

VKU

Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik

Fachzeitschrift für Kraftfahrzeug-Sachverständige,
Experten für Straßenverkehr, Kfz-Technik und Transportsicherheit



Unfallrekonstruktion
und Datenblätter

Lexus RX
Renault Austral
Subaru Solterra

Lichttechnische Untersuchung bei adaptiven Lichtsystemen

Lichttechnische Untersuchung bei Fahrzeugen mit adaptiven Lichtsystemen Teil 1

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 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 wurden die Ergebnisse aus der statischen und dynamischen Untersuchung einander gegenübergestellt.

In Teil 1 der Veröffentlichung wird zunächst auf die Grundlagen der statischen und dynamischen lichttechnischen Untersuchung eingegangen. In Teil 2 wird konkret auf die Ergebnisse der dynamisch durchgeführten Lichttechnik eingegangen.

1 Einleitung

Die Gesetzgebung beschränkt die Geschwindigkeit im Straßenverkehr auf eine den Sichtverhältnissen angepasste Geschwindigkeit. Der Fahrzeugführer muss innerhalb der überschaubaren Entfernung anhalten können. Dies betrifft auch ein Fahren bei Dunkelheit. Kommt es zu Unfällen in der Nacht, ist für die Unfallrekonstruktion auch die Erkennbarkeitsentfernung des Kollisionsgegners von maßgebender Bedeutung. Mögliche Beispiele für solche Unfälle sind stehende, sitzende oder liegende Personen auf der Fahrbahn.

Für die Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernung muss eine lichttechnische Untersuchung (LTU) durchgeführt werden. Diese Untersuchungen wurden bisher statisch mit einge-

schaltetem Abblendlicht oder Fernlicht durchgeführt, da diese die einzigen Schaltzustände bei herkömmlichen Scheinwerfersystemen waren.

Durch die stetige Weiterentwicklung der Scheinwerfersysteme können größere Erkennbarkeitsentfernungen durch adaptive Systeme realisiert werden [1]. Die adaptiven Systeme erzeugen verschiedene Lichtmodi, sodass es nicht mehr nur das klassische Abblendlicht und Fernlicht gibt, sondern der Lichtkegel an die Situation angepasst werden kann. So schwenkt das Licht beispielsweise in der Kurve mit oder blendet bei eingeschaltetem adaptivem Fernlicht den Gegenverkehr aus. Für die Lichttechnik bedeutet dies, dass die herkömmliche Rekonstruktionsmethode zur Eingrenzung der Erkennbarkeitsentfernung an ihre Grenzen stößt.

Die Veränderung des adaptiven Lichts ist geschwindigkeitsabhängig. Bei einem statischen Versuch läge daher die falsche Scheinwerfereinstellung (Lichtmodus) vor. Aus diesen Gründen beschäftigt sich diese Veröffentlichung mit der Entwicklung einer neuen Methode beziehungsweise einer Weiterentwicklung der herkömmlichen Methode, um lichttechnische Untersuchungen von Dunkelheitsunfällen mit adaptiven Scheinwerfersystemen zu ermöglichen.

2 Scheinwerfer bei Kraftfahrzeugen

2.1 Entwicklung

Scheinwerfersysteme an Kraftfahrzeugen haben sich über die Zeit stark weiterentwickelt **BILD 1**. Die ersten Scheinwerfer waren Acetylscheinwerfer, die kurz darauf von Glühlampen abgelöst wurden. 1957 wurde das asymmetrische Abblendlicht eingeführt. Das Charakteristische des Abblendlichts ist, dass die eigene Fahrbahn besser ausgeleuchtet wird, ohne den Gegenverkehr zu blenden. Somit wurde es notwendig, unterschiedliche Scheinwerfer für Rechts- und Linksverkehr einzuführen, da ein erweiterter Lichtkegel auf der rechten Seite im Linksverkehr den Gegenverkehr blenden würde. Ab 1960 wurden Glühlampen von Halogenlampen abgelöst, die in etwa den doppelten Lichtstrom (knapp 1000 lm) wie herkömmliche Glühlampen erzeugen konnten.

Anfang der 1990er-Jahre kommt mit Xenonlicht erstmals im BMW 7er (E32) ein weiteres Leuchtmittel auf den Markt. Das Besondere bei Xenonscheinwerfern ist ein Lichtstrom von 3200 lm – rund dreimal so groß wie eine Halogenlampe [2].

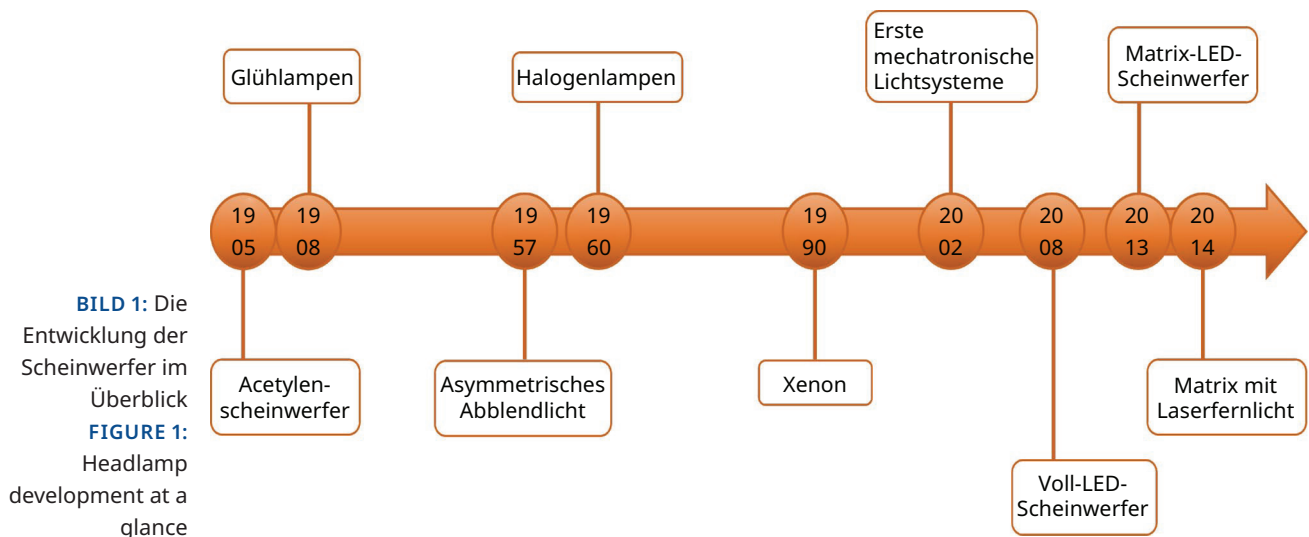


BILD 2: Projektion von Hinweisen für Fußgänger auf die Fahrbahn
FIGURE 2: Projection of signs for pedestrians onto the road

Ab 2002 gab es erstmals mechatronische Lichtsysteme, sodass durch die Bewegung von Modulen und Blenden die Lichtverteilung angepasst werden kann. Mit diesen Systemen war es auch möglich, beim Drehen des Lenkrades das statische Einschalten eines Nebelscheinwerfers und später das dynamische Kurvenlicht zu realisieren. Vier Jahre später wurde von Mercedes-Benz das erste adaptive Scheinwerfersystem vorgestellt, welches die Lichtverteilung automatisch an die Fahrsituation anpasst.

Nach und nach fand das Leuchtdioden (LED)-Licht Einzug ins Fahrzeug. Angefangen bei Kontrollleuchten über Brems- und Blinkleuchten wurden letztendlich erstmals LED-Scheinwerfer verbaut. Die LED-Technik bringt den Vorteil, dass sie energiesparend und langlebig ist.

Audi startete 2008 mit dem ersten Voll-LED-Scheinwerfer mit Abblendlicht und Fernlicht am Markt. Mit dieser Technologie ist es möglich, die verschiedenen Lichtmodi, wie Landstraßen-, Autobahn- und erweitertes

Nebellicht sowie aktives Kurvenlicht nicht nur bei Xenon-Scheinwerfern, sondern auch mit LED zu realisieren.

Im Jahr 2013 wurde durch Audi das Matrix-LED-System vorgestellt. Die Idee dieses Systems ist es, durch das Ausschalten oder Dimmen einzelne LED auszublenden. So kann zum Beispiel der Gegenverkehr ausgeblendet werden, ohne das Fernlicht komplett ausschalten zu müssen. Der Vorteil an LED-Scheinwerfern ist, dass keine mechanischen Elemente mehr eingesetzt werden müssen, sondern die Lichtverteilung ausschließlich über die elektronische Ansteuerung erfolgt. Ein Jahr später wurde das Matrix-LED-Licht mit Laserfernlicht kombiniert. Dieses System kann bis zu 500 m weit strahlen und findet vorwiegend Anwendung bei BMW [3].

In der aktuellen Forschung werden hochauflösende Scheinwerfersysteme umgesetzt. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass es sich um optomechatronische Systeme handelt. Das heißt, dass nicht nur die Mechatronik, sondern auch die Optik Einfluss auf die Lichtverteilung nimmt. Es sollen nicht nur einzelne Bereiche ausgeblendet werden, sondern die Technologie soll es ermöglichen, Informationen wie beispielsweise Gefahrenzeichen oder Hinweise auf die Straße zu projizieren, **BILD 2**. Mit diesen Informationen soll u. a. dem Fahrer die Fahraufgabe erleichtert werden [4].

3.4 Unfallrekonstruktion

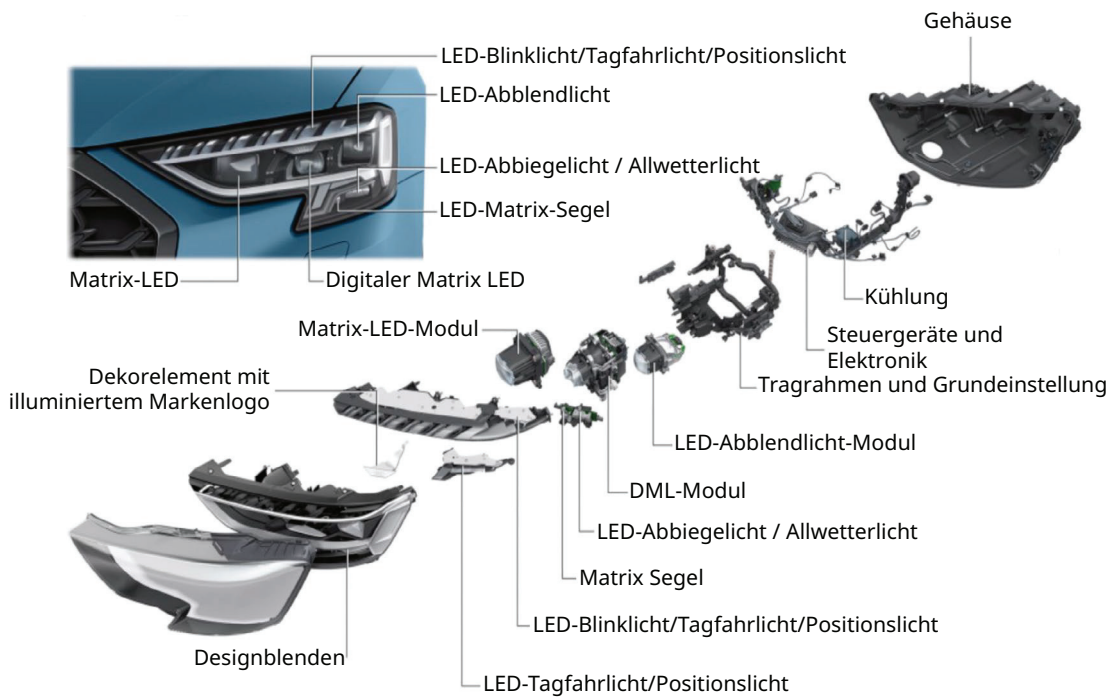


BILD 3: Aufbau des Digital-Matrix-LED-Scheinwerfers von Audi [5]
FIGURE 3: Design of the Audi digital matrix LED headlamp [5]

Die Lichtverteilung hängt von vielen verschiedenen Parametern ab, welche über verschiedene Sensoren ermittelt werden. Für die Erfassung der Umgebung werden eine oder mehrere Frontkameras, Radar- und Lidar-Sensoren eingesetzt. Hierbei werden unter anderem Verkehrsschilder, andere Verkehrsteilnehmer und Fahrstreifen sowie weitere Umgebungsdaten erkannt. Die fahrzeugbezogenen Daten wie Geschwindigkeit, Lenkwinkel und Beschleunigung werden über weitere Sensoren ermittelt. Mit der sogenannten Car-to-X-Kommunikation kann sich das Fahrzeug mit anderen Fahrzeugen vernetzen und Informationen der Infrastruktur erhalten. Diese Vernetzung funktioniert über Funk oder Internet. Durch das Sammeln dieser Daten in einem Steuergerät kann der Scheinwerfer die Lichtverteilung anpassen. So kann eine intelligente, an die Fahrsituation angepasste Lichtverteilung in den Verkehrsraum projiziert werden [4].

Als erstes „digitales“ Licht brachte Audi 2022 mit dem Facelift des Audi A8 das Digital-Matrix-Licht auf den Markt. In diesem LED-Scheinwerfer ist die DMD-Technologie (Digital Micromirror Device) integriert, das

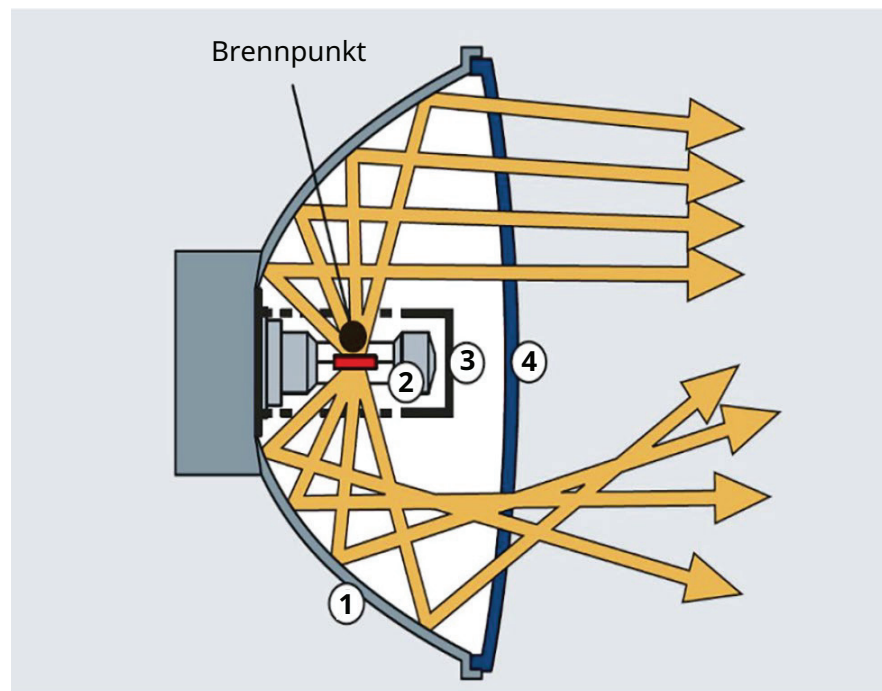


BILD 4: Die Lichtablenkung und Streuung des Freiflächenscheinwerfers in der Draufsicht [15]

FIGURE 4: The light deflection and scattering of the free-form headlamp in plan view [15]

heißt, 1,3 Mio. Mikrospiegel sorgen für eine sehr präzise Lichtverteilung. Diese Mikrospiegel befinden sich im DMD-Modul auf einem etwa brief-

markengroßen Chip. Die Flexibilität wird durch das schnelle Kippen (bis zu 5000-mal pro Sekunde) der Spiegel realisiert.

Möglich wird dies durch elektrostatische Felder, die jeden einzelnen Spiegel kippen lassen können. Für die Lichtverteilung auf der Straße wird das Licht von den Spiegeln auf die Linsen gebracht und von dort auf die Straße. Um eine Ausblendung zu ermöglichen, wird das nicht benötigte Licht in einen Absorber geleitet.

Mithilfe dieser Technologie ist es nicht nur möglich, ein sehr präzises Lichtbild zu generieren, sondern Informationen oder Warnhinweise mit hoher Auflösung auf die Straße zu projizieren. In **BILD 3** ist der Aufbau des beschriebenen Scheinwerfersystems dargestellt [5].

2.2 Scheinwerfersysteme

Die Scheinwerfersysteme lassen sich heute nicht mehr nur anhand ihrer Leuchtmittel und deren Weiterentwicklung differenzieren. Es gibt auch unterschiedliche lichttechnische Konzepte und Bauweisen. Grundsätzlich lassen sich die Scheinwerfersysteme in Reflexions- und Projektionssysteme unterteilen, **BILD 4** und **BILD 5**. Als neue Kategorien sind die adaptiven Scheinwerfersysteme aufzuführen.

Aktuell geht die Entwicklung immer weiter in Richtung „digitaler“ Scheinwerfersysteme. Dies bedeutet, dass die Systeme immer mehr mit der Umwelt interagieren und die Ausleuchtung

spezifisch anpassen. Der erste Schritt in diese Richtung ist das Matrix-LED-System. Dieses System ermöglicht es, dass nicht immer von Fernlicht auf das Abblendlicht umgeschaltet werden muss, wenn Verkehr entgegenkommt oder andere Fahrzeuge vorausfahren. Im Gegensatz zum Xenon-Scheinwerfer wird hier nicht mechanisch über Klappen die ganze linke Fahrbahnseite ausgeblendet, sondern es können einzelne Bereiche, zum Beispiel ein Fahrzeug oder die Insassen des Fahrzeugs ausgeblendet werden.

In **BILD 6** ist zu erkennen, wie die einzelnen LEDs angesteuert und gedimmt werden können. Durch das Abschalten oder Dimmen der LEDs ist eine präzise Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer möglich [6].

Bei schlechtem Wetter wird der von der nassen Fahrbahn reflektierende Bereich gedimmt. Außerdem kann bei Verkehrsschildern, die eine Eigenblendung verursachen, die Reflexion vermindert werden, indem die Helligkeit ausgewählter Leuchtdioden reduziert wird. Mit diesem System werden die dynamischen Lichtmodi rein elektronisch eingestellt. Zum Erreichen der richtigen Straßenausleuchtung werden auch hier Projektionsmodule oder Reflektoren verwendet. Die Informationen aus der Umwelt erhält das System unter anderem über ein Frontkammersystem, sodass die Daten per Datenbus mit den Steuergeräten der Scheinwerfer kommunizieren [6].

Wie bereits angemerkt, wird auch dieses Matrix-System weiterentwickelt, um eine noch präzisere Aus-

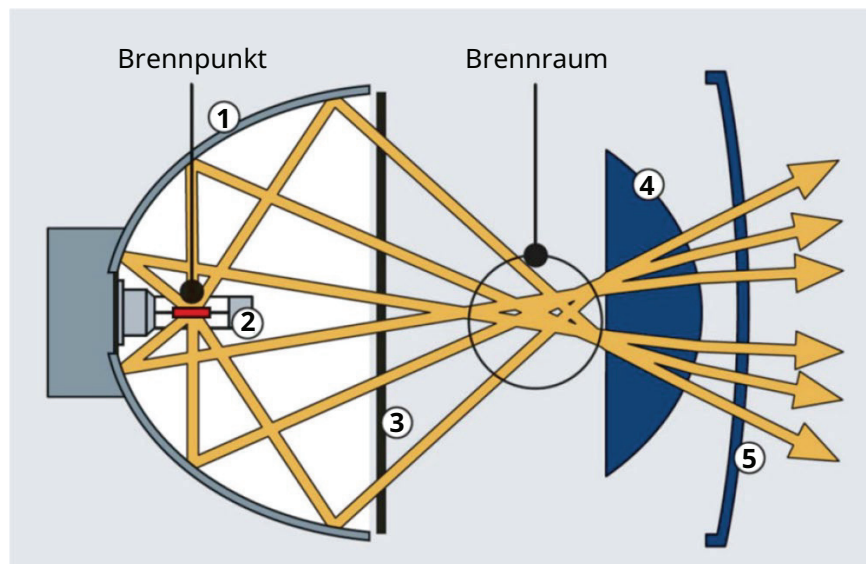


BILD 5: Der Strahlengang und die Lichtkonzentration im Brennraum des Ellipoidscheinwerfers in der Draufsicht [15]

FIGURE 5: The beam path and light concentration in the combustion chamber of the ellipsoidal headlamp in plan view [15]

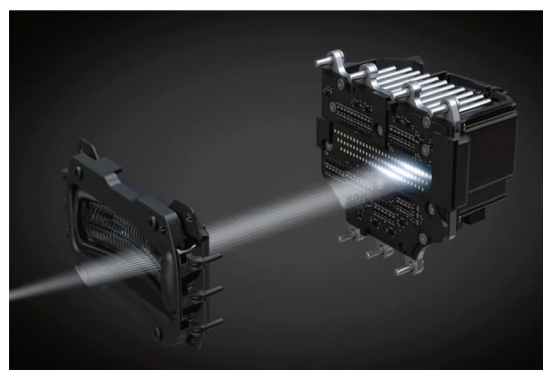
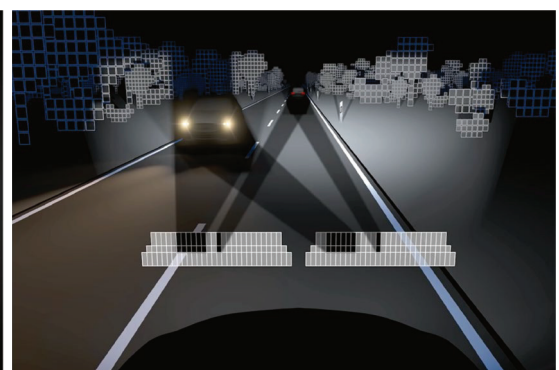


BILD 6:

Ansteuerung einzelner LEDs in der LED-Matrix [16]
FIGURE 6: Control of individual LEDs in the LED matrix [16]

(a) LED-Matrix



(b) Abschaltung einzelner LEDs

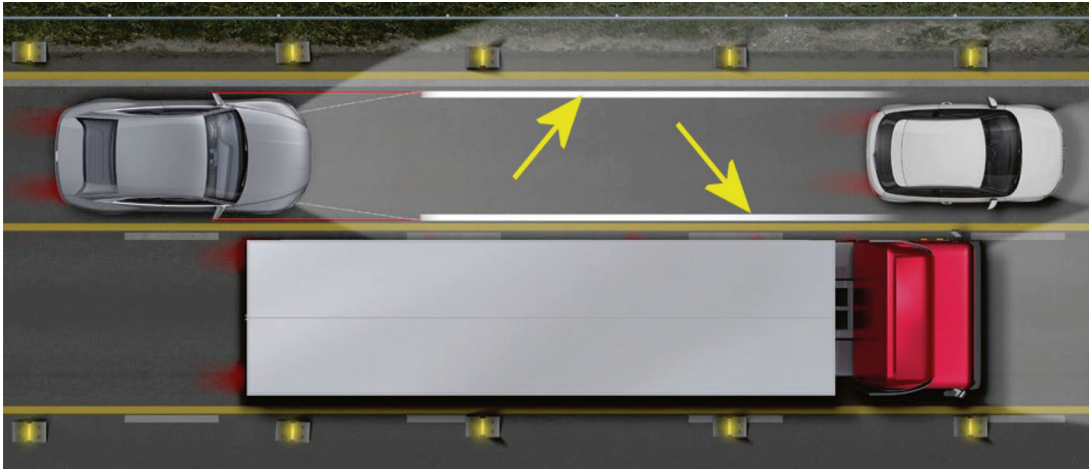


BILD 7: Spurprojektion durch das Scheinwerfersystem auf die Straße [1]
FIGURE 7: Track projection by the headlamp system onto the road [1]

leuchtung zu erreichen. Mögliche Szenarien wären, dass nicht mehr das gesamte Fahrzeug, sondern nur der Scheibenbereich ausgeblendet wird oder Gefahrenzeichen auf die Straße projiziert werden. Außerdem können die Systeme die Assistenzsysteme erweitern. Ein Beispiel ist in **BILD 7** dargestellt: Ein Fahrzeug möchte in einer engen Baustelle einen Lkw überholen. Damit die Spur besser eingeschätzt werden kann, werden Linien die Fahrspur auf die Fahrbahn projiziert [1].

Bei adaptiven Systemen wird das Fernlicht erst ab einer bestimmten Geschwindigkeitsschwelle eingeschaltet und unter einer weiteren Geschwindigkeitsschwelle wieder auf Abblendlicht zurückschaltet. Außerdem wird das adaptive Fernlicht in verschiedenen Situationen ausgeschaltet, wie in geschlossenen Ortschaften oder bei einer ausreichend hellen Umgebung [1].

3 Klassische licht-technische Untersuchung

Die LTU ist eine Methode der Unfallrekonstruktion, um die Erkennbarkeitsentfernungen von Objekten – im Allgemeinen bei Dunkelheit – zu ermitteln. Die Sichtbarkeit von Objekten ist dabei abhängig von vielen Faktoren. Die Umgebungsleuchtdichte, bedingt durch zum Beispiel Straßenlaternen oder beleuchtete Schaufenster, ist maßgeblich für die Adaption des Auges.

Die Adaption des Auges beeinflusst die Schwellenleuchtdichte, al-

so die Empfindlichkeit des Auges, ab der Leuchtdichtedifferenzen wahrgenommen werden können. Gerade in unbeleuchteten Bereichen sind die Scheinwerfer maßgebend für die Ausleuchtung, sodass die Einstellung und der Zustand, wie Verschmutzungsgrad oder Kratzer, einen großen Einfluss auf die Erkennbarkeit haben können.

Bei einer Sichtuntersuchung sind generell äußere Einflüsse wie die Witterung (Sonnenstand, Regen, Nebel etc.) oder die Blendung durch den Gegenverkehr zu beachten. Aufgrund vieler Einflussfaktoren kann die Erkennbarkeit in der Dunkelheit nicht mit einem Standardwert angenommen werden, sondern bedarf einer individuellen Untersuchung [7].

Um ein möglichst präzises Ergebnis zu bekommen, ist es wichtig, die Situation so genau wie möglich nachzustellen. Aus anderen Blickwinkeln oder einer abweichenden Position des Fußgängers kann eine andere Erkennbarkeitsentfernung resultieren. Daher wird der Unfall zunächst soweit möglich analysiert und rekonstruiert. Dazu gehören die Bestimmung des Kollisionsorts und die Kollisions- beziehungsweise Annäherungsgeschwindigkeiten.

Aus den daraus erstellten Weg-Zeit-Zusammenhängen können die Relativpositionen rekonstruiert werden. Diese Relativpositionen sind wichtig für die LTU vor Ort, also für den Versuchsaufbau. Wenn es zum Unfallzeitpunkt

geregnet hat, ist es nicht sinnvoll, den Versuch auf trockener Fahrbahn nachzustellen. Unfälle bei Dämmerung sind zur gleichen Zeit (bei gleicher Helligkeit) zu untersuchen. Für die Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernung des Fußgängers auf der Fahrbahn sollte ein vergleichbares Fahrzeug für den Versuch gewählt werden.

Steht das Unfallfahrzeug nicht mehr zur Verfügung, sollte ein möglichst ähnliches Fahrzeug gewählt werden, welches das gleiche Scheinwerfersystem hat, damit die Ausleuchtung der Straße und Umgebung möglichst situationsnah zum Unfallzeitpunkt ist [7].

Zur Untersuchung am Unfallort wird der Kollisionsort als Nullpunkt gesetzt. Davon ausgehend werden Markierungen auf den Boden gebracht, um die Entfernung zum Kollisionsort zu verdeutlichen. Hierbei wird in der Regel alle 5 bis 10 m eine Markierung auf die Fahrbahn gekreidet. In der Entfernung, in der man die Erkennbarkeitsentfernung vermutet, können die Abstände entsprechend kleiner gewählt werden.

Das Ziel der Nachstellung der Situation ist es, den Leuchtdichteunterschied des Fußgängers (oder eines anderen Kollisionspartners) zum Hintergrund zu ermitteln. Zur Messung der Leuchtdichten wird das Fahrzeug schrittweise den Markierungen entsprechend dem Kollisionsort angenähert.

Im Verhältnis dazu ergibt sich die dazugehörige Position des Fußgängers aus der unfallanalytischen Rekonstruktion. Bei diesem statischen Versuchs-

aufbau wird das Fahrzeug an die auf der Fahrbahn markierten Entfernungen gefahren. Hier wird aus dem Stand die Leuchtdichte des Fußgängers und dessen Hintergrund gemessen, um die Leuchtdichtedifferenz vom Fußgänger zu seiner Umgebung ermitteln zu können. Dies kann mit einem Leuchtdichtemessgerät erfolgen oder mit einer kalibrierten Digitalkamera [8].

Die ersten lichttechnischen Untersuchungen wurden mit Leuchtdichtemessgeräten vorgenommen. Diese Untersuchung ist nur statisch möglich, da die Messung bei einem solchen Gerät einige Sekunden dauert. Außerdem sind Leuchtdichtemessgeräte relativ teuer, sodass für die Rekonstruktion nach einer Alternative gesucht wurde. Dies wurde durch eine Kalibrierung von Kameras ermöglicht.

In der dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Untersuchung wurden die Leuchtdichten mithilfe einer kalibrierten Digitalkamera ermittelt. Im Nachgang einer solchen Messung wurden die Bilder ausgewertet. Wie die Auswertung erfolgt, wird im weiteren Verlauf der Veröffentlichung näher erläutert.

4 Dynamische lichttechnische Untersuchung

4.1 Zielsetzung und Lösungsansatz

Ziel der Arbeit war es, eine Methode zu entwickeln, bei der eine LTU mit adaptiven Lichtsystemen möglich ist. Der Lösungsansatz ist die Durchführung einer „dynamischen“ lichttechnischen Untersuchung. Hierzu wird das beteiligte Fahrzeug mit einer möglichst geringen Geschwindigkeit gefahren – gering genug, um das Fotografieren zu ermöglichen, aber hoch genug, damit das dynamische Lichtsystem funktioniert.

Für eine Aufnahme während der Fahrt müssen die Kameraeinstellungen angepasst und die Distanz zwischen Fahrzeug und Fußgänger zum Zeitpunkt der Bildauslösung bestimmt werden. Zur Evaluierung der Methode wurden statische und dynamische Versuche durchgeführt. Die Ergebnis-



BILD 8: Übertragung der Variablen ins aufgenommene Bild

FIGURE 8: Transfer of the variables into the recorded picture

se der Versuche wurden miteinander verglichen und diskutiert.

4.2 Bestimmung der Pkw-Position

Wie bereits beschrieben, muss die Entfernung des Pkw zum Objekt während der Aufnahme des Sichteindrucks bekannt sein. Wird das Lichtbild während der Fahrt aufgenommen, so ist diese Information nicht mehr ohne weiteres bekannt.

In Versuchen hat sich gezeigt, dass die GPS-Daten der Kamera nicht genau genug sind, um diese für die Entfernung des Pkw zum Aufnahmezeitpunkt heran zu ziehen. Zwar sind hochgenaue und schnelle GPS-Empfänger am Markt verfügbar, allerdings nur zu Preisen, die eine wirtschaftliche Durchführung der LTU nicht ermöglichen. Daher wird zur Bestimmung der Entfernung des Pkw das Bild nachträglich optisch ausgewertet.

Um den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Pixel im Bild und der Entfernung zu einem Objekt darzustellen, wird GLEICHUNG 1 verwendet. Dabei ist B die Größe des entstehenden Bilds und G die Objektgröße. Die Variablen b und g geben die entsprechenden Entfernungen dazu an. Das

heißt, g ist der Abstand vom Gegenstand bis zur Mitte der Linse und b ist der Abstand von der Mitte der Linse bis zum Bild. Dabei ist b im Fall der Kamera die Brennweite und die Bildgröße ist definiert durch den Sensor der Kamera.

Die zuvor beschriebenen Variablen der Gleichung wurden, falls möglich, in ein während der Fahrt aufgenommenes Lichtbild übertragen, BILD 8.

Der Abstand, der bestimmt werden soll, ist also der Abstand zwischen dem Gegenstand und der Linse g . Stellt man nun die Formel entsprechend um, erhält man GLEICHUNG 2. Das negative Vorzeichen in der Formel gibt an, dass das Bild hinter der Linse umgekehrt zum Gegenstand ist. Das heißt, man erhält am Ende eine negative Entfernung, also die Entfernung vor der Linse. Aus Gründen der Einfachheit wird im Folgenden auf das negative Vorzeichen verzichtet,

$$V = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$g = -G \cdot \frac{b}{B} \quad (\text{Gl. 2})$$

sodass mit positiven Entfernungen gerechnet werden kann.

Die Brennweite der Kamera wird standardmäßig mit dem Formelbuchstaben f beschrieben. Da in diesem Fall die Bildentfernung zur Linse b der Brennweite entspricht, wird im Folgenden der Buchstabe b durch f ersetzt. Außerdem wird g durch ein d für distance ersetzt. So erhält man als neues Zwischenergebnis **GLEICHUNG 3**.

Die Objektgröße G steht in diesem Fall für den Abstand der Referenzpunkte in Querrichtung zur Straße, siehe die Einzeichnung in Bild 8 mit einer gemessenen Breite von 6 m. Also ist dies der auf der Straße eingemessene Abstand der Referenzpunkte zueinander.

Auf dem Bild kann der Abstand der Punkte durch die Anzahl der Pixel, die sich zwischen den Punkten befinden, dargestellt werden. Die in dieser Arbeit verwendete Kamera hat eine Bildgröße von 3872×2592 Pixel.

Da sich die Ausdehnung des Objekts auf die x -Richtung beschränkt, ist für die Berechnung nur die Bildbreite mit 3872 Pixel wichtig. Die Sensorbreite der Kamera beträgt 23,6 mm. Dies ist der Wert, der für B eingesetzt wird. Allerdings füllt das Objekt nicht das ganze Bild in der Breite aus, sodass dieser Wert anteilig einzusetzen ist.

Diese errechnet sich aus dem Verhältnis der Sensorbreite zur Bildbreite. Das heißt, ein Pixel hat die Größe $G_p = 23,6 \text{ mm} / 3872 \text{ Px} \approx 6,09 \mu\text{m}$. Dieser Wert kann nun mit der entsprechenden Anzahl an Pixel multipliziert werden, die im Bild bestimmt wurden. Setzt man hier die Pixelanzahl der

Bildbreite ein, so erhält man wieder die Sensorbreite. Eine Übersicht über die Kennwerte der in dieser Untersuchung verwendeten Kamera ist in **TABELLE 1** dargestellt.

Als letzter Schritt muss berücksichtigt werden, dass sich die Kamera nicht an der Front des Fahrzeugs befindet, sondern in etwa auf Höhe des Kopfs des Fahrers. Das heißt, hier ergibt sich ein Offset. Damit der Abstand zwischen Fahrzeugfront und Fußgänger bestimmt werden kann, muss der Wert für den Offset gemessen und abgezogen werden. Somit ergibt sich final die **GLEICHUNG 4**.

4.3 Kalibrierte Digitalkamera

Die Messung der Leuchtdichte kann im dynamischen Fall mithilfe einer kalibrierten Standard-Digitalkamera erfolgen. Um eine Kamera zu kalibrieren, werden bekannte Leuchtdichten mit dieser Kamera und festen Kameraeinstellungen fotografiert. Wird nun im Rahmen einer LTU ein Lichtbild mit derselben Kameraeinstellung aufgenommen, so können über die Bildhelligkeit des Objekts im Foto die Leuchtdichten des Objekts bestimmt werden. Eine einfache Kamerakalibrierung kann somit mithilfe eines Leuchtdichtemessgeräts und verschiedenen Graustufen erfolgen.

Tatsächlich führt eine solche Kalibrierung zu erheblichen Ungenauigkeiten. Eine professionelle Kalibrierung

bietet die Firma Image Engineering in Frechen an. Die genaue Methode der Umrechnung des Bildhelligkeit in eine Objektleuchtdichte durch die Kalibrierung der Kamera wurde bereits in [8] beschrieben und kann für Interessierte dort nachvollzogen werden.

In **BILD 9** ist die für die Versuche eingesetzte Kamera Minolta D200 während der Kalibrierung gezeigt. In der Bildmitte ist ein Graustufenbild zu sehen, das von hinten mit einer Ulbrichtkugel beleuchtet wird. Im Rahmen dieser Kalibration erfolgt auch eine $V(\lambda)$ -Anpassung. Im Ergebnis ist es möglich, aus den RGB-Werten des Sensors mithilfe eines Excel-Sheets oder einer Software (zum Beispiel PC-Rect) die Leuchtdichte zu berechnen. Die absolute Genauigkeit bei einer kalibrierten Kamera beträgt ca. 5%. Bei einer typgleichen Kamera, die mit der gleichen Kalibrierung betrieben wird, ist ein zusätzlicher Fehler von rund 3% anzusetzen. Die relativen Genauigkeiten sind so gut, dass sie im Rahmen der sonstigen Ungenauigkeiten einer LTU nicht ins Gewicht fallen [11].

Um aus einem Pixel die Leuchtdichte zu generieren, ist die Kalibrierung der Kamera notwendig. Dort wird jedem RGB-Wert einzeln eine Leuchtdichte zugeordnet. Ebenfalls erhält man aus der Kalibrierung die Gewichtung der Leuchtdichten einzelner RGB-Farben. Somit errechnet sich die Leuchtdichte für einen RGB-Pixel nach **GLEICHUNG 5**.

TABELLE 1: Kennwerte der verwendeten Kamera

TABLE 1: Characteristic values of the camera used

Kennwert	verwendete Kamera
Kamera	Nikon D200
Brennweite	30 mm
Bildgröße	3872 × 2592 Pixel
Sensogröße	23,6 mm × 15,8 mm

$$d = G \cdot \frac{f}{B} \tag{Gl. 3}$$

$$d = \frac{G \cdot f}{G_p \cdot P} - o \tag{Gl. 4}$$

mit

- d : Distanz zwischen Fahrzeug und Objekt
- G : Objektgröße (gemessener Abstand zwischen den Referenzpunkten)
- f : Brennweite der Kamera
- G_p : Pixelgröße auf dem Sensor der Kamera
- P : Anzahl der Pixel zwischen den Referenzpunkten auf dem Bild
- o : Offset der Kamera zur Fahrzeugfront

$$L_D = 0,2126 \cdot L(\text{Pixel}_R) + 0,7152 \cdot L(\text{Pixel}_G) + 0,0722 \cdot L(\text{Pixel}_B) \tag{Gl. 5}$$



BILD 9: Kamera bei der Kalibrierung mit einer Ulbrichtkugel
FIGURE 9: Camera calibrated with an Ulbrichtkugel

Die in der Formel aufgeführten Faktoren ergeben sich ebenfalls aus der Kalibrierung und sind für jede Kamera individuell. Allerdings sind die Faktoren bei allen Kameras ähnlich.

4.4 Auswertung des Sichtbereichs

Die Auswertung der Erkennbarkeitserkennung erfolgte über den Kontrast zwischen Objekt und Hintergrund. Ist der Kontrast groß genug, kann ein Objekt demnach erkannt werden, so spricht man von der Überschreitung der Schwellenleuchtdichte.

Zur Beurteilung der Erkennbarkeit wird die Leuchtdichtedifferenz aus

der Leuchtdichte der Person und dem entsprechenden Hintergrund errechnet. Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob die Leuchtdichtedifferenz ausreicht, um die Person erkennen zu können, wird diese mit einer Schwellenleuchtdichte verglichen. Die Schwellenleuchtdichte ist die Leuchtdichtedifferenz, ab welcher es möglich ist, die Person zu erkennen.

Aus verschiedenen experimentellen Messungen unter Laborbedingungen wurden von Berek und später von Adrian Gesetzmäßigkeiten hergeleitet. Die Berek'schen Kurven stellen die Schwellenleuchtdichtedifferenz in Abhängigkeit von der Umgebungsleucht-

dichte und dem Sehwinkel dar. Dabei ist festzuhalten: Je größer der Sehwinkel, also je geringer der Abstand zum Objekt, desto kleiner sind die Schwellenleuchtdichtedifferenz um das Objekt erkennen zu können [12]. Ein solches Berek'sches Diagramm ist in **BILD 10** dargestellt.

Ob ein Objekt erkannt werden kann, hängt außerdem davon ab, wie lang die Darbietungszeit ist und welche Gestalt das Objekt aufweist [13]. Die experimentellen Untersuchungen, auf die die Schwellenleuchtdichten zurückgehen, fanden unter Laborbedingungen statt. Das heißt, die Testpersonen befanden sich in einer Umgebung

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

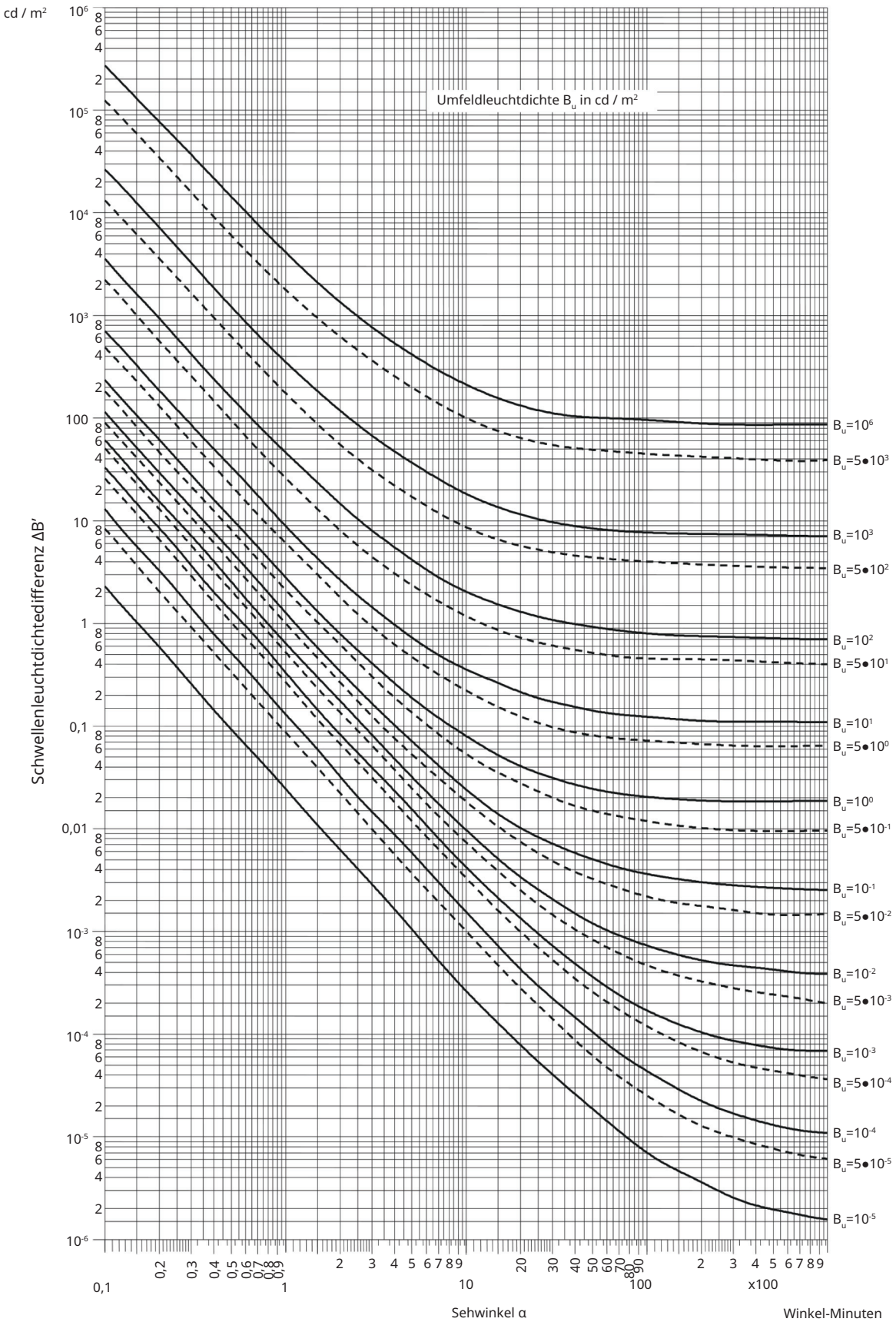


BILD 10: Berechesches Diagramm nach DIN 5037

FIGURE 10: Calculated diagram according to DIN 5037

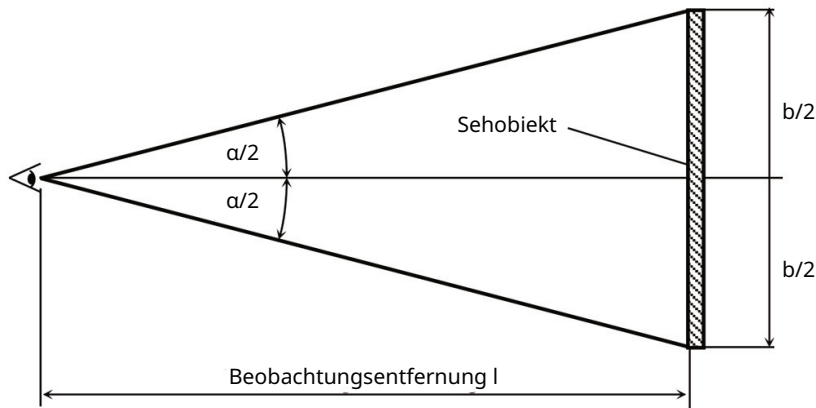


BILD 11: Zusammenhang von Sehwinkel und Beobachtungsentfernung
FIGURE 11: Correlation between angle of view and observation distance

ohne weitere Lichteinflüsse und müssen sich nur auf einen bestimmten Bereich konzentrieren.

Dies bedeutet, dass die Ergebnisse dieser Untersuchung die Schwellenleuchtdichte darlegen, ab wann ein Objekt gerade noch erkannt werden kann, wenn man sich nur darauf kon-

zentriert und das Auge auf die Umgebungsleuchtdichte adaptiert ist.

Möchte man nun diese Untersuchungen zugrunde legen, um die Erkennbarkeit eines Objekts im Straßenverkehr zu ermitteln, so müssen weitere Einflüsse berücksichtigt werden. Im Straßenverkehr muss die Be-

leuchtungssituation berücksichtigt werden und dass der Fahrer mehrere Fahraufgaben zu erfüllen hat, sodass er sich nicht ausschließlich auf ein bestimmtes Objekt konzentrieren kann, bis es sichtbar wird. Diese Einflüsse werden durch Praxisfaktoren berücksichtigt. Die Schwellenleuchtdichten werden mit diesen in Abhängigkeit von den äußeren Einflüssen multipliziert.

Üblicherweise wird der Praxisfaktor 3 für eine gleichmäßig ausgeleuchtete Unfallstelle angenommen. Für mehrere Lichtquellen in der Umgebung des Fußgängers wird der Praxisfaktor 4 angesetzt, wenn die Kurven von Berek zugrunde gelegt werden. So werden bei einem Verkehrsunfall die vor Ort gemessenen Leuchtdichtedifferenzen mit den durch die Praxisfaktoren angeglichenen, theoretischen Schwellenleuchtdichten verglichen [8].

In **BILD 11** ist der Zusammenhang von Sehwinkel und Beobachtungsentfernung skizziert. Geometrisch

Noch einfacher qualifizierte Mitarbeiter finden.

Stellenanzeige PLUS: Jetzt Zusatzleistungen zum günstigen Paketpreis buchen!



Weitere Informationen unter: [autojob.de/stellenanzeige-plus](https://www.autojob.de/stellenanzeige-plus)



(a) Auswertung in 100 m Entfernung mit Umgebungsleuchtdichte L_u



(b) Auswertung in 30 m Entfernung

BILD 12: Beispiel einer Auswertung mit dem Programm Measure Light in 100 m und 30 m Entfernung

FIGURE 12: Example of an evaluation with the Measure Light programme at a distance of 100 m and 30 m

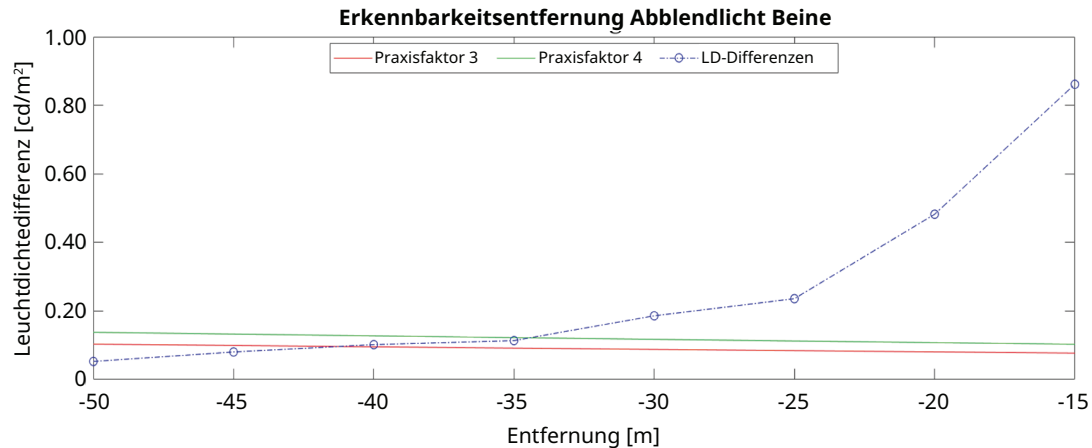


BILD 13: Beispiel für das SI-Diagramm
FIGURE 13: Example of the SI diagram

besteht der Zusammenhang nach **GLEICHUNG 6**. Die Erkennbarkeitsentfernung kann über ein Soll-Ist-Diagramm dargestellt werden. Hierbei werden die Leuchtdichtedifferenzen zwischen Objekt und Hintergrund bei verschiedenen Beobachtungsentfernungen der Schwellenleuchtdichte, gewichtet mit den Praxisfaktoren, in einem Diagramm gegenübergestellt. Somit kann dem Diagramm entnommen werden, ab welcher Entfernung die Leuchtdichtedifferenz vom Objekt zum Hintergrund den Schwellenwert mit der Gewichtung der Praxisfaktoren überschreitet. An diesem Punkt ist der Fußgänger erstmalig erkennbar.

$$\alpha = 2 \cdot \arctan \frac{b}{l} \quad (\text{Gl. 6})$$

4.5 Computergestützte Auswertung

Die Leuchtdichten aus den aufgenommenen Lichtbildern wurden mithilfe einer Software bestimmt. In der Software wurden die Berekschen Kurven zur Auswertung der Erkennbarkeitsentfernung herangezogen. Außerdem sind die Kalibrierungsdaten der verwendeten Kamera hinterlegt, sodass das Programm anhand von Bildern die Leuchtdichten ermitteln kann.

Dazu wird ein Bild in die Software geladen und es werden die Bereiche markiert, welche untersucht werden sollen. In der Regel handelt es sich bei einem Fußgänger um die Erkennbarkeit der Beine und des Oberkörpers.

Die Kameraeinstellungen zur Beleuchtung, Blende, ISO-Wert sowie Brennweite entnimmt das Programm aus den EXIF-Daten. Außerdem müssen der Abstand sowie für jedes Einzelbild die Größe des Objekts an das Programm händisch übergeben werden. Beim ersten Bild der Untersuchungsreihe muss ein Bereich für die Umgebungsleuchtdichte markiert werden. Dieser liegt in dem Bereich vor dem Fahrzeug, auf den der Fahrer während der Fahrt fokussiert ist.

In **BILD 12** ist exemplarisch dargestellt, wie die Auswertung der Leuchtdichte in den Bildern erfolgt. In Bild 12 oben wurde mit dem gelben Rechteck der Bereich für die Umgebungsleuchtdichte festgelegt. Die roten Rechtecke markieren den Oberkörper sowie dessen Hintergrund und die blauen Rechtecke die Beine mit dem entsprechenden Hintergrund. Diese sind ebenfalls in Bild 12 unten zu erkennen. Die Zahl 1 bedeutet, dass der Oberkörper als Erstes markiert wurde, und hat daher auch das O für Objekt neben der Zahl. Das H steht für Hintergrund.

Die Beine werden im zweiten Schritt markiert. Hierbei ist es wichtig, dass die Rechtecke möglichst nur den zu er-

kennenden Bereich markieren. Umso mehr Hintergrund in den Rechtecken mit erfasst wird, desto ungenauer wird das Ergebnis, da das Programm die durchschnittliche Leuchtdichte für jedes Rechteck bestimmt.

Wurden alle Bilder der verschiedenen Entfernungen in das Programm eingelesen und mit den entsprechenden Markierungen versehen, kann die Erkennbarkeitsentfernung ausgewertet werden. Hierbei erstellt das Programm automatisch Diagramme zu den Berekschen Kurven und SI-Diagramme zur Erkennbarkeit des Oberkörpers und der Beine.

In **BILD 13** ist ein solches SI-Diagramm dargestellt. Die blauen Punkte zeigen die gemessene Leuchtdichtedifferenz der Beine zum Hintergrund. Mit der Verbindungslinie wird das Auge geführt. Es handelt sich hierbei um keine aufgenommenen Messwerte. Die rote Gerade stellt die mit dem Praxisfaktor 3 gewichtete Schwellenleuchtdichte in Abhängigkeit von der Entfernung dar. Das heißt, die aus den Berekschen Kurven ermittelten Werte für die Schwellenleuchtdichtedifferenz werden mit dem Faktor 3 multipliziert. Die grüne Gerade stellt die mit dem Praxisfaktor 4 gewichtete Schwellenleuchtdichte dar. Ist die Leuchtdichtedifferenz vom Objekt zum Hintergrund größer als die durch die Praxisfaktoren gewichtete Schwellenleuchtdichte, so ist das Objekt erkennbar.

Teil 2 des Beitrags erscheint in VKU 12/2023 und geht auf die dynamische lichttechnische Untersuchung an einem VW Touareg und einer Mercedes-Benz S-Klasse ein.

Literaturhinweise

- [1] Huhn, Wolfgang; Hamm, Michael; Berlitz, Stephan; Omerbegovic, Said: Digitales Licht Von der Matrix zum Mikrospiegel. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 120 (2018), Nr. 2, 18–25. <http://dx.doi.org/10.1007/s35148-017-0208-4>. – DOI 10.1007/s35148-017-0208-4. – ISSN 0001-2785.
- [2] Pischinger, Stefan; Seiffert, Ulrich: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-25557-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-25557-2>. – ISBN 978-3-658-25556-5.
- [3] Wiesinger, Johannes: Geschichte des Autolichts (10.09.2019). <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/kurzgeschichte-des-autolichts/>.
- [4] Knöchelmann, Marvin; Ley, Peer-Phillip; Kloppenburg, Gerolf; Mozgova, Iryna; Lachmayer, Roland: Methodische Entwicklung eines opto-mechatronischen Systems am Beispiel eines hochadaptiven Fahrzeugscheinwerfers. Online: https://www.repo.uni-hannover.de/bitstream/handle/123456789/4725/VDI_Mechatronik_Paper_final.pdf?sequence=1.
- [5] Deleker, Joachim: Assistenz-, Sicherheits- und Komfortsysteme. <https://professional.auto-motor-und-sport.de/assistenz/neuer-digital-matrix-led-scheinwerfer-von-audi/>, Onlineabruf am 27.08.2022.
- [6] HELLA: Audi A6 Matrix LED Scheinwerfer. <https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Beleuchtung/LEDScheinwerfer/Audi-A6-Matrix-LED-Scheinwerfer-61322/>. Version: 2021.
- [7] Hugemann, Wolfgang (Hrsg.): Unfallrekonstruktion. Kapitel „Der Dunkelheitsunfall“, Klaus Schmedding. Münster: Verlag Autorensteam, 2007. ISBN 3-00-019419-3.
- [8] Hoger, Tim: Lichttechnische Untersuchungen mit einer Standard-Digitalkamera. In: VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (2016). <https://www.ureko.de/wp-content/uploads/2019/12/2016-02-Lichttechnische-Untersuchungen-mit-einer-Standard-Digitalkamera.pdf>.
- [9] Litfin, Gerd: Technische Optik in der Praxis: Mit 20 Tabellen. 3. Aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin and Heidelberg: Springer, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/b137974>. <http://dx.doi.org/10.1007/b137974>. – ISBN 3-540-21884-X.
- [10] OpenCV: Camera Calibration and 3D Reconstruction – OpenCV 2.4.13.7 documentation. https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html. Version: 03.03.2023.
- [11] Hugemann, Wolfgang; Zöllner, Henrik: Zur Beurteilung der visuellen Wahrnehmbarkeit mittels digitaler Kameras. In: VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (2020), S. 248–259.
- [12] Berek, Max: Zum physiologischen Grundgesetz der Wahrnehmung von Lichtreizen. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde (1943).
- [13] Adrian, Werner: Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung. In: Lichttechnik 21 (1969).
- [14] Schmedding, Klaus; Becke, Manfred: Das-SBU-Diagramm und die Bestimmung von Erkennbarkeitsentfernungen mit Hilfe des SI-Diagramms. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1990), Nr. 1. <https://www.ureko.de/wp-content/uploads/2019/12/1990.01-Heft-1-Das-SBU-Diagramm-und-die-Bestimmung-von-Erkennbarkeitsentfernungen-mit-Hilfe-des-SI-Diagramms.pdf>.
- [15] HELLA: Scheinwerfer – Bauteile, Typen, Vorschriften. <https://www.hella.com/techworld/de/Technik/Beleuchtung/Scheinwerfer-219/>. Version: 2020.
- [16] YouTube: HELLA Matrix LED System. <https://www.youtube.com/watch?v=YZjFLUuIeqQ&t=46s>. Version: 2016.

Lighting technology investigation of vehicles with adaptive lighting systems

Technical lighting examinations (LTU) are required to determine the recognition distances in the event of accidents in the dark. Up to now, these tests have only been carried out statically. Since newer headlamp systems can dynamically adapt the illumination to the driving situation, a static investigation may no longer be effective. Therefore, a method is needed that enables 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" course at Graz University of Technology and in cooperation with the engineering firm Schimmelpfennig+Becke.

Up to now, an LTU has been carried out with a calibrated camera in a stationary position in order to ensure the long exposure times required in darkness on the one hand and to be able to achieve an exact positioning of the vehicle in relation to the pedestrian on the other. The solution is a dynamic test setup. For validation purposes, the results from the static and dynamic tests were compared.

In Part 1 of the publication, the basics of the static and dynamic photometric investigation are first discussed. In Part 2, the results of the dynamically conducted lighting technology are specifically addressed.

* 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. ::