebsanleitung; S-Klasse 2018. https://moba.i.mercedes-benz.com/baix/cars/222.0_comand_2018_a/de_DE/index.html. Version: 27.01.2021.

***Autoren**

MEng. Verena Brei arbeitet im Ingenieurbüro Christophler-Wehmeyer in Gütersloh.

Dr. rer. nat. Tim Hoger war Betreuer der Masterarbeit und arbeitet im IB S+B in Münster.

Dipl.-Ing. B.Sc. Martin Schachner war Mitbetreuer der Masterarbeit.

Prof. Dr.-Ing. Hermann Steffan war Prüfer der Masterarbeit. ::