

Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 66

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving them a 3D appearance as if they are floating above the page.

Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen

von

Christian Jebas
Sven Schellinger
Karsten Klinger
Karl Manz
Dieter Kooß

Universität Karlsruhe (TH)
Lichttechnisches Institut

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 66

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 beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.273/2004:
Optimierung der Beleuchtung von Personewagen und Nutzfahrzeugen

Projektbetreuung
Rainer Krautscheid

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-86509-790-3

Bergisch Gladbach, März 2008

Kurzfassung – Abstract

Optimierung der Beleuchtung von Personewagen und Nutzfahrzeugen

Die hohen Unfallzahlen im nächtlichen Straßenverkehr beweisen die Notwendigkeit guter automobiler Beleuchtungssysteme. Besonders an die Scheinwerfer werden hohe Anforderungen gestellt. Diese sollen neben der Ausleuchtung des Verkehrsraumes für eine gute Erkennbarkeit des Fahrzeuges sorgen. Dabei ist es notwendig, die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Um diese Anforderungen zu erfüllen, muss der Scheinwerfer in der Lage sein, sich auf eine Vielzahl von Faktoren, wie Witterungsbedingungen, Straßengeometrie oder auch Fahrdynamik, einzustellen. Aus diesem Grund ist die Entwicklung eines hochadaptiven Systems das Ziel der Scheinwerferkonstrukteure.

Um dieses Entwicklungsziel zu erreichen, ist eine genaue Betrachtung der Faktoren notwendig, auf die sich ein Scheinwerfersystem einstellen muss. Durch eine exakte Analyse können Zielparameter für optimale Scheinwerfersysteme abgeleitet werden. Im weiteren Schritt gilt es, diese Parameter technisch unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit umzusetzen. Die Ausarbeitung von gesetzlichen Regelwerken stellt den letzten Entwicklungsschritt zur Integration neuer Systeme im Kraftfahrzeug dar.

In modernen Fahrzeugen werden bereits heute Scheinwerfer eingesetzt, die sich bedingt auf gewisse Faktoren einstellen können. Beispiele hierfür sind das dynamische und statische Kurvenlicht oder die dynamische Leuchtweitenregelung. Meist sind diese Systeme aufgrund des höheren Preises nur in Oberklassefahrzeugen zu finden. Eine Integration in jedes Fahrzeug wäre jedoch oftmals sinnvoll, da neben dem erhöhten Komfort für den Fahrzeugführer häufig auch eine Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr erreicht werden kann.

Dieser Bericht beschreibt die Anforderungen an moderne Scheinwerfer und zeigt Möglichkeiten zur technischen Umsetzung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte auf. Dabei werden bereits bestehende Systeme, vor der Markteinführung stehende Systeme sowie Ideen für neue Konzepte diskutiert. Grundlage der Untersuchung sind ausführliche Recherchen und eigene Untersuchungen.

Um subjektive Aspekte zu berücksichtigen, umfasst dieser Bereich die Ergebnisse einer speziell zu diesem Thema durchgeführten Umfrage unter Fahrzeugführern.

Optimisation of lightning for passenger and utility vehicles

The great volume of accidents shows the necessity of a good automotive illumination. Great demands are especially made on a headlamp. In addition to the illumination of the road it should ensure the visibility of the car. Furthermore it's necessary to avoid the glare of other road users. To perform this demands the headlamp must be able to adapt on a multitude of facts like the weather conditions, the geometry of the street or the driving dynamics. So the aim of the design is a high dynamic system.

To reach this aim it's necessary to look at the facts which a headlamp must be able to adapt. Detailed analyses are the base to conclude parameters for optimal headlamp-systems. The next step is the technical realisation of these parameters in consideration of the economy. To work out regulations is the final move to integrate new systems in the car.

Headlamps, which are able to adapt on a few facts are already applied in modern cars. Examples are the dynamic or static swivelling curve light system and the dynamic levelling system. Because of the high price these headlamps can mostly be found in cars of the upper class. Beside the increased comfort of the driver the system would improve the road safety. Because of this an integration in every car would be recommend.

This report describes the requirements of modern headlamps and shows the possibilities for the technical realisation taking regard to the economic aspects. Already existent systems and systems, which are launched soon will be discussed. Furthermore ideas for new concepts will be described. Base of the study are detailed investigations and own researches. To consider subjective aspects the report includes the results of a survey of this topic.

Inhalt

1	Einleitung	7	4.3.2	Regen	26
1.1	Motivation und Ziel	7	4.3.3	Schnee	27
1.2	Struktur des Berichtes	7	4.4	Straßentyp und Streckengeometrie	28
2	Grundlagen automobiler Lichttechnik	8	4.4.1	Straßentyp	28
2.1	Leuchtmittel	8	4.4.2	Streckengeometrie	30
2.1.1	Glühlampe	8	4.5	Fahrdynamik und Beladung	32
2.1.2	Halogen-Glühlampe	8	4.6	Fahrzeugtyp	33
2.1.3	Hochdruck-Gasentladungslampe	9	4.6.1	Personenkraftwagen (Pkw)	34
2.1.4	Niederdruck-Gasentladungslampe	10	4.6.2	Lastkraftwagen (Lkw)	35
2.1.5	Leuchtdiode (LED)	10	4.7	Fahrzeugverschmutzung	36
2.1.6	Organische Leuchtdiode (OLED)	11	4.8	Physiologische und technische Parameter	36
2.2	Optiken	12	4.8.1	Das visuelle System des Menschen	37
2.2.1	Paraboloid-Optiken	12	4.8.2	Technische Sensoren	40
2.2.2	Bifokus- und Multifokusoptiken	13	5	Technische Realisierung	44
2.2.3	Freiformoptiken	13	5.1	Hell-Dunke-Grenze (HDG)	44
2.2.4	Ellipsoid- bzw. Projektionsoptiken	13	5.2	Adaptive Frontbeleuchtungssysteme (AFS)	44
3	Umfragen	14	5.2.1	Variable Lichtverteilungen	45
3.1	Marktstudie des AFS-Projektes	14	5.2.2	Variable Lichtstärken	48
3.2	Umfrage des LTI	16	5.2.3	Dynamische Leuchtweitenregelung	49
3.2.1	Durchführung	16	5.2.4	Dynamisches Kurvenlicht	51
3.2.2	Ergebnisse	17	5.2.5	Statisches Kurvenlicht/ Abbiegelicht	55
3.2.3	Auswertung	20	5.2.6	Pixellicht	55
4	Parameter eines optimalen Scheinwerfersystems	21	5.3	Nachtsichtsysteme	58
4.1	Anforderungen	21	5.4	Tagesfahrlicht	63
4.2	Fahrzeuge im Verkehrsraum	22	6	ECE-Regelungen	66
4.2.1	Minimierung der Blendung	22	6.1	Entstehung einer ECE-Regelung	66
4.2.2	Optimierung des Signalbildes	22	6.2	Notwendige Anpassung für neue Scheinwerfertechnologien	66
4.3	Witterungs- und Sichtverhältnisse	24	6.2.1	Fernlichtassistent	67
4.3.1	Nebel	25			

6.2.2	Leuchtweitenregelung	67
6.2.3	Variable Lichtverteilung	67
6.2.4	Anforderungen an die Messtechnik . . .	67
7	Zusammenfassung	68
8	Literatur	69

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ziel

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes ereignen sich ca. 40 % aller Verkehrsunfälle bei Nacht, obwohl der Anteil der Nachfahrten lediglich 20 % der Gesamtfahrleistung beträgt [JEB06]. Das Risiko, in einen nächtlichen Verkehrsunfall verwickelt zu werden, steigt demnach annähernd um den Faktor drei. Aus dieser Statistik leitet sich die Wichtigkeit einer guten Beleuchtungseinrichtung am Kraftfahrzeug ab. Besonders der Scheinwerfer nimmt hier eine essenzielle Rolle ein.

Die Aufgaben eines Kraftfahrzeugscheinwerfers scheinen zunächst trivial. Primär dient er der Ausleuchtung des Verkehrsraumes für den Fahrzeugführer. Sekundär stellt das Signalbild ein Erkennungsmerkmal für andere Verkehrsteilnehmer dar. So simpel diese Anforderungen auch erscheinen mögen, so können sie doch bedingt durch ständig wechselnde Umfeldfaktoren oftmals nicht zufrieden stellend erfüllt werden. Besonders wechselnde Witterungsbedingungen, aber auch verschiedene Straßengeometrien und die hohe Verkehrsdichte stellen eine große Herausforderung dar. Um der Maxime „Sehen und gesehen werden, ohne jemanden zu blenden“ in jeder Situation gerecht zu werden, muss der Scheinwerfer in der Lage sein, auf Faktoren des Umfeldes zu reagieren.

Bereits seit Beginn der Automobilgeschichte versuchen Ingenieure, die Scheinwerfer am Kraftfahrzeug zu verbessern und somit das Unfallrisiko im Straßenverkehr zu senken. So wurde beispielsweise schon 1908 die erste Abblendeinrichtung für die damals üblichen Acetylscheinwerfer entwickelt. Die Gasflamme wurde zu diesem Zweck mittels Bowdenzug aus dem Brennpunkt des Reflektors verschoben.

Im Laufe der Zeit entwickelte sich der Scheinwerfer stets weiter. Neben dem Einsatz neuer Lichtquellen wurden die Optiken verbessert und es kam zur Implementierung mechatronischer Komponenten. So stellt der moderne Scheinwerfer heute ein komplexes System dar, welches sich bereits bedingt auf wechselnde Faktoren einstellen kann.

Um einen Mindeststandard automobiler Scheinwerfer zu sichern, müssen die Scheinwerfer den internationalen Bau- und Betriebsvorschriften entsprechen. Die Richtlinien der ECE (Economic Commission for Europe) bilden zusammen mit den

EU-Richtlinien eine Basis für die Genehmigung der Scheinwerfer. So bedarf es bei Neuentwicklungen neuer Scheinwerferkonzepte stets einer Überarbeitung bestehender Regelungen, die durch die entsprechenden Prüfstellen im Rahmen der Gutachtererstellung angewendet werden müssen.

Die Entwicklung heutiger Scheinwerfer geht in Richtung hochadaptiver Konzepte, welche sich auf eine Vielzahl von Faktoren einstellen können. Bereits seit einigen Jahren bieten viele Fahrzeughersteller adaptive Systeme, wie beispielsweise das Kurvenlicht an. Solche Systeme sind derzeit optional und somit nicht gesetzlich vorgeschrieben. Neben der technischen Realisierung neuer Ideen ist es notwendig, die bestehenden Regelwerke der ECE hinsichtlich der Zulassungsfähigkeit neuer Konzepte zu überprüfen und ggf. anzupassen. Dieser Bericht ermittelt die Anforderungen an moderne Scheinwerfer und zeigt die technischen Möglichkeiten zur Realisierung auf. Dabei werden bereits umgesetzte Konzepte diskutiert und Möglichkeiten zur Verbesserung dieser Systeme vorgeschlagen. Weiterhin geht dieser Bericht auf das Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit ein, um in der Konsequenz Vorschläge zur Ergänzung bzw. Änderung der gesetzlichen Vorschriften zu machen.

1.2 Struktur des Berichtes

Der Bericht gliedert sich in sieben aufeinander aufbauende Kapitel. Einleitend werden zunächst Grundlagen automobiler Scheinwerfer in Hinsicht auf die verwendeten Leuchtmittel und Optiken aufgezeichnet (Kapitel 2).

Es folgt eine Darstellung der Ergebnisse einer Umfrage, die von einer externen Firma unter Leitung des Lichttechnischen Institutes in Karlsruhe (LTI) durchgeführt wurde (Kapitel 3). Ziel der Umfrage ist die Analyse der vom Fahrzeugführer aufgeführten Probleme und Wünsche in Bezug auf die automobilen Lichttechnik. Dabei wird auch auf eine Marktanalyse, die im Rahmen des AFS-Projektes erstellt wurde, Bezug genommen.

Nachfolgend werden die für die Konzeption eines Scheinwerfers relevanten Faktoren betrachtet und daraus resultierende Anforderungen für ein optimales Scheinwerfersystem abgeleitet (Kapitel 4). Darauf aufbauend folgt die Darstellung von bereits etablierten und potenziell neuen technischen Realisierungsmöglichkeiten zur Erfüllung der im vorher-

gehenden Teil aufgeführten Anforderungen (Kapitel 5).

Im Anschluss wird die Anpassung der ECE-Regelungen erörtert (Kapitel 6). Abschließend folgt eine Zusammenfassung des Berichtes (Kapitel 7).

2 Grundlagen automobiler Lichttechnik

2.1 Leuchtmittel

2.1.1 Glühlampe

Glühlampen sind thermische Strahler. Eine Wendel aus Wolframdraht wird durch elektrischen Strom zum Glühen gebracht. Die Wendel sitzt in einem gasgefüllten Glaskolben. Die Gasfüllung dient zur Verminderung der Schwärzung des Glaskolbens durch verdampfendes Wolfram, wobei dieser Effekt stark von der verwendeten Gasart sowie dem Gasdruck abhängt. Die ausgesandte Strahlung einer Glühlampe besteht zu 94 % aus Wärmestrahlung (Infrarot-Strahlung) und zu 6 % aus für den Menschen sichtbarem Licht.

Die Lebensdauer einer Fahrzeug-Glühlampe liegt je nach Kategorie in der Größenordnung von 100 bis 3.000 Stunden. Die Temperatur der Wendel beträgt 2.500 bis 3.200 Kelvin. Zum Vergleich: Die Sonne hat eine Verteilungstemperatur von ca. 6.500 Kelvin. Durch Erhöhen der Lampenspannung kann die Wendeltemperatur auf bis zu 3.400 Kelvin gesteigert werden. Gleichzeitig sinkt aber die Lebensdauer der Glühlampe, da das Wolfram schneller verdampft und die Bildung so genannter Hot-Spots¹ beschleunigt wird. Das verdampfte Wolfram resublimiert² am kälteren Glaskolben und senkt durch Schwärzung des Glaskolbens die Lichtausbeute der Lampe. Die Lichtausbeute ist das Verhältnis von ausgesandtem nutzbarem Lichtstrom zu eingebrachter elektrischer Leistung. Die Lichtausbeute einer neuen Glühlampe liegt nur bei 10 bis 14 Lumen pro Watt elektrischer Leistung. Die Ansprechzeit, d. h. die Zeit bis zum Erreichen des



Bild 1: P21/5W-, R5W-, Soffiten-Lampe; Quelle: Osram

Nennlichtstromes, beträgt je nach Leistung der Glühlampe 0,2 bis 1 Sekunde.

Glühlampen finden in heutigen Kraftfahrzeugen (Kfz) Verwendung in der Innenraumbelichtung, bei der Armaturenbelichtung und in den Signallichtern (Bild 1).

2.1.2 Halogen-Glühlampe

Die Halogen-Glühlampe ist die am häufigsten verwendete Lichtquelle im automobilen Scheinwerfer. Im Vergleich zur herkömmlichen Glühlampe wird dem Schutzgas ein Halogen wie Brom oder Jod zugemischt. Das verdampfte Wolfram verbindet sich mit dem Halogen. Ist die Kolbentemperatur hoch genug, so können die Wolfram-Halogenverbindungen aufgrund ihres relativ hohen Dampfdruckes nicht am Kolben kondensieren, jedoch werden durch die deutlich höheren Temperaturen in der Nähe der Wendel diese Wolfram-Halogenverbindungen wieder in ihre Ausgangsprodukte aufgespalten. Die Wolframatomte schlagen sich auf der Wendel nieder und das Halogen steht diesem Kreisprozess wieder zur Verfügung. Am kühleren Glaskolben zerfällt die gasförmige Wolfram-Halogenverbindung nicht, sodass die Kolbenschwärzung langsamer als bei der herkömmlichen Glühlampe abläuft. Daher verfügen Halogenlampen über relativ kleine Kolbengeometrien und zudem erfordert dies, dass Halogenlampen stets innerhalb ihres spezifizierten Leistungsbereichs betrieben werden.

Weiterhin kann durch die Zugabe von Halogen zum Schutzgas die Wendel enger ausgelegt und stärker belastet werden. Die Lichtausbeute einer Halogenlampe liegt im Automobilbereich bei ca. 18 Lumen/Watt bei einer Wendeltemperatur von 3.200 Kelvin.

¹ Hot-Spot: Stellen der Wendel, an denen das Wolfram schneller verdampft ist. Dadurch wird der Wendeldraht an dieser Stelle dünner, dort steigt die Stromdichte und die Wendel ist heißer

² Resublimation: unmittelbarer Übergang eines Stoffes vom gasförmigen Aggregatzustand in den festen

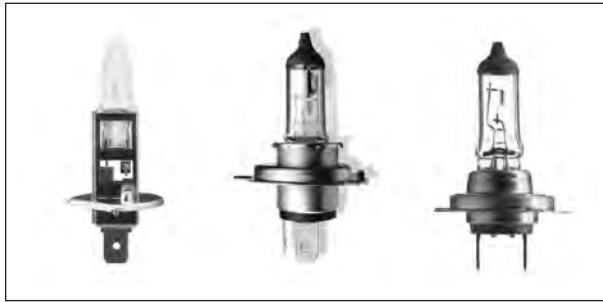


Bild 2: H1-, H4- und H7-Lampe; Quelle: Philips

Die Ansprechzeit der Glühlampe verkürzt sich durch die Halogen-Zugabe nicht.

In der Scheinwerfertechnik haben sich in den letzten Jahren verschiedene Bauformen etabliert (Bild 2).

2.1.3 Hochdruck-Gasentladungslampe

Die Hochdruck-Gasentladungslampe hat 1991 im BMW der 7er-Reihe erstmals Verwendung in der automobilen Scheinwerfertechnik gefunden. Zunächst kam diese Technik ausschließlich für das Abblendlicht zum Einsatz, ab 2001 auch für das Fernlicht.

In einer Gasentladungslampe brennt ein Lichtbogen zwischen zwei voneinander isolierten Elektroden im gemeinsamen Gasraum. Die hohe Stromdichte bei der Zündung der Lampe erhitzt das Gas. Es bildet sich ein leitfähiges Plasma, welches den Stromtransport zwischen den Elektroden auch bei niedrigeren Brennspannungen aufrechterhält. Der Gasraum der Hochdruck-Gasentladungslampe ist mit dem Edelgas Xenon und einer Mischung aus Metallhalogeniden gefüllt. Im Volksmund wird sie daher „Xenon-Lampe“ genannt. Der Gasdruck steigt während des Betriebs von anfänglichen 20 bar auf 100 bar. Für Zündung und Betrieb der Hochdruck-Gasentladungslampe ist ein Vorschaltgerät notwendig, das eine Zündspannung von ca. 20 kV und eine Brennspannung von 85 Volt zur Verfügung stellt.

Der Lichtbogen emittiert Strahlung mit einem Spektrum im sichtbaren Bereich, das sich im Wesentlichen aus einer Serie von Spektrallinien zusam-



Bild 3: D1S- und D2S-Lampe; Quelle: Osram

menetzt mit einer Farbtemperatur von ca. 4.200 Kelvin. Das Spektrum wird im Wesentlichen von den Metallhalogeniden bestimmt. Der UV-Anteil des Spektrums wird durch einen Überkolben aus dotiertem³ Quarzglas herausgefiltert.

Die Lebensdauer der Gasentladungslampen liegt im Bereich der Fahrzeuglebensdauer. Daher muss die Lampe in der Regel in dieser Zeit nicht ausgetauscht werden. Die Lichtausbeute ist mit ca. 90 Lumen/Watt dreimal so hoch wie die einer Halogenglühlampe, nimmt aber mit der Brenndauer kontinuierlich ab. Die Leistungsaufnahme ohne Vorschaltgerät ist mit 35 Watt geringer als die der 55⁴ Watt Halogenglühlampe. Die Zündung der Gasentladungslampe und das Aufbauen des Lichtbogens geschehen relativ langsam, sodass lt. Gesetzgeber nach einer Sekunde nach dem Einschalten der Lampe mindestens 25 % des Solllichtstromes⁵ und vier Sekunden nach dem Einschalten der Lampe 80 % des Solllichtstromes zur Verfügung stehen müssen.

Die Gasentladungslampen werden in die Bauformen D1S (Bild 3), D1R, D2S (Bild 3), D2R, D3S, D3R, D4S und D4R unterteilt. Der Buchstabe „D“ steht für Discharge (engl. Entladung). D1S- und D2S-Lampen finden ihren Einsatz in Projektionsystemen, wobei die D1S-Lampe ein integriertes Zündgerät besitzt. Die D1R- und D2R-Lampen werden in Reflexionssystemen eingesetzt und tragen eine Abschatterlackierung auf dem äußeren Glaskolben. Die D1R-Lampe besitzt ein integriertes Zündgerät. Die D2-Lampe ist durch die einfache Handhabung bei Ein- und Ausbau in (Bi-)Xenon-Scheinwerfern am weitesten verbreitet. D3- und D4-Lampen besitzen die gleiche Bauform wie die D1- und D2-Lampen, sind allerdings quecksilberfrei, wodurch die Brennspannung von 85 Volt bei Lampen mit Quecksilber auf 42 Volt absinkt. Da-

³ Dotierung: gezieltes Einbringen von Fremdatomen geringer Konzentration in ein Material

⁴ Nennwert; die tatsächliche Leistungsaufnahme ist größer

⁵ Solllichtstrom der D1S- und D2S-Lampe: 3.200 Lumen, Solllichtstrom der D1R- und D2R-Lampe: 2.800 Lumen

durch ergibt sich für die quecksilberfreie Gasentladungslampe bei gleicher Leistung eine höhere Elektrodenbelastung aufgrund des höheren Betriebsstromes. Dies führt unter anderem zu einem geringeren Wirkungsgrad. Für die Auswirkung auf die Lebensdauer fehlen derzeit gesicherte Daten. Die D3-Lampe (als S- oder R-Version) besitzt ein im Lampensockel integriertes Zündgerät.

2.1.4 Niederdruck-Gasentladungslampe

Die Niederdruck-Gasentladungslampe hat sich in der automobilen Lichttechnik nicht durchgesetzt. Lediglich in den Jahren 2000 bis 2003 wurde diese Technologie in einem Serienfahrzeug implementiert. Im Modell Z8 des Fahrzeugherstellers BMW kam sie als Rückleuchte zum Einsatz (Bild 4). Im Bereich der Scheinwerfertechnologie wird die Niederdruckgasentladungslampe aufgrund der geringen Leuchtdichte nicht verwendet. Aus Gründen der Vollständigkeit wird sie dennoch kurz beschrieben.

Vorteil der Niederdruck-Gasentladungslampe ist der einfache Aufbau sowie die hohe Energieeffizienz. In einem mit Edelgas gefüllten, teilevakuierten Glasrohr bildet sich zwischen zwei sich gegenüberliegenden Elektroden eine Glimmentladung aus. Für die Entladung wird eine relativ hohe Spannung im KV-Bereich, d. h. von mehr als 50 V, benötigt.



Bild 4: Niederdruck-Gasentladungslampe im Modell Z8 des Fahrzeugherstellers BMW; Quelle: [IQ09]

⁶ EMV: elektromagnetische Verträglichkeit

⁷ LED: Light Emitting Diode, Licht emittierende Diode

⁸ Der Begriff „hoch gesetzte Bremsleuchte“ stellt die ECE-Bezeichnung für die im Volksmund benannte dritte Bremsleuchte dar.

Nachteil dieser Technologie ist die Notwendigkeit eines aufwändigen Vorschaltgerätes, welches wiederum EMV⁶-Probleme verursacht.

2.1.5 Leuchtdiode (LED⁷)

Die einzelne LED kommt einer punktförmigen Lichtquelle am nächsten und entspräche somit dem lichtplanerischen Ideal (Bild 5). Allerdings genügen die derzeit erzielbaren Leuchtdichten in einigen Anwendungsbereichen noch nicht den Wünschen der Lichtplaner. Das Höchstmaß an gestalterischer Freiheit und die extreme Langlebigkeit von bis zu 50.000 Betriebsstunden machen die LED für die Automobilindustrie besonders interessant. Die schnellen Ansprechzeiten von nur 8 ms ermöglichen weiterhin ein schnelleres Anzeigen der Signale und somit eine höhere Verkehrssicherheit (im Vergleich: Die Ansprechzeit einer Glühlampe beträgt je nach Leistung mindestens 200 ms).

Anfänglich wurden LEDs zur Beleuchtung der Bedienelemente eingesetzt. Später kam sie in der hoch gesetzten Bremsleuchte⁸ zum Einsatz. Heute wird die LED neben den genannten Anwendungsbereichen auch in Fahrzeugrückleuchten, sowie für Tagfahrleuchten verwendet.

Die Leuchtdiode ist ein elektronisches Halbleiterbauelement. Der Halbleiterkristall besteht aus zwei Bereichen. Unterschieden wird das Leitungsband vom Valenzband. Durch Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung der Diode gelangen Elektronen vom Leitungsband in das energetisch günstiger liegende Valenzband. Die bei diesem Sprung frei werdende Energie wird in Form von Strahlung abgegeben (Bild 6).

Der Spektralbereich und die Effizienz der von der Leuchtdiode erzeugten Strahlung können durch die gezielte Auswahl der verwendeten Halbleitermate-



Bild 5: Verschiedene LED-Bauformen; Quelle: Osram OS, Lumileds

rialien und deren Dotierung variiert werden. Das Spektrum einer farbigen Leuchtdiode ist prinzipbedingt relativ schmalbandig. Es enthält weder einen infraroten noch einen ultravioletten Anteil. Es lassen sich die Farben Rot, Orange, Gelb, Grün und Blau generieren. Zur Erzeugung von weißem Licht können drei Möglichkeiten genutzt werden. Zum einen kann das Prinzip der Lumineszenzkonversion genutzt werden. Hier wird durch das Licht einer blauen LED ein Leuchtstoff angeregt, welcher einen Teil des blauen Lichtes in gelbes Licht umwandelt. Der nicht vom Leuchtstoff umgewandelte blaue Anteil des Lichtes ergibt in additiver Farbmischung mit dem umgewandelten gelben Anteil weißes Licht. Alternativ kann durch den Einsatz von drei verschiedenen Halbleiterelementen, die die Grundfarben Rot, Grün und Blau erzeugen, mittels additiver Farbmischung weißes Licht erzeugt werden. Die dritte Möglichkeit stellt die Verwendung geeigneter Fluoreszenzstoffe dar. Durch diese werden aus der Strahlung einer UV-Leuchtdiode verschiedene Grundfarben erzeugt, deren Mischung wiederum weißes Licht ergibt. Weiße Leuchtdioden erreichen derzeit eine Lichtausbeute von bis zu 60 Lumen/Watt.⁹

Im laufenden Betrieb weisen Leuchtdioden einen wesentlichen Nachteil auf. Mit steigender Betriebstemperatur kommt es zu einem Absinken des emittierten Lichtstromes. Bedingt durch den Rekombinationsprozess entsteht Wärme, welche in Kombination mit der durch den Betriebsstrom erzeugten Stromdichte und der Junction-Temperatur die Leistungsfähigkeit herabgesetzt. Die entstehen-

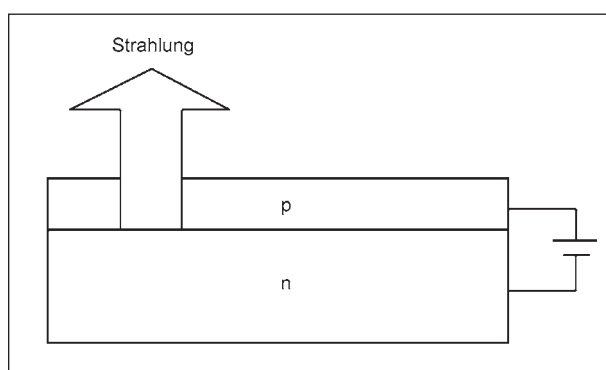


Bild 6: Schematische Darstellung einer LED

de Wärme hängt neben der Leistung der LED auch von den äußeren Einflüssen ab. Zur Gewährleistung eines konstanten Lichtstromes sind daher Betrachtungen in Bezug auf das Thermomanagement notwendig. Dies ist besonders im Bereich der Frontbeleuchtung aufgrund der zusätzlichen Wärme des Motors nötig. Die Lebensdauer wird durch den Einfluss dieser äußeren Wärme ebenfalls herabgesetzt. Die Lebensdauer einer Leuchtdiode wird derzeit so definiert, dass der Lichtstrom auf die Hälfte des Anfangslichtstromes irreversibel abgefallen ist, d. h., LEDs unterliegen einem betriebsbedingten Alterungs- bzw. Degenerationsprozess. Anwender aus dem Bereich der Allgemeinbeleuchtung schlagen eine 80%-Grenze vor.

Oftmals werden LEDs in sog. Modulen verwendet. Es befinden sich jeweils mehrere Halbleiterelemente auf einer Leiterplatte. Die Leiterplatte dient sowohl zur Aufnahme als auch zur Ansteuerung der LEDs. Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Technologien ist der plötzliche Ausfall einer Leuchtdiode bei geeignetem elektronischem und thermischem Design relativ unwahrscheinlich.

2.1.6 Organische Leuchtdiode (OLED)¹⁰

Im Gegensatz zur LED kommen bei der OLED organische Materialien zum Einsatz. Die Funktionsweise ist jedoch ähnlich. Wie auch bei der LED wird die Strahlung einer OLED in einem Rekombinationsprozess erzeugt. OLEDs bestehen im einfachsten Fall aus einer dünnen organischen Halbleiterschicht, die sich zwischen einer Anode und einer Kathode befindet (Bild 7). Diese Schichten werden auf einem lichtdurchlässigen Substrat, in der Regel Glas, aufgebracht. Durch das Anlegen einer Spannung kommt es zum Transport von negativer Ladung (Elektronen) aus der Kathode und positiver Ladung (Löchern) aus der Anode in den organischen Halbleiter. Beim Zusammentreffen von negativer und positiver Ladung bilden sich Exzitonen.

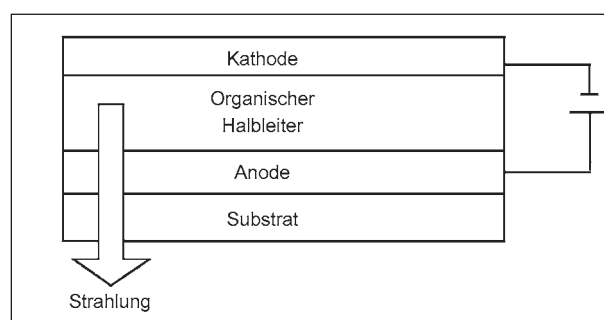


Bild 7: Schematische Darstellung einer Einschicht-OLED

⁹ Stand: 3/2007

¹⁰ OLED: Organic Light Emitting Diode, organische Licht emittierende Diode

Beim Zerfall dieser Exzitonen kommt es zur Emission von Strahlung [LAU04]. Das emittierte Spektrum kann durch die Wahl des organischen Materials beeinflusst werden.

OLEDs sind besonders für den Bereich der Displaytechnologie von Interesse, da sie im Gegensatz zu LCDs¹¹ farbiges Licht emittieren und daher ohne Hintergrundbeleuchtung auskommen. Weiterhin bietet die Verwendung von flexiblen Trägermaterialien besonders hohe gestalterische Freiheiten. Weitere Vorteile sind der niedrige Energieverbrauch sowie die kostengünstige Herstellung. Aus diesem Grund werden OLEDs mit großer Wahrscheinlichkeit zunächst im Fahrzeuginnenraum eingesetzt werden. Da flexible Trägermaterialien hier die homogene Beleuchtung vieler erdenkbarer Teile ermöglichen, könnten OLEDs besonders für die ambiente Innenraumbeleuchtung verwendet werden. Mit einem Einsatz im Bereich der Fahrzeugaußenbeleuchtung ist nach Ansicht von Experten aufgrund der lambertschen Abstrahlcharakteristik jedoch vorerst nicht zu rechnen.

2.2 Optiken

Man unterscheidet die verschiedenen Scheinwerfertechnologien nach folgenden optischen Systemen:

- Parabolscheinwerfer,
- Bifokus- und Multifokusscheinwerfer,
- Freiformscheinwerfer,
- Ellipsoid- bzw. Projektionsscheinwerfer.

2.2.1 Paraboloid-Optiken

Scheinwerfer mit Paraboloid-Optiken sind in Automobilen weit verbreitet. Sie bestehen aus dem Reflektor, der Lampe und der Streuscheibe. Als Reflektor kann ein Stahlblech-Pressenteil oder ein Kunststoff-Spritzteil Verwendung finden. Für die Reflexion sorgt ein Schichtsystem auf dem Reflektorrohling aus Glättungslack, einer aufgedampften Aluminiumschicht und einer schützenden klaren Spezialschicht [BOS02]. Als Reflektorgrundform wird ein Rotationsparaboloid mit der Brennweite $f = 15...40$ mm, einem Reflektordurchmesser $d =$

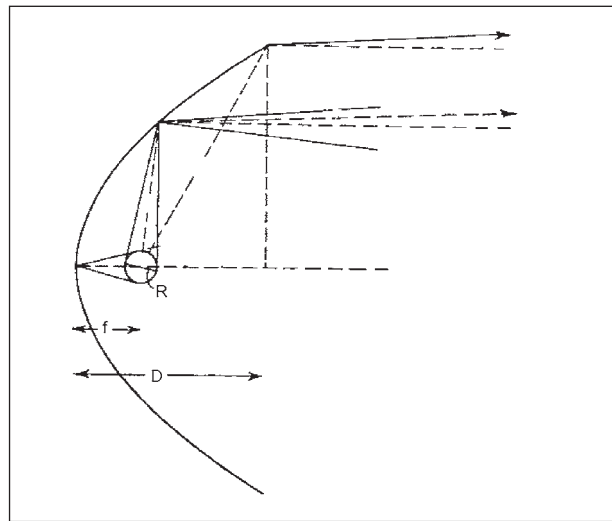


Bild 8: Strahlengang eines Paraboloidreflektors mit H4-Glühlampe (f : Brennweite, R : Radius Wendel, D : Reflektortiefe); Quelle: [BOD73]

120...250 mm und einer Reflektorhöhe $h < 140$ mm eingesetzt.

Als Lampe wird in den Parabolscheinwerfern hauptsächlich die H4-Halogenglühlampe mit zwei Wendeln eingesetzt. Dabei sitzt die Fernlichtwendel in der Brennebene f des Reflektors, wodurch im Fernlichtfall ein quasiparalleler Strahlengang erzeugt wird. Die Abblendlichtwendel ist dagegen defokussiert im Paraboloid angeordnet, wodurch sich die Wendelabbildung und somit der Strahlengang nach unten neigen (Bild 8).

Eine Kappe unterhalb der Abblendlichtwendel (s. Mitte) erzeugt die vorgeschriebene Hell-Dunkel-Grenze. Die Form des „Blendlöffels“ erzeugt den charakteristischen 15° -Anstieg der Hell-Dunkel-Grenze. Dieser „Blendlöffel“, der hier bei der H4-Lampe in der Lichtquelle integriert ist, lässt sich bei Lichtquellen mit einem Leuchtkörper auch durch eine externe „Blendkappe“ verwirklichen.

Die Streuscheibe eines Paraboloid-Scheinwerfers besteht aus Glas oder Kunststoff. Gläser sind zur Verbesserung der Steinschlagfestigkeit thermisch vorgespannt. Heute eingesetzte Borsilikatgläser haben den Vorteil einer höheren thermischen Belastbarkeit. Kunststoffscheiben besitzen aufgrund ihres Herstellungsverfahrens in Spritzgusstechnik größere Freiheitsgrade in der Formgebung bei gleichzeitig geringerem Gewicht, müssen aber zur Oberflächenhärtung gegen Kratzer und Steinschlag sowie zur Erzielung einer ausreichenden Witterungsbeständigkeit beschichtet werden.

¹¹ LCD: Liquid Crystal Display, Flüssigkristallbildschirm

Die Streuscheibe erfüllt zwei Aufgaben. Zum einen konzentrieren Prismen im „Zwickel“ das Licht in die Zone in der Mitte des ausgeleuchteten Bereiches und erzeugen damit hohe Lichtstärken im Fernfeld. Zum anderen homogenisieren Zylinderlinsen im oberen Halbraum der Streuscheibe das Nahfeld und übernehmen die Seitenausleuchtung.

Die Vorteile eines Paraboloid-Scheinwerfers sind die kostengünstige Herstellung und die Integration von Fern- und Abblendlicht in einem Scheinwerfer bei Verwendung der Zweifadenlampe.

Die Nachteile liegen im geringen Wirkungsgrad für das Abblendlicht, da nur eine Reflektorhälfte genutzt wird und die Lichtverteilung von der Lage der Streuscheibe (Neigung und Pfeilung¹²) abhängt.

2.2.2 Bifokus- und Multifokusoptiken

Bifokus- bzw. Multifokus-Reflektoren enthalten zwei (Bi-) oder mehrere (Multi-)Segmente unterschiedlicher Brennweite. Diese Segmente bestehen aus Flächenteilen eines Paraboloidreflektors. Mit den Mehr-Segment-Optiken konnte der Wirkungsgrad der Scheinwerfer trotz neuer, aerodynamischer Designs mit größerer Pfeilung, größerer Neigung und niedrigerer Anbauhöhe gegenüber den Paraboloid-Optiken konstant gehalten oder sogar verbessert werden. Innen, näher zum Leuchtmittel, liegende Segmente besitzen eine kürzere Brennweite als außen liegende. Dadurch kommt es in den für die Reichweite relevanten Zonen zu einer Mehrfachabbildung relativ kleiner Wendelbilder, wodurch die Lichtstärke in diesem Bereich steigt.

Ein Nachteil dieses Reflektordesigns sind abhängig von dem „Reflektorkonzept“ unter Umständen relativ große Wendelbilder an der Hell-Dunkel-Grenze, was einen hohen Streulichtanteil und damit eine unscharfe Hell-Dunkel-Grenze zu Folge hat. Dadurch wird die optische Einstellung des Scheinwerfers erschwert. Ein weiterer Nachteil ist, dass das Fernlicht in der Regel mit einem separaten Reflektor erzeugt werden muss.

2.2.3 Freiformoptiken

Die Freiform-Technik zeichnet sich durch die Unterteilung des gesamten Reflektors in mathematisch



Bild 9: Freiformreflektor der Fa. HELLA; Quelle: [HEL06]

präzise definierte Flächenelemente aus (Bild 9). Jedes Flächenelement hat einen eigenen Brennpunkt, sodass Übergänge zwischen zwei Flächen genau berechnet und exakt hergestellt werden müssen, um fehlerhaft positionierte Wendelbilder zu vermeiden.

Durch die exakte Positionierung der Wendelbilder benötigen ideale Freiformscheinwerfer eigentlich keine optischen Elemente in den Streuscheiben zur Beeinflussung der Lichtverteilung. So besitzen heutige Freiformscheinwerfer klare Abdeckscheiben quasi ohne optische Wirkung.

Freiformscheinwerfer sind sehr toleranzempfindlich. Lampenfehler, wie Reflexionen an Sockel und Kolben, Wendeltoleranzen in Lage oder Abmessung sowie Reflektortoleranzen erhöhen das Streulicht. In der Praxis hat sich hier die geometrisch präzisere H7-Lampe gegenüber der H1-Lampe durchgesetzt.

Vorteile der Freiformtechnik sind der hohe Wirkungsgrad durch die Nutzung der gesamten Reflektorfläche und des gesamten Lichtstroms und die teilweise größere Reichweite durch kleine Wendelabbilder hoher Leuchtdichte.

Nachteile sind die hohe Toleranzempfindlichkeit des Gesamtsystems sowie die prinzipbedingte Notwendigkeit eines separaten Fernlichtreflektors.

2.2.4 Ellipsoid- bzw. Projektionsoptiken

Mit der Zielsetzung, bei gleicher oder besserer Leistung die Abmessungen gegenüber dem Paraboloid-Reflektor zu reduzieren, entstand der Ellipsoidscheinwerfer (Bild 10 und Bild 11).

Die Lampe sitzt im Brennpunkt (Punkt 2 in Bild 11) des Reflektors, der im einfachsten Fall die Form

¹² Neigung: Verkipfung der Streuscheibe um die horizontale Achse
Pfeilung: Verkipfung um die vertikale Achse



Bild 10: Projektionssystem der Fa. HELLA, Quelle: [HEL06]

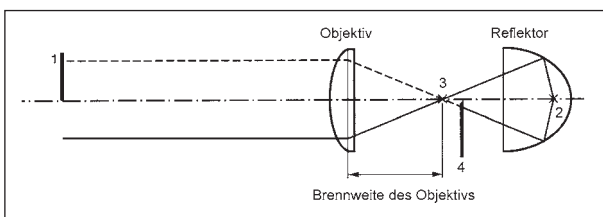


Bild 11: Prinzip der Abbildungsoptik eines Projektionsscheinwerfers mit Ellipsoidreflektor; Quelle: [BOS02]

eines Rotationsellipsoiden hat. Da der Reflektor die Lampe sehr weit umfasst, ist der Reflektorwirkungsgrad sehr hoch.

Die Hell-Dunkel-Grenze wird durch eine Blende (Punkt 4 in Bild 11) im Strahlengang erzeugt. Die Parallelisierung des Strahlengangs übernimmt eine Linse mit kurzer Brennweite, deren Brennpunkt mit dem zweiten Brennpunkt des Reflektors zusammenfällt (Punkt 3 in Bild 11). Die Linse projiziert die Lichtverteilung in Blendenebene mit der Abschattung durch die Blende (Punkt 1 in Bild 11) auf die Straße. Diese Abschattung durch die Blende reduziert den Scheinwerferwirkungsgrad deutlich.

Vorteile des Ellipsoidscheinwerfers sind die homogene Lichtverteilung und die exakte Streulichtbegrenzung, was die Empfindlichkeit gegenüber Lampentoleranzen reduziert. Das Projektionsprinzip eignet sich daher besonders für Gasentladungslampen.

Mit dem Ellipsoidscheinwerfer lassen sich scharfe Hell-Dunkel-Grenzen erzeugen, die beim Durchfahren von Bodenwellen auffallend ihren Abstand zum Fahrzeug verändern. Durch geeignete optische Maßnahmen können sowohl die Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze als auch durch Linsenfehler bedingte Farbsäume im Bereich der Hell-Dunkel-Grenze beeinflusst werden.

Nachteilig kann sich die hohe Leuchtdichte der Lichtaustrittsfläche der Linse, welche eine psychologische¹³ Blendung des Gegenverkehrs hervorrufen kann, auswirken.

Heutige Scheinwerfer kombinieren die Freiformtechnik mit dem Projektionsprinzip. Dadurch wird das Licht so gelenkt, dass nur ein relativ geringer Teil von der Blende im Strahlengang absorbiert wird. Dies erhöht den Scheinwerferwirkungsgrad.

3 Umfragen

3.1 Marktstudie des AFS-Projektes

Im Rahmen des Eureka-Projektes 1403 für adaptive Scheinwerfersysteme (AFS) [AFS96-1, AFS96-2] wurden Marktstudien durchgeführt: die erste in Deutschland (1995), nachfolgend die zweite in Frankreich, Italien und Schweden (1996). Untersucht werden sollte, welches Marktpotenzial für verschiedene fahrzeugbezogene Sicherheits- und Komfortfunktionen ermittelt werden kann.

Die Ausarbeitung wurde an ca. 120 auswertbaren Fragebögen durchgeführt, wobei jedes Interview ca. 90 Minuten dauerte. Die Stichprobe der Befragten umfasste in beiden Untersuchungen alle relevanten Altersgruppen von Autofahrern verschiedener Fahrzeugklassen, unterschiedlicher Fahrleistung und unterschiedlichen Alters. 16 % aller Befragten waren Berufsfahrer, ein Drittel aller Befragten waren Frauen, der Anteil der Autofahrer mit Sehhilfe betrug 30 %.

Die zweite Recherche 1996 in Frankreich, Italien und Schweden war zweiteilig.

Der erste Teil der zweiten Befragung zielte zunächst ganz allgemein auf Aspekte, die zur Verbesserung des Komforts und der Sicherheit beim Autofahren beitragen könnten.

Hinsichtlich Sicherheit und Ausstattung wurden Airbags, verbesserte Bremssysteme, Antikollisions- und Geschwindigkeitswarnsysteme genannt. Weiterhin hinsichtlich der Sicht wurden verbesserte Scheibenwischer und Rückspiegel aufgeführt. Die Befragten aus Italien und Schweden forderten zudem eine wesentlich bessere Ausbildung der Fahrer.

¹³ Nähere Erläuterungen zum Thema Blendung sind in Kapitel 4.8.1 aufgeführt.

In allen Ländern war man sich sowohl bei der Tagfahrt als auch bei der Fahrt bei Nacht einig, dass die Beleuchtungssysteme dringend verbessert werden müssen.

Bei Tag wurden besonders in Frankreich und Italien verbesserte Nebelscheinwerfer gefordert. Die französischen Teilnehmer wünscht sich zudem Kurvenlicht-Systeme, wie sie einst im Citroën DS verwendet wurden.

Bei Nacht war das Votum einhellig für leistungsfähigere Scheinwerfer mit verbesserter Seitenausleuchtung und besserer Reichweite. Besonders wurden die Lichtfunktionen unter Schlecht-Wetter-Bedingungen als ausgesprochen unzureichend bewertet.

Deutlich wurde bei dieser Untersuchung, dass neben den sicherheitsrelevanten Aspekten wie passive Sicherheit, Bremsen, ABS, Airbags etc. auch die Funktionen, die vorrangig die Sicht betreffen, nach wie vor noch als unzureichend betrachtet werden. Dies zeigt sich im Wunsch nach besseren Scheibenwischern und Spiegeln, aber besonders in der Forderung nach deutlich verbesserten Scheinwerferfunktionen.

Die erste Recherche wurde in Deutschland 1995 durchgeführt und aufgrund der ersten Ergebnisse konnten gewisse Funktionen vordefiniert werden, die jetzt im zweiten Teil der zweiten Befragung den Probanden vorgestellt und von ihnen beurteilt werden sollten.

Diese erste Befragung war zunächst geringfügig anders aufgebaut. Hierbei wurde unter anderem der Stellenwert der individuellen Bedürfnisse ermittelt. In Bild 12 wird dargestellt, welche Funktionen vorrangig adaptiv gestaltet werden sollen.

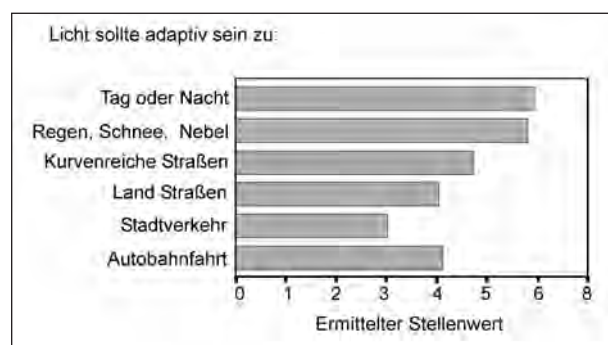


Bild 12: Benennung möglicher adaptiver Scheinwerferfunktionen laut der ersten Befragung in Deutschland (1995)

Grundsätzlich wünscht man hier eine adaptive Kopplung, die den Tag Nacht-Übergang mit einbezieht. Die nachfolgenden Ränge sind mit kleineren Verschiebungen ähnlich dem nachfolgenden Gesamtbild.

Alle Befragten der zweiten Runde wurden im zweiten Teil speziell auf mögliche folgende Funktionen angesprochen:

- Stadtlicht (VL),
- Landstraßenlicht (CL),
- Kurvenlicht (BL),
- Autobahnlicht (EL),
- Schlechtwetterlicht (WL),
- Überkopfschilderbeleuchtung (OVL).

Wie dem Bild 13 zu entnehmen ist, geht die Bewertung dieser Funktionen einher mit der Fähigkeit diese zu verstehen bzw. ihren Nutzen einzuordnen. Dieses Ergebnis spiegelt damit auch Bedürfnisse wider, die schon bei der allgemeinen Befragung im ersten Teil artikuliert wurden.

Somit ist der zugeordnete Stellenwert nicht nur als Funktion der Bedürfnisse, sondern auch des möglichen Nutzens bzw. des Verständnisses hinsichtlich der Funktion zu betrachten.

Es zeichnet sich klar ab, dass eine Verbesserung der Scheinwerfer besonders unter Schlechtwetterbedingungen an oberster Stelle steht, gefolgt vom Landstraßenlicht. Das Landstraßenlicht ist hierbei im Zusammenhang mit den vorangegangenen Befragungsergebnissen als ein Scheinwerfer mit bes-

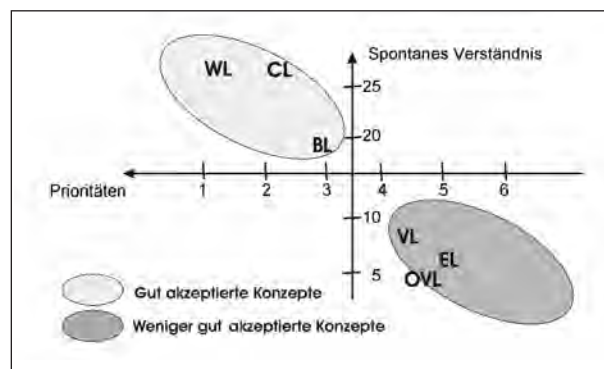


Bild 13: Gesamtbewertung der zweiten Befragung in Frankreich, Italien und Schweden 1996 sowie der ersten in Deutschland 1995. Der Wert stellt die höchste Priorität dar

serer Seitenausleuchtung und vor allem besserer Reichweite zu sehen. Relativ gering wird dagegen schon das Kurvenlicht eingestuft.

Die als weniger wichtig eingestuften Funktionen sind im Prinzip das Stadtlicht, das Autobahnlicht und die Schilderbeleuchtung OVL. Mit der Beleuchtung der Überkopfbeschilderung konnten die Befragten offensichtlich am wenigsten etwas anfangen, was auch bedeuten könnte, dass die meisten Autofahrer mit der heutigen Qualität dieser Beschilderung zufrieden sind. Allerdings gab es hier gewisse nationale Unterschiede.

Dass das Stadtlicht eine relativ schwache Bewertung erfuhr, könnte durch die Befragungsergebnisse wie z. B. in Italien erklärt werden, da dort 50 % der Interviewten sich im Stadtbereich für wirksamere Scheinwerfer und 50 % für eine verbesserte Straßenbeleuchtung aussprachen und somit viele die Stadtsituation vorwiegend durch die urbane Beleuchtung verbessert sehen möchten.

Erstaunlich ist hinsichtlich dieser Befragungen, dass in der heutigen Umsetzung vor allem Kurvenlicht und Autobahnlicht im Vordergrund stehen und die Schlechtwetterfunktionen eher damit zu kämpfen haben nicht in Vergessenheit zu geraten.

Bei genauer Betrachtung stellt sich auch die Frage, ob die wahren Bedürfnisse, die die Befragten hinsichtlich ihrer Kritik an der Schlecht-Wetter-Situation zum Ausdruck brachten durch die Festlegungen in der derzeitigen AFS-Regelung (ECE-Regelung 123) bereits vollständig eingeflossen sind.

3.2 Umfrage des LTI

Um ein Stimmungsbild zum derzeitigen Stand der Lichttechnik im Straßenverkehr in der Bevölkerung zu erhalten und den Bedarf oder Wunsch nach besserer Lichttechnik zu eruieren, führte ein externes Unternehmen unter Führung des Lichttechnischen Institutes (LTI) der Universität Karlsruhe im Auftrag der BASt eine Umfrage mit 429 Teilnehmern im Raum Karlsruhe durch.

3.2.1 Durchführung

Die Teilnehmer wurden während der Dunkelheit an Autobahnraststätten, an Landstraßen gelegenen Tankstellen und in der Stadt befragt. Teilgenommen haben 327 Pkw-Fahrer, 62 Lkw-Fahrer und 40 Busfahrer. Jedes Interview dauerte ca. 12 Minuten.

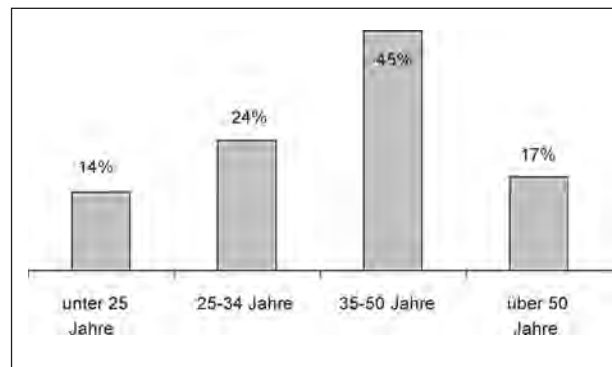


Bild 14: Altersstruktur der Befragten

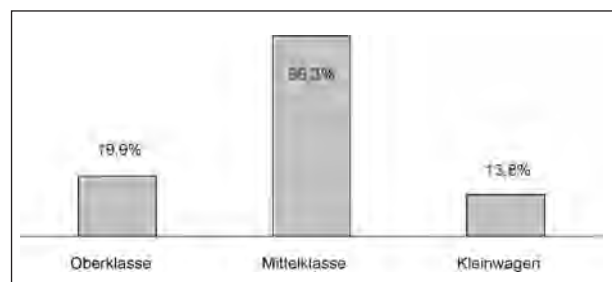


Bild 15: Verteilung der Pkw-Klassen

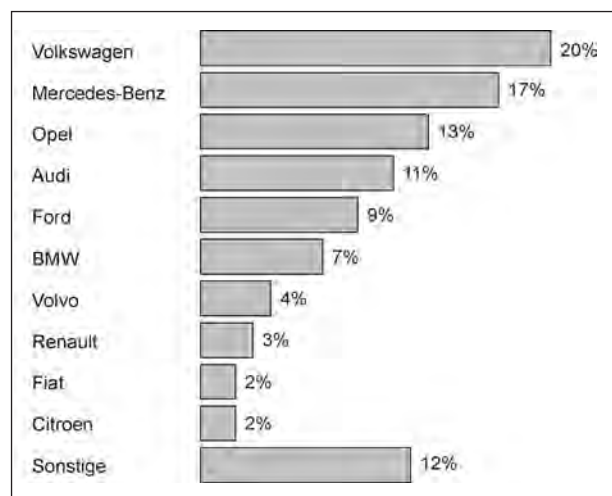


Bild 16: Verteilung der Pkw nach Marken

Die Befragten wurden nach dem Zufallsprinzip ausgesucht. Bei der Stichprobengröße von 429 Teilnehmern ergab sich ein repräsentativer Alters-, Fahrzeugklassen-Querschnitt (Bild 14 und Bild 16). Die Fahrzeuge der Pkw-Fahrer lassen sich in drei Klassen einteilen (Bild 15).

Die befragten Lkw- und Bus-Fahrer führen zu 50 % ein Fahrzeug der Marke Mercedes-Benz. Bei den Bus-Fahrern war die Zahl der „Süd-West-Busse“ der Region Karlsruhe bzw. die Zahl der Busse des Karlsruher Verkehrsverbundes (KVV) relativ hoch. Hier werden hauptsächlich Busse der Firma Merce-

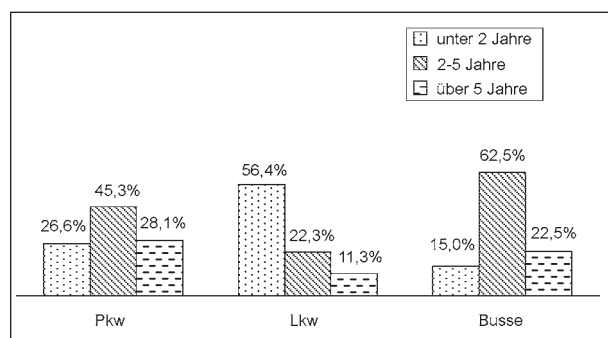


Bild 17: Alter der Fahrzeuge

des-Benz und Setra eingesetzt, die auf der Landstraße und im Stadtgebiet unterwegs sind. Die Fahrer von Fernreisebussen auf der Autobahn sind in dieser Umfrage unterrepräsentiert, da diese aufgrund des Zeitdrucks nicht bereit waren, an der Umfrage teilzunehmen. Das Alter der einzelnen Fahrzeugtypen zeigt Bild 17.

3.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Umfrage werden hier in Schaubildern mit kurzen Erklärungen zusammengestellt, um im nächsten Kapitel ausführlicher diskutiert zu werden.

Wie in Bild 18 zu sehen, sind Oberklassefahrzeuge häufiger auf der Autobahn anzutreffen. Die Statistik wird hier durch die Befragung von 53 Taxis im Stadtgebiet Karlsruhe beeinflusst, weil die Taxis meistens zur Oberklasse (9 Taxis) oder Mittelklasse (44 Taxis) gehörten. Werden die Taxis aus dieser Statistik herausgerechnet, beträgt der Anteil der Oberklassefahrzeuge auf der Autobahn sogar 65 %.

Mittelklassefahrzeuge wurden seltener auf der Landstraße, aber häufiger auf der Autobahn und im Stadtverkehr angetroffen. Hier wurden viele Firmen- bzw. Vertriebsfahrzeuge identifiziert.

Die Kleinwagenfahrer waren zu gleichen Teilen auf allen Straßenarten anzutreffen.

Die Antworten zur Frage „Was stört Sie bei schlechtem Wetter und Dunkelheit am meisten?“ zeigen, dass 78 % der Befragten mit der Lichttechnik im

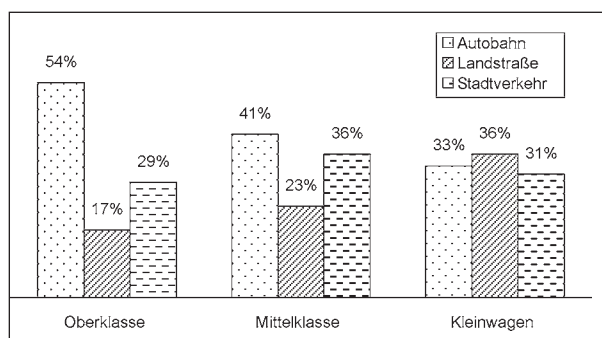


Bild 18: Verteilung der Fahrzeugklassen auf den Straßenarten

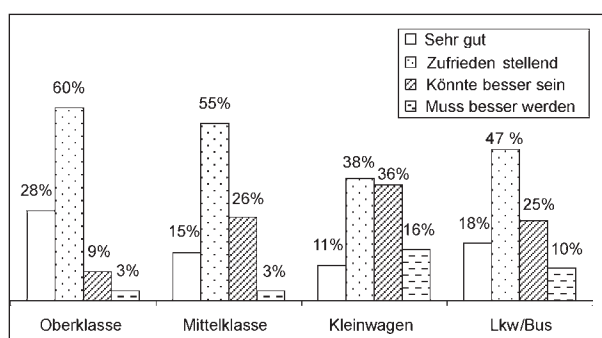


Bild 19: Beurteilung des eigenen Abblendlichtes nach Fahrzeugklassen sortiert

Straßenverkehr nicht zufrieden sind. 61 % der Befragten geben hier die Blendung durch den Gegenverkehr und 31 % die mangelhafte Ausleuchtung des Verkehrsraumes durch die eigenen Scheinwerfer als Störfaktor an. Da bei dieser Frage Mehrfachnennungen möglich waren, ergibt die kumulierte Summe die oben erwähnten 78 %.

Lkw- und Bus-Fahrer kritisieren bei dieser Frage die unzureichende Ausleuchtung durch die eigenen Scheinwerfer mit 39 % häufiger als Pkw-Fahrer, die diese nur mit 29 % aller Befragten bemängeln.

Sortiert man die Ergebnisse dieser Frage nach Straßenarten, fällt auf, dass sich 70 % aller Befragten auf Landstraßen durch den Gegenverkehr geblendet fühlen. Ein ähnliches Ergebnis zeigt die Extraktion der Zahlen der Stadtbusse, die sich in 93 % der Fälle vom Gegenverkehr bei schlechtem Wetter und Dunkelheit geblendet fühlen.

Bei der Beurteilung des eigenen Abblendlichtes gaben 29 % der Pkw-Fahrer und 35 %¹⁴ der Lkw- und Bus-Fahrer an, dass dieses besser sein könnte oder sogar besser werden muss (Bild 19). Unter den Pkw-Fahrern ist festzustellen, dass in der Oberklasse die Unzufriedenheit mit dem eigenen Abblendlicht am geringsten, in der Mittelklasse etwas höher und in der Kleinwagenklasse mit 52 %¹⁵ am höch-

¹⁴ Der Wert 35 % für Lkw- und Bus-Fahrer ergibt sich aus der Summe von 25 % (könnte besser sein) und 10 % (muss besser werden) in Bild 19.

¹⁵ Der Wert 52 % für Kleinwagen ergibt sich aus der Summe von 36 % (könnte besser sein) und 16 % (muss besser werden) in Bild 19.

ten ist. Je neuer die Fahrzeuge sind, desto größer ist die Zufriedenheit mit dem eigenen Abblendlicht. Hier scheinen neue Entwicklungen in der Scheinwerfertechnologie positive Effekte zu erzielen. Fahrer eines Fahrzeuges mit Xenon-Scheinwerfer waren zu 97 % mit der Leistung ihres Abblendlichtes zufrieden.

Die Beurteilung des eigenen Fernlichtes fiel insgesamt positiver als die des Abblendlichtes aus. Nur 12 % der Pkw-Fahrer und 11 % der Lkw- und Bus Fahrer sehen hier Verbesserungsbedarf. Wie beim Abblendlicht ist auch beim Fernlicht die Unzufriedenheit der Kleinwagenfahrer am größten. Auch die Korrelation zum Alter des Fahrzeugs ist bei der Beurteilung des Fernlichtes wiederzufinden: Je neuer das Fahrzeug, desto größer ist die Zufriedenheit mit dem eigenen Fernlicht.

Die Ausleuchtung der Überkopfschilder wird von 34 % der Pkw-Fahrer und 32 % der Lkw- und Bus-Fahrer bemängelt. Die Ausleuchtung der seitlichen Schilder am Straßenrand wird von 25 % der Pkw-Fahrer und 32 % der Lkw- und Bus-Fahrer als verbesserungswürdig kritisiert. Die Frage nach der Zufriedenheit mit der seitlichen Ausleuchtung durch die eigenen Scheinwerfer zeigte, dass hier bei den Lkw und Bussen Handlungsbedarf besteht, da 45 % der Fahrer dieser Fahrzeuge der Meinung sind, dass dort die Ausleuchtung nicht ausreicht. Unter den Pkw-Fahrern waren 38 % der Ansicht.

Um festzustellen, wie Fahrzeugführer mit Freiheiten bei der Einstellung ihrer eigenen Lichttechnik umgehen, wurden sie nach der Einstellung ihrer Leuchtweitenregelung (Abk.: Lwr) befragt. Das Ergebnis zeigt Bild 20.

Auffällig war, dass fast die Hälfte aller Fahrer ihre Leuchtweitenregelung auf mittlere Reichweite eingestellt hatten, unabhängig vom Beladungszustand ihres Fahrzeuges. Viele gaben im Gespräch an, diese Einstellung so gut wie nie zu verändern. Die neueste Scheinwerfertechnologie kann hier nicht den gewünschten Effekt bringen, wenn den Fahrzeugführern die Funktion und die richtige Bedienung der Leuchtweitenregelung nicht bekannt sind. Eine Korrelation zwischen den Antworten zu der

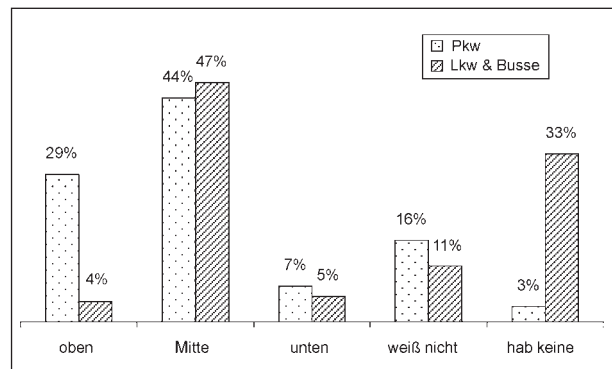


Bild 20: Einstellung der Leuchtweitenregelung

Frage nach der Zufriedenheit mit dem eigenen Licht und dem Verhalten beim Einstellen der Leuchtweitenregelung konnte nicht festgestellt werden. Einzig die Kleinwagenfahrer, die laut dieser Umfrage am unzufriedensten mit ihrer Lichttechnik sind und die ältesten Fahrzeuge fahren, stellen die Leuchtweite ihrer Scheinwerfer überdurchschnittlich häufig auf die maximale Reichweite („oben“) ein.

Die Zahlungsbereitschaft der Kraftfahrer für verschiedene lichttechnische Einrichtungen an ihrem eigenen Fahrzeug wurde durch die Bezifferung eines Preises, den man für diese Technologie bereit zu zahlen ist, eruiert. Dazu wurde nach der Zahlungsbereitschaft für Xenon-Licht, für adaptives Kurvenlicht, für ein den Gegenverkehr nicht blendendes Pixellicht, für eine dynamische Leuchtweitenregelung und für eine Windschutzscheibe, die auf Gefahren hinweist, gefragt.

Im Bild 21 sind die Bereiche 0 € bis 200 € und 200 € bis 1.000 € zusammengefasst, da eine echte Zahlungsbereitschaft erst durch einen genannten Betrag von über 200 € anzunehmen ist. Bei genannten Beträgen von unter 200 € wird die Meinung „schön, zu haben, aber nicht unbedingt notwendig“ interpretiert.

Die größte Zahlungsbereitschaft besteht bei den Befragten für eine Windschutzscheibe, die auf nicht erkannte Gefahren hinweist. Das Xenon-Licht, so wie es in einigen Oberklassefahrzeugen Serienstand ist bzw. für Preise von 800 € bis 1.500 € erworben werden kann, landet in diesem Ranking auf Platz zwei. Auch das Kurvenlicht bietet dem Kunden eine attraktive Technik, für die 29 % der Befragten bereit sind, über 200 € Aufpreis zu zahlen. Das Pixellicht, das den Gegenverkehr nicht blendet, ist von der technischen Umsetzung und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten sicherlich unterbewertet.¹⁶ Allerdings hat der Kunde von die-

¹⁶ Das Pixellicht wurde in dieser Umfrage als ein Licht, das den Gegenverkehr nicht blendet, vorgestellt. Andere Eigenschaften, wie zum Beispiel die Möglichkeit, Informationen auf die Straße zu projizieren, wurden den Befragten bewusst vorenthalten.

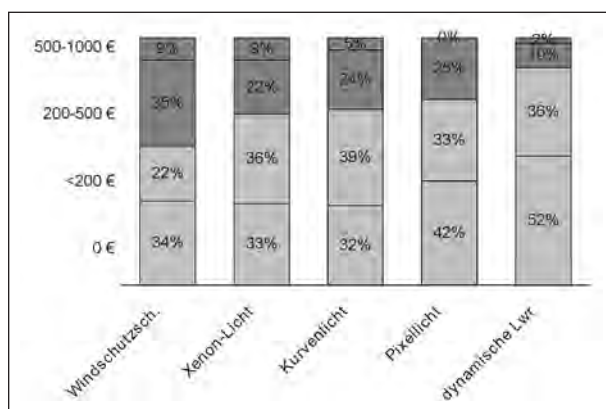


Bild 21: Zahlungsbereitschaft für neuartige lichttechnische Einrichtungen an Fahrzeugen

ser Technik keine direkten Vorteile für sich, da er erst von dieser Technik profitiert, wenn alle anderen auch ein solches System in ihren Fahrzeugen hätten und er somit weniger geblendet würde. Die dynamische Leuchtweitenregelung ist dem Großteil der Befragten keinen Aufpreis wert.

Die Frage, wo die Teilnehmer den größten Verbesserungsbedarf sehen, wurde nach Straßentyp, Witterung und Fahrsituation getrennt ausgewertet.

Unabhängig vom Standort während der Befragung wird eine Verbesserung der Lichttechnik für die Landstraße am stärksten gefordert (Bild 22). Im Stadtverkehr werden die eigenen Scheinwerfer durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung unterstützt. Hier wird es eher als problematisch angesehen, aus dem Überangebot an leuchtenden Informationen die wichtigen herauszufiltern. Auf der Autobahn ist der geforderte Verbesserungsbedarf ebenfalls beschränkt, solange die Autobahn nicht zu wenig befahren ist. Die Befragten gaben an, die Ausleuchtung sei ausreichend, sobald sich einige Fahrzeuge vor und hinter dem eigenen befänden. Sobald aber keine anderen Fahrzeuge in der Nähe seien, sei die Reichweite der Ausleuchtung für die gefahrenen Geschwindigkeiten nicht ausreichend. In diesem Fall passen viele Fahrer ihre Geschwindigkeit nicht den Sichtverhältnissen an, sondern vertrauen darauf, dass die Autobahn hindernisfrei sein müsste.

Die Witterungsverhältnisse, bei denen der Wunsch nach Verbesserung der lichttechnischen Einrichtung am Fahrzeug besteht, ist in Bild 23 dargestellt. 36 % gaben die Regensituation, 31 % die Nebelsi-

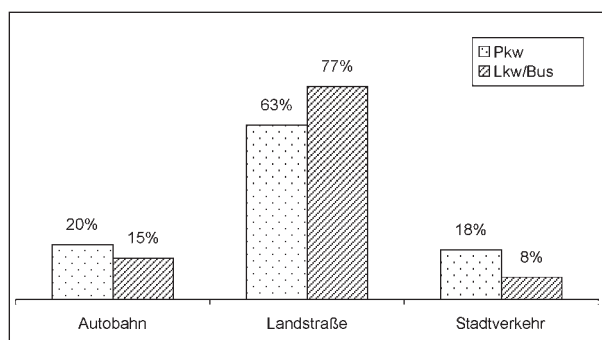


Bild 22: Verbesserungsbedarf nach Straßentyp

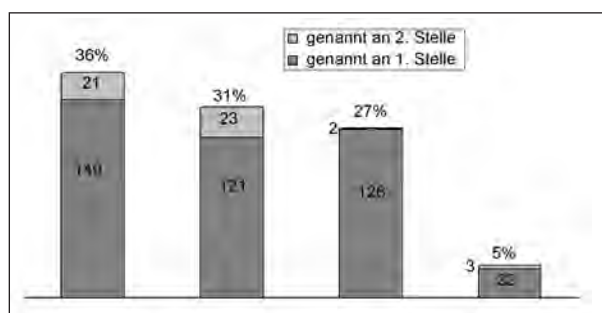


Bild 23: Verbesserungsbedarf in Abhängigkeit der Witterung

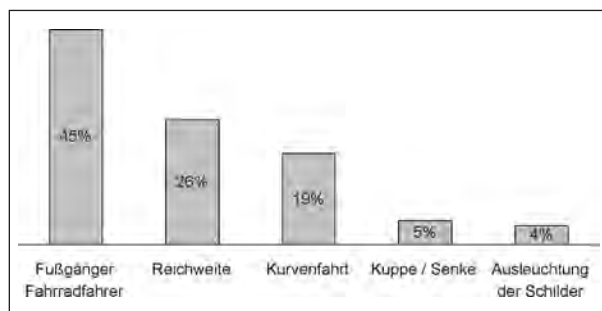


Bild 24: Verbesserungsbedarf nach Fahrsituation

tuation und 27 % die Dunkelheit an¹⁷. Bei Schneefall würde die Geschwindigkeit aufgrund der möglichen Glätte stark reduziert, sodass für diese Geschwindigkeit die Sicht ausreichend sei, so viele der Befragten.

Die zu geringe Reichweite des eigenen Scheinwerferlichtes gaben 26 % der Teilnehmer als verbesserungswürdig an. Ein Kurvenlicht forderte 19 % der Befragten mit der höchsten Priorität für eine sichere Fahrt bei Dunkelheit. Die dynamische Leuchtweitenregelung, die Kuppen und Senken ausleuchtet, sowie ein breites bzw. hohes Licht, das seitlich angebrachte und Überkopfschilder besser ausleuchtet, wurden von 5 % bzw. 4 % der Befragten als sehr wichtig erachtet.

In Kapitel 3.2.3 werden die in diesem Kapitel sachlich zusammengestellten Fakten der Umfrage in

¹⁷ Es waren bis zu 2 Nennungen möglich.

Kernaussagen zusammengefasst. Grundlage für diese Aussagen sind zum einen Korrelationen zwischen Antworthäufungen, zum anderen Aussagen der Befragten, die sich nicht in den oben dargestellten Zahlen wiederfinden.

3.2.3 Auswertung

Neue Lichttechnik findet ihren Weg zuerst in die Oberklasse. Diese Oberklassefahrzeuge sind häufig als Firmenfahrzeuge auf der Autobahn unterwegs und werden bevorzugt von Fahrern im Alter von 25 bis 50 Jahre gefahren. Die Oberklassefahrzeuge sind aufgrund von Leasingverträgen bzw. der Zahlungsfähigkeit ihrer Fahrer die jüngsten Fahrzeuge unter den Pkw.

Kleinwagen sind im Durchschnitt am ältesten und fahren häufiger auf der Landstraße, wo die Fahrer dieser Klasse die Reichweite ihres Lichtes bemängeln und diese durch die richtige Verwendung der Leuchtweitenregelung maximieren. Kleinwagen werden oft von weiblichen oder jungen Fahrern geführt.

Lkw sind aufgrund der guten Wiederverkaufsbedingungen sehr jung. Trotzdem ist neue Lichttechnik, wie zum Beispiel Xenon-Licht, nur sehr selten bei Lkw und Bussen anzutreffen. Sowohl Lkw als auch Busse sind Arbeitsplätze für die Fahrzeugführer und so wird zum Beispiel auf die Ergonomie des Sitzes großen Wert gelegt. In neue lichttechnische Entwicklungen, die hier wie im Automobil aufpreispflichtig sind, wird allerdings aus Kostengründen nicht investiert.

Die Blendung durch den Gegenverkehr und die unzureichende Ausleuchtung des Verkehrsraumes werden von der Mehrzahl der Fahrer bemängelt. Berufskraftfahrer bemängeln hier die mangelhafte Sicht aufgrund schlechter Ausleuchtung stärker als Pkw-Fahrer. Zwei Drittel aller Befragten fühlen sich durch den Gegenverkehr geblendet. Ist zudem die Straße nass, steigt die Zahl der Geblendeten noch weiter. Bei nasser Fahrbahn wird die Stadtfahrt als sehr unübersichtlich kritisiert, da sich durch die Spiegelungen die Anzahl der zu interpretierenden Lichtsignale verdoppelt.

In einer zusätzlich durchgeführten Online-Umfrage¹⁸ sahen 31 % dieser Befragten die „unzureichende Ausleuchtung der Fahrbahn“ und 69 % das „Blenden durch andere Fahrzeuge“ als problematisch an. Dieses Ergebnis war unerwartet, da das Thema „Blendung“ stärker in den Medien publiziert wird und somit eher in den Köpfen der Befragten präsent ist.

Die Zufriedenheit mit dem eigenen Abblendlicht ist in der Oberklasse mit 88 % sehr hoch. In der Mittelklasse fordert jeder Dritte und unter den Kleinwagenfahrern sogar jeder Zweite eine Verbesserung des Abblendlichtes. Unter den Lkw- und Bus-Fahrern wünscht sich auch jeder Dritte ein besseres Abblendlicht. 12 % der Pkw der Umfrage besaßen ein Xenon-Licht.

Die Zufriedenheit mit dem eigenen Fernlicht ist insgesamt sehr hoch. Nur 12 % der Pkw-Fahrer und 11 % der Berufskraftfahrer sind der Meinung, dass hier Verbesserungsbedarf besteht.

Folgende Trends lassen sich aus den Ergebnissen der Umfrage bezüglich des Scheinwerferlichtes ableiten:

- Je hochwertiger das Fahrzeug, desto größer ist die Zufriedenheit mit dem eigenen Scheinwerferlicht.
- Je neuer das Fahrzeug, desto höher ist die Zufriedenheit mit dem eigenen Scheinwerferlicht.
- Nur 3 % der Pkw-Fahrer, die ein Xenon-Licht besitzen, wollen ein noch besseres Scheinwerferlicht.
- Verbesserungsbedarf besteht vor allem auf der Landstraße, bei Regen oder Nebel und Dunkelheit und bei der Ausleuchtung von Fußgängern, Radfahrern und Kurven sowie der Reichweite des Scheinwerferlichtes.

Die Ausleuchtung des Verkehrsumfeldes ist in den Augen der Umfrage-Teilnehmer noch nicht ausreichend. Gezielt nach dem Ort einer besseren Ausleuchtung befragt, fordern jeder Dritte eine bessere Ausleuchtung der Überkopfschilder bzw. Schilderbrücken, jeder Vierte eine bessere Ausleuchtung der seitlichen Schilder und 40 % der Befragten eine bessere Ausleuchtung der seitlichen Umgebung.

Die Leuchtweitenregelung wird von vielen Autofahrern nicht ordnungsgemäß verwendet. Viele justieren diese nur einmal und verändern die Einstellung beim Beladen nicht. Hier sollte für den Bestand an

¹⁸ Entscheidungsfrage: Welche Situation erachten Sie beim Autofahren als problematischer? a) Von anderen Fahrzeugen geblendet werden, b) Unzureichende Ausleuchtung der Fahrbahn.

Fahrzeugen, die eine manuelle Leuchtweitenregelung besitzen, Aufklärungsarbeit über die Funktion und richtige Benutzung durchgeführt werden und bei Neufahrzeugen der Einbau einer automatischen oder dynamischen Leuchtweitenregelung vom Gesetzgeber gefordert werden.

Die Aussagen zur Zahlungsbereitschaft für neue lichttechnische Einrichtungen am Fahrzeug ergab folgende Erkenntnisse:

- Fahrer, die mit ihrem eigenen Licht unzufrieden sind, würden für Xenon-Licht nicht mehr bezahlen als Fahrer, die mit ihrem Licht zufrieden sind.¹⁹
- Die automatische bzw. dynamische Leuchtweitenregelung ist, in den Augen der Befragten, ein Muss in der Serienausstattung.
- Jeder zweite Fahrer ist bereit, für ein Licht, das den Gegenverkehr nicht blendet, einen Aufpreis zu zahlen. Das Bewusstsein bei den Fahrern ist vorhanden, allein die technische Umsetzung fehlt zurzeit.
- Die Windschutzscheibe, die den Fahrer vor Gefahren, die dieser übersehen hat, warnt, ist ein echter Mehrwert. Hierfür würden Käufer den höchsten Aufpreis bezahlen.

Abschließend werden die häufigsten Äußerungen, welche die Befragten in einem Textfeld anbringen konnten, genannt. In Klammern steht jeweils die Anzahl der 429 Befragten, die diese Aussage trafen. Viele verzichteten hier auf eine Antwort, da dies meistens einige Minuten Zeit beansprucht hätte.

Aussagen zum Thema „Blenden“:

- Xenon-Licht blendet (14),
- Blendung sollte minimiert werden (13),
- Verpflichtung zur dynamischen Leuchtweitenregelung/zum automatisch abschaltenden Fernlicht (8),
- optimale Balance zwischen „Helligkeit und Reichweite“ und dem „Nicht-Blenden“ finden (5).

Aussagen zum Thema „Ausleuchtung“:

- Xenon-Licht sollte serienmäßig sein (12),

- Kurvenlicht sollte serienmäßig sein (11),
- Nebelscheinwerfer verbessern (8),
- helleres Licht wird gefordert (7),
- Ausleuchtung des Seitenstreifens (6),
- Nebelscheinwerfer sollten serienmäßig sein (5),
- Schilder sollten besser ausgeleuchtet werden (5).

Aussagen ohne Themenvorgabe:

- Schlechte Erkennbarkeit der weißen Fahrbahnmarkierung (7),
- Tagesfahrlicht gesetzlich verpflichtend einführen (5),
- Lebensdauer der Halogen-Lampen verbessern (4),
- Lichtquellen in der Stadt reduzieren (Werbeschilder) (3),
- automatische Geschwindigkeitsbegrenzung beim Einschalten der Nebelschlussleuchte (3),
- regelmäßige Überprüfung der Scheinwerfereinstellung und -funktion gesetzlich vorschreiben (3).

4 Parameter eines optimalen Scheinwerfersystems

4.1 Anforderungen

Der automobiler Scheinwerfer dient primär der Ausleuchtung des Verkehrsraumes. Der Fahrzeugführer möchte in jeder Situation alle für den Straßenverkehr relevanten Objekte rechtzeitig erkennen können. Sekundär soll durch den Scheinwerfer ein typisches Signalbild erzeugt werden, um so eine Erkennbarkeit und eine Identifikation des Fahrzeuges zu ermöglichen. Dabei muss jegliche Blendung weitestgehend minimiert werden. Die Anforderungen werden demnach sowohl vom Fahrzeugführer, als auch von anderen Verkehrsteilnehmern definiert.

Nur wenige Faktoren im Straßenverkehr sind konstant. Ständig wechselnde Witterungsverhältnisse, Straßentypen oder Fahrdynamik erfordern ein adaptives Scheinwerfersystem für Kraftfahrzeuge. Nur so können die beschriebenen Anforderungen erfüllt und die Sicherheit im Straßenverkehr erhöht

¹⁹ Sinngemäße Aussage vieler Fahrer: „Licht am Fahrzeug ist ein serienmäßiges Sicherheitsfeature und sollte in der Serienausstattung dem Stand der Technik entsprechen, also größtmögliche Sicherheit bieten.“

werden. Zur Festlegung von adaptiven Funktionen werden im folgenden Kapitel die Faktoren analysiert, auf die sich ein automobiler Scheinwerfer einstellen muss.

4.2 Fahrzeuge im Verkehrsraum

4.2.1 Minimierung der Blendung

Unter der Annahme guter Witterungs- und Sichtverhältnisse wird eine optimale Erkennbarkeitsentfernung des Fahrzeugführers mit dem Fernlicht erreicht. Das Licht wird symmetrisch nahezu parallel in den vor dem Fahrzeug befindlichen Verkehrsraum abgestrahlt, um eine möglichst große Reichweite umzusetzen. Es können Reichweiten von typischerweise 200 m realisiert werden. Die Ausleuchtung des Verkehrsraumes darf allerdings auf keinen Fall zur Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen. Aus diesem Grund generieren automobiler Serienscheinwerfer neben dem Fernlicht die bekannte Abblendlichtverteilung.

Das Abblendlicht ist asymmetrisch und wird meist unter einem Winkel von $0,573^\circ$ (1 %) auf die Fahrbahn projiziert, wobei in diesem Fall die maximale Reichweite bei einer typischen Anbauhöhe von 0,65 m auf 65 m begrenzt ist. Bis zu dieser festgelegten maximalen Reichweite soll die Straße hell ausgeleuchtet, dahinter allerdings dunkel sein. So kann die Blendung des Gegenverkehrs verringert werden. Aufgrund dieser Forderung besitzt die Abblendlichtverteilung die sog. Hell-Dunkel-Grenze, die den ausgeleuchteten Bereich vor dem Fahrzeug vom nicht ausgeleuchteten Bereich trennt.

Die Hell-Dunkel-Grenze besitzt eine unabhängig von den Umgebungsbedingungen charakteristische

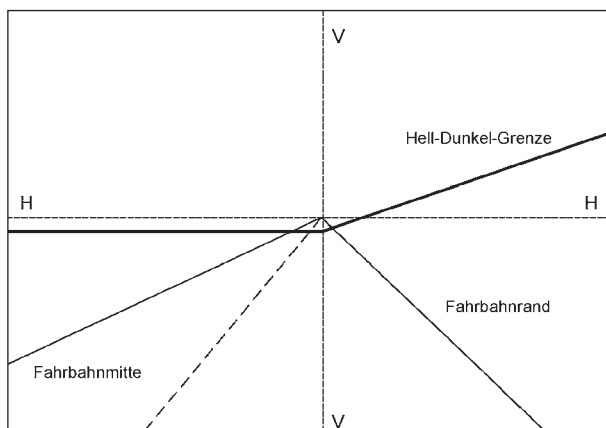


Bild 25: Schematische Darstellung der Lage der Hell-Dunkel-Grenze relativ zur Straße

Form. Sie verläuft bis zur Fahrbahnmitte parallel zur Fahrbahnoberfläche und knickt dann abhängig vom Scheinwerfertyp unter einem Winkel von 15° oder 45° (sog. Z-Verteilung) nach oben ab. Durch diese asymmetrische Form wird die rechte Fahrbahnhälfte weiter ausgeleuchtet als die linke Fahrbahnhälfte. So wird die Erkennbarkeitsentfernung unter Berücksichtigung der Blendungsminimierung anderer Verkehrsteilnehmer verbessert (Bild 25).

Ein wesentlicher Nachteil der Hell-Dunkel-Grenze ist jedoch ihre unabhängig von der Position eines vorausfahrenden oder entgegenkommenden Fahrzeugs konstante Lage und Form. Um eine Blendung dieser Verkehrsteilnehmer zu vermeiden, muss der Fahrzeugführer bereits sehr früh vom Fernlicht auf das Abblendlicht umschalten, auch wenn die Entfernung zum anderen Fahrzeug noch sehr groß ist. Diese damit verbundene unnötig frühe Reduzierung der Erkennbarkeitsentfernung gilt es zu vermeiden.

Eine situativ-adaptive Modulation könnte die Reichweite des Systems stets unter der Berücksichtigung der Blendungsminimierung optimieren. Denkbar ist eine intelligente Leuchtweitenregelung, welche abhängig von der Entfernung zum anderen Fahrzeug eine analoge Anpassung der Reichweite des Abblendlichtes vornimmt. Man spricht in diesem Fall von der sog. gleitenden Leuchtweite. Ein auf diese Weise arbeitender Prototyp befindet sich derzeit in der Entwicklung. Erste Testfahrten lieferten erste positive Ergebnisse.

Neben der Optimierung der Reichweite des Abblendlichtes durch eine Verschiebung der Hell-Dunkel-Grenze ist auch eine Modulierung ihrer Form vorstellbar. Befindet sich lediglich ein vorausfahrendes Fahrzeug im Verkehrsraum, könnte nur die Reichweite der rechten Fahrbahnseite angepasst werden. Befinden sich ausschließlich Fahrzeuge auf der Gegenfahrbahn, kann analog nur diese Seite der Lichtverteilung moduliert werden.

4.2.2 Optimierung des Signalbildes

Das Signalbild eines Fahrzeuges soll seiner Detektion und seiner Identifikation dienen. Das rechtzeitige Entdecken durch den Gegenverkehr ist eine Grundvoraussetzung für die Sicherheit im Straßenverkehr.

In den skandinavischen sowie einigen anderen Ländern ist es gesetzlich vorgeschrieben, Fahrzeuge auch am Tag mit Licht zu führen (Bild 26). Diese

Fahrzeuge sind häufig mit einer sog. Fahrlichtschaltung ausgestattet, welche die normale Fahrzeugbeleuchtung bei laufendem Motor (teilweise auch mit gedimmten Abblendscheinwerfern) einschaltet. Durch diese Maßnahme sollen Unfälle verhindert werden, welche bedingt durch eine schlechte Erkennbarkeit der Fahrzeuge ohne Tagesfahrlicht verursacht werden. Hierbei ergaben statistische Erhebungen eine Verminderung der Unfallzahlen.

Aufgrund der teilweise auch in Deutschland auftretenden ungünstigen Sichtverhältnisse wäre eine solche Regelung auch für den deutschen Straßenverkehr empfehlenswert. Besonders in Situationen, in denen der Verkehrsbereich selbst abgeschattet ist (z. B. in Alleen oder unter Brücken), könnte die

Erkennbarkeit durch ein Tagesfahrlicht erhöht werden (Bild 27). Seit dem 01. Oktober 2005 gibt es bereits Empfehlungen vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung für das Fahren mit Licht am Tag.

Im Unterschied zu Kraftfahrzeugen besteht für motorisierte Zweiräder aufgrund der schmalen Silhouette bereits seit 1988 eine Pflicht für das Fahren mit Abblendlicht am Tag. Dadurch besitzen Motorräder, Klein- und Leichtkrafträder ein charakteristisches Erscheinungsbild und sind von anderen Fahrzeugen gut zu unterscheiden. Kritikern zufolge könnte mit der Einführung eines Tagesfahrlichtes für jedes motorisierte Fahrzeug eine erhöhte Gefährdung der Zweiräder verbunden sein. Des Weiteren sprechen die mit dem zusätzlichen Energie-

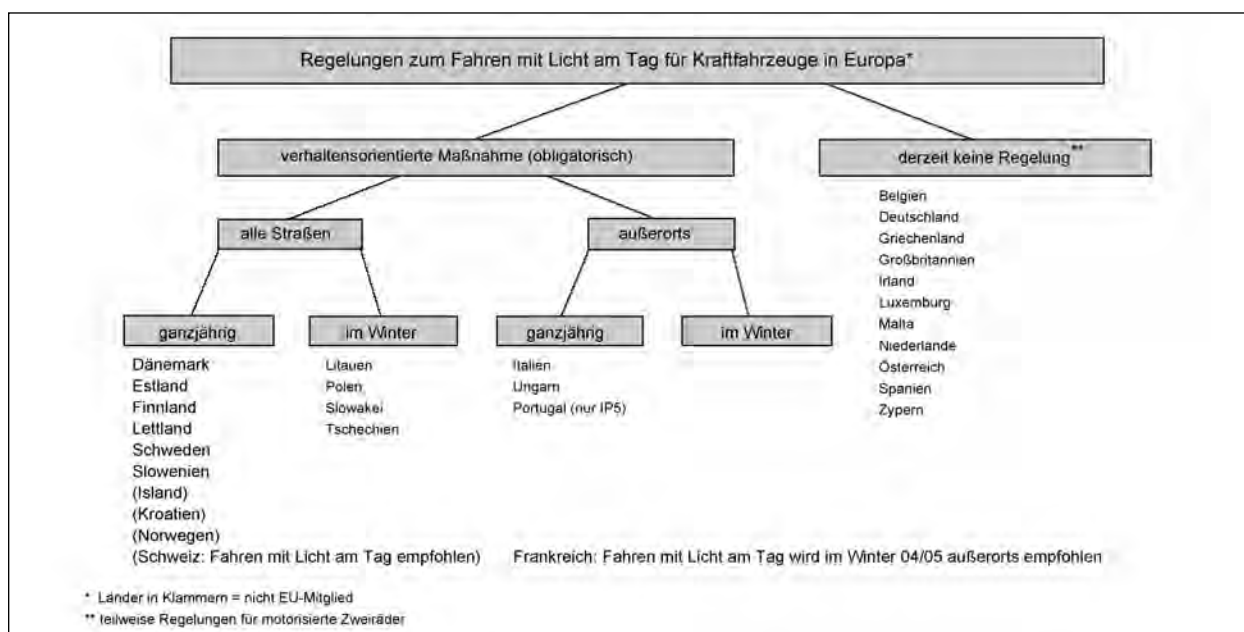


Bild 26: Obligatorische Regelungen für Tagesfahrlicht; Quelle: [SCHO05]



Bild 27: Gegenverkehr ohne (links) und mit (rechts) Tagesfahrlicht in einer Allee, Quelle: [SCHO05]

verbrauch verbundenen hohen Kosten gegen eine Einführung des Tagesfahrlichtes.

Zur Analyse aller Vor- und Nachteile führte die BAST²⁰ anhand von Literaturdaten eine Kosten- und Nutzenrechnung durch [SCHO05]. Danach können in Deutschland durch das Fahren mit Licht am Tag pro Jahr etwas mehr als 3 % aller Unfälle vermieden werden. Die angeführten möglichen Nachteile für schwächere Verkehrsteilnehmer konnten durch die Literaturanalyse nicht bestätigt werden. Die BAST sieht das Fahren mit Licht am Tag im Hinblick auf eine nachhaltige Verbesserung der Straßenverkehrssicherheit als eine effiziente Maßnahme an.

Die Zielstellung eines Tagesfahrlichtes unterscheidet sich maßgeblich von der eines Abblendlichtes. Der Abblendlichtscheinwerfer generiert hohe Lichtstärken zur Ausleuchtung der Straße. Zur Blendungsminimierung bei Nacht müssen die Lichtstärken oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze limitiert werden. Für ein Tagesfahrlicht ist eine Ausstrahlung in den gesamten vorderen Halbraum zu empfehlen, wobei im Mittel die Lichtstärke in Richtung des entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers größer sein sollte als die des Abblendlichtes.

Seit einigen Jahren bieten einige Fahrzeug- und Scheinwerferhersteller Tagfahrleuchten mit einer eigens dafür entwickelten Lichtverteilung an (Bild 28). Hier können im Hauptscheinwerfer eingebundene Systeme sowie Zusatzscheinwerfer Verwendung finden. Neben den bereits im Fahrzeug integrierten Systemen bietet der Markt auch Nachrüstsysteme an.

Nach der ECE-Regelung 87 muss die Lichtstärke in der Bezugsachse mindestens 400 cd betragen und darf in keiner Richtung 1.200 cd überschreiten. So kann die Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer unter normalen Tageslichtbedingungen ausgeschlossen werden. Die beleuchtete Fläche ist auf 25 bis 200 cm² begrenzt. Die Beleuchtung am Heck des Fahrzeuges bleibt inaktiv.

Einzelnen Untersuchungen in Nordeuropa zufolge ist die visuelle Wirkung von Tagfahrleuchten in den meisten Verkehrssituationen am Tage vergleichbar mit der des konventionellen Abblendlichtes. Demnach wäre eine Implementierung einer Tagfahrleuchte in jedes Fahrzeug unnötig. Neben den licht-



Bild 28: Scheinwerfer mit integrierter LED-Tagfahrleuchte bestehend aus 5 LEDs (Audi, Modell: A8 W12)

technischen Aspekten müssen des Weiteren aber auch die Wirtschaftlichkeit der Systeme sowie die Lebensdauer der Glühlampen verglichen werden. Da Tagfahrleuchten ihre Funktion trotz wesentlich geringerer Leistungsaufnahme mit hinsichtlich der Lebensdauer optimierten Lichtquellen erfüllen, sind diese somit zu bevorzugen.

Bisher noch nicht in Serienfahrzeugen realisiert, aber dennoch denkbar, ist eine Anpassung des Tagesfahrlichtes an die Umfeldleuchtdichten. Die simultane Erhöhung beider Scheinwerferlichtstärken bei einer Erhöhung der Umfeldleuchtdichte sorgt für einen konstanten Kontrast. So wird das Signalbild des Fahrzeugs vom Betrachter stets gleich wahrgenommen.

4.3 Witterungs- und Sichtverhältnisse

Die Sicht auf den Verkehrsraum wird durch verschiedene zeitabhängige Helligkeiten und Wetterverhältnisse beeinflusst. Die Helligkeiten variieren zum einen im Tageszyklus (Dunkelheit, Dämmerung, Tageshelligkeit), aber auch mit den Jahreszeiten.

Verschiedene Wetterverhältnisse beeinflussen neben den fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs insbesondere auch die Sicht aus den Kraftfahrzeugen. Wird bei klarem Wetter von „guten Sichtverhältnissen“ gesprochen, so ändert sich dies bei einsetzendem Regen oder Schneefall zu „eingeschränkten Sichtverhältnissen“ bis hin zu dichtem Nebel mit sehr geringen Sichtweiten.

Eingeschränkte Sichtverhältnisse stellen eine erhöhte Anforderung an die Scheinwerfer sowie ein

²⁰ BAST: Bundesanstalt für Straßenwesen

erhöhtes Risiko für den Autofahrer dar. Teilweise können die traditionellen Lichtverteilungen diesen erhöhten Anforderungen nicht mehr gerecht werden.

Daher ergibt sich die Notwendigkeit einer intelligenten Anpassung der Lichtverteilung und der Hell-Dunkel-Grenze an die Witterungsbedingungen. Im Folgenden wird diese Anpassung an verschiedene Witterungsbedingungen diskutiert.

4.3.1 Nebel

Nebel führt zu einer starken Sichtverschlechterung, die aus der Streuung des natürlichen und des von den Scheinwerfern abgestrahlten Lichtes hervorgeht. Weiterhin kommt es zur Absorption des abgestrahlten und reflektierten Lichtes. Da der absorbierte Teil allerdings sehr gering ist, soll dieser hier lediglich erwähnt werden. Diese Effekte bewirken, dass die Leuchtdichteunterschiede zwischen Objekten im Straßenverkehr und ihrem Umfeld reduziert werden und somit die Erkennbarkeit dieser Objekte erschwert wird. Zur Charakterisierung des Nebels wird üblicherweise die Normsichtweite verwendet.

Ursache für diese Effekte sind die in der Luft enthaltenen Wassertröpfchen mit einem Durchmesser von ca. $d = 10^{-6}$ m, die an kleinen Partikeln in der Luft kondensiert sind. Die Dichte von bis zu 500 Tropfen pro cm^3 ist deutlich größer, als die Tropfendichte bei Regen. Aufgrund des kleinen Durchmessers der Wassertropfen kommt es zur Streuung des Lichtes, die mit der Mie-Theorie beschrieben werden kann. Diese Streuung bewirkt eine mit zunehmender Trübungsdichte und steigendem Beobachterabstand exponentielle Reduktion der Objektleuchtdichte [WOL06]. Des Weiteren verringert sich durch das Auftreten einer Schleierleuchtdichte der Objektcontrast. Die Schleierleuchtdichte entsteht durch die Aufhellung des Umfeldes bedingt durch die Lichtstreuung. Sinkt der Objektcontrast, so sinkt gleichzeitig die Sichtweite.

ROSENHAHN [ROS99] untersuchte in seiner Dissertation die Abhängigkeit der Streuleuchtdichte von verschiedenen Parametern. Seine Untersuchungen ergaben, dass die Neigung der Fahrzeugscheinwerfer eine essenzielle Rolle spielt. Eine stärkere Neigung führt zu einer signifikanten Reduktion der Streuleuchtdichte. Wird der Scheinwerfer beispielsweise von -1 % auf -2 % geneigt, sinkt die Streuleuchtdichte in einer Entfernung von 20 m

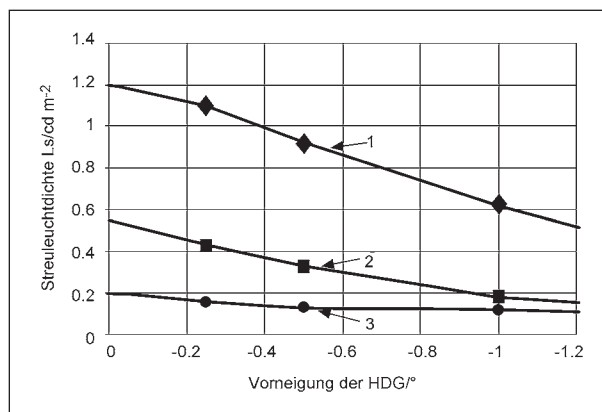


Bild 29: Streuleuchtdichten in Abhängigkeit von der Hell-Dunkel-Grenz-Einstellung bei einer Normsichtweite von 50 m; Quelle: [ROS99]

1: Streuleuchtdichte bei 12 m, 2: Streuleuchtdichte bei 20 m, 3: Streuleuchtdichte bei 32 m

um die Hälfte (Bild 29). Eine starke Neigung hat allerdings zur Folge, dass die Ausleuchtung eine geringere Reichweite besitzt. Dementsprechend sollte das Licht nur bei starkem Nebel unter größerem Winkel auf die Straße projiziert werden. Optimal wäre eine sichtweitenabhängige Winkelanpassung der Hell-Dunkel-Grenze.

Weiterhin ergaben seine Untersuchungen eine Abhängigkeit der Streuleuchtdichte von der Anbauposition der Scheinwerfer, resultierend aus der unterschiedlichen Augenposition des Fahrers relativ zum jeweiligen Scheinwerfer. Der Winkel zwischen der Beleuchtungs- und der Beobachtungsrichtung ist für den linken Scheinwerfer stets geringer. Der linke Scheinwerfer erzeugt eine deutlich größere Keulenstreuleuchtdichte als der rechte Scheinwerfer (Bild 30). Für zukünftige Nebellichtverteilungen bedeutet dies, den Lichtstrom des rechten Scheinwerfers im Vergleich zum linken Scheinwerfer zu erhöhen. ROSENHAHN schlägt hier einen 25%igen Unterschied zwischen rechtem und linkem Scheinwerfer vor.

Neben der Optimierung der Reichweite ist es wichtig, die Breite der Seitenausleuchtung den Nebelbedingungen anzupassen. Eine Erhöhung der Leuchtdichte in diesen Bereichen kann die Orientierung des Fahrzeugführers verbessern. Die heutigen klassischen Nebelscheinwerfer generieren eine Seitenausleuchtung mit einer Breite von $\pm 35^\circ$. Nach WAMBSGANß [WAM96] bewirkt eine größere Streubreite als 70° keine weitere Verbesserung der Beurteilung durch den Fahrzeugführer. Die Breite der Ausleuchtung zukünftiger Nebellichtverteilungen kann dementsprechend den klassischen Nebelscheinwerfern entnommen werden.

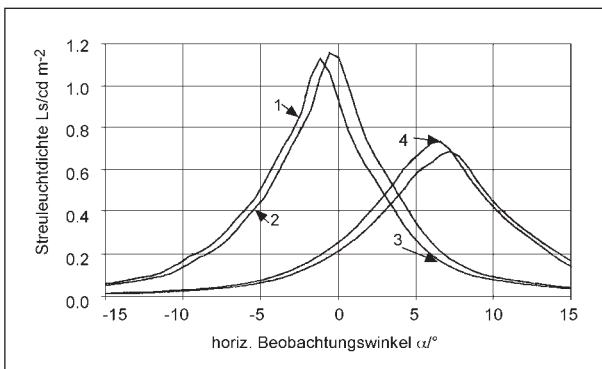


Bild 30: Horizontalschnitte durch die Streuleuchtdichteverteilungen bei einem Beobachtungswinkel von $\beta = -5^\circ$ für verschiedene Anbaupositionen; Quelle: [ROS99]
 1: linker Scheinwerfer (Standard), 2: linker Scheinwerfer (20 cm nach innen verschoben), 3: rechter Scheinwerfer (Standard), 4: rechter Scheinwerfer (20 cm nach innen verschoben)

Die heute gängigen Nebelscheinwerfer erreichen Beleuchtungsstärke von $E_{25} = 10 \text{ lx}$ auf dem Messschirm in 25 m Entfernung. ROSENHAHNs Untersuchungen [ROS99] ergaben eine wesentlich höhere optimale Beleuchtungsstärke von $E_{25} = 45,5 \text{ lx}$. Obwohl die Streuleuchtdichte durch die Erhöhung der Lichtstärke anstieg, konnte in Versuchen eine bessere Erkennbarkeit der Objekte durch die stärkere Ausleuchtung der Straße im Nebel nachgewiesen werden.

Bei den meisten Fahrzeugen kann der 8 m bis 10 m lange Bereich direkt vor dem Fahrzeug nicht eingesehen werden. Bei einer Nebellichtverteilung gilt es, diesen Bereich nicht zu beleuchten, da durch dessen Ausleuchtung lediglich der Streulichtanteil ansteigt [DAM95].

Eine bessere Realisierung des Nebellichtes könnte über eine stärkere Neigung der Hauptscheinwerfer in Kombination mit den bereits etablierten zusätzlichen Nebelscheinwerfern erreicht werden.

Eine wirkliche Verbesserung der Situation lässt sich nur durch eine optimierte Lichtverteilung erreichen, die sich zudem adaptiv an die Sichtweite anpasst.

4.3.2 Regen

Regensituationen können vielseitige Ausprägungsformen und somit verschiedene lichttechnische Eigenschaften besitzen. Man unterscheidet die Zustände „nass“, „feucht“ und den „Übergangszustand“.

Bedingt durch die flachen Winkel für die Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung der Fahrbahn

oberfläche sorgen bei trockener Fahrbahn hauptsächlich die Oberflächengesteine für die Reflexion des ausgestrahlten Lichtes. Die Erkennbarkeit der Fahrhahnoberfläche durch den Fahrer kann über den Leuchtdichtekoeffizienten der Rückwärtsreflexion, die Blendung des Gegenverkehrs durch den Leuchtdichtekoeffizienten der Vorwärtsreflexion beschrieben werden. Der Leuchtdichtekoeffizient ergibt sich aus dem Verhältnis der Leuchtdichte L aus der Richtung der Beleuchtung bzw. Beobachtung und der senkrecht zur Straßenebene gemessenen Beleuchtungsstärke E_{\perp} .

$$R'(\alpha_h, \alpha_v, \beta) = \frac{L}{E_{\perp}} \quad (1)$$

α_h beschreibt den Winkel zwischen der Beleuchtungsrichtung und der Beobachtungsrichtung, α_v den Winkel zwischen der Lichteinfallrichtung und Straßenebene und β den Winkel zwischen Beobachtungsrichtung und Straßenebene.

Die sich ansammelnde Wasserschicht beim Niederschlag führt zu einer glatten Fahrhahnoberfläche und somit zu einem wesentlich höheren Leuchtdichtekoeffizienten für die Vorwärtsreflexion an der Grenzschicht Luft-Wasser. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung der Leuchtdichte am Auge des entgegenkommenden Fahrers und somit zu einer Blendung. Untersuchungen von von HOFFMANN [HOF03] haben gezeigt, dass die Beleuchtungsstärke am Auge auf geraden Streckenabschnitten bei feuchter Fahrhahn etwa um den Faktor 4 und bei regennasser Fahrhahn etwa um den Faktor 9 ansteigt. Weiterhin sinkt der Leuchtdichtekoeffizient für die Rückwärtsreflexion, wodurch die Erkennbarkeit der verkehrsrelevanten Objekte reduziert wird.

Die Blendung des Gegenverkehrs ist ein bedeutender Punkt bei regennasser Fahrhahn. Eine Bewertung der Blendung erfolgt über die am Auge gemessene Beleuchtungsstärke E_B [SCHM71]. Durch die geringere Rückreflexion des von den Scheinwerfern ausgestrahlten Lichtes befindet sich der Fahrzeugführer in einem niedrigeren Adaptationsniveau als bei trockener Fahrhahn und ist infolge dessen blendungsempfindlicher. Kommt es in diesem Fall zu erhöhten Beleuchtungsstärken am Auge, die durch den höheren Leuchtdichtekoeffizienten bedingt sind, steigt die Blendung im Vergleich zur trockenen Fahrhahn um ein Vielfaches. Aus dieser Blendung resultiert eine Erhöhung der Schwellenleuchtdichte der Augen, d. h. eine Beeinträchtigung

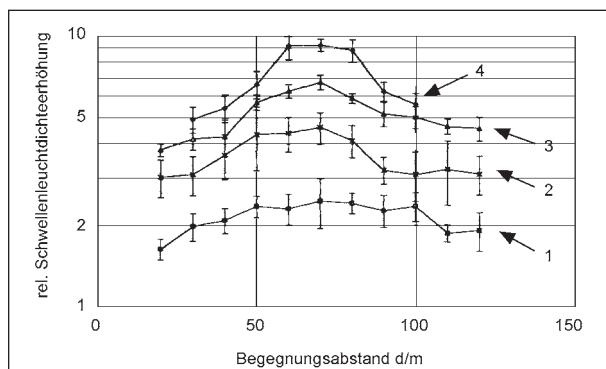


Bild 31: Schwellenleuchtdichteerhöhung in verschiedenen Entfernungen aufgetragen für unterschiedliche Nässegrade; Quelle: [ROS99]

1: direkte Blendung auf trockener Fahrbahn, 2: 25%-Blendung feuchte Fahrbahn, 3: 50%-Blendung nasse Fahrbahn, 4: 100%-Blendung sehr nasse Fahrbahn

gung der Sehleistung. Nach ROSENHAHN [ROS99] kann die ohne Blendung bestehende Unterschiedsschwelle bei sehr nasser Fahrbahn auf einen 10fachen Wert ansteigen, d. h., die Sehleistung beträgt lediglich 10 % der Ausgangssituation (Bild 31). Aufgrund der Readaptionszeit besteht diese Beeinträchtigung auch nach der Blendung noch für einige Sekunden. Die genaue Readaptionszeit richtet sich nach der Blenddauer und der Blendbeleuchtungsstärke.

Die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn richten sich neben der auf der Fahrbahnoberfläche befindlichen Wassermenge auch nach der Menge der auf diese Fläche aufschlagenden Wassertropfen. Die Tropfeneinschläge führen zu einer weniger spiegelnden Fläche und können die Vorwärtsreflexion um bis zu 25 % reduzieren.

Die Reduktion der Beleuchtungsstärke in den Bereichen, in denen durch die Reflexion auf der nassen Fahrbahnoberfläche eine Blendung des Gegenverkehrs herbeigeführt wird, ist ein grundlegendes Ziel eines Schlechtwetterlichtes. Laut ROSENHAHN [ROS99] ist es zweckmäßig, die Intensität der Vorfeldausleuchtung zu verringern. Dies reduziert die Blendung des Gegenverkehrs durch die Reflexion auf der Fahrbahn. Seine Untersuchungen ergaben eine maximale Beleuchtungsstärke von $E_{25} = 2 \text{ lx}$ auf einem 25 m entfernten Prüfschirm. Eine nachteilige Wirkung auf den Fahrzeugführer durch die geringeren Leuchtdichten im Vorfeld konnte durch seine Untersuchungen ausgeschlossen werden. DAMASKY bestätigt diese Aussage in seiner Dissertation [DAM95]. Die Blendung für den Gegenverkehr ist durch die dicht vor dem Blendfahrzeug befindliche Vorfeldausleuchtung am größ-

ten. Da dieser Bereich ohnehin bis 8 m vor dem Fahrzeug vom Fahrzeugführer nicht eingesehen werden kann, gilt es, diese Bereiche nicht zu beleuchten und somit Blendquellen zu reduzieren.

Um den Komfort des Fahrers zu erhöhen, sollte weiterhin die Beleuchtungsstärke der nahen Seitenausleuchtung erhöht werden. Die rechte Seitenausleuchtung sollte hier eine geringere Beleuchtungsstärke aufweisen als die linke Seitenausleuchtung, da der rechte Fahrbahnrand durch den geringeren Abstand des Seitenstreifens und des Randbewuchses bei gleicher Beleuchtungsstärke eine höhere Leuchtdichte erzeugt. Nach den Ergebnissen von ROSENHAHN [ROS99] sollte die Beleuchtungsstärke für die rechte Seite $E_{25} = 20 \text{ lx}$ und für die linke Seite $E_{25} = 25 \text{ lx}$ betragen. Diese Werte beziehen sich ebenfalls auf eine 25 m entfernte Prüfwand. Die Erhöhung der Leuchtdichte in diesen Bereichen kann die Orientierung des Fahrzeugführers verbessern [HUH99].

Zur Umsetzung des Regenlichtes bedarf es aufgrund der geänderten Leuchtdichten in den verschiedenen Bereichen der Fahrbahn einer veränderten Lichtverteilung.

4.3.3 Schnee

Bei schneebedeckten Strecken kommt es zu einer Erhöhung des Reflexionsgrades der Fahrbahn und der Fahrbahnränder. Deshalb ist die Leuchtdichte trotz gleicher vom Scheinwerfer erzeugter Beleuchtungsstärke höher als bei schneefreien Flächen. Dies gilt es bei der Konzeption adaptiver Lichtverteilung zu berücksichtigen. In Bereichen, in denen der Schnee für eine hohe Reflexion sorgt, ist es zweckmäßig, die Lichtstärke entsprechend zu verringern, um eine Blendung des Fahrzeugführers sowie anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden.

Bei fallendem Schnee kann es ähnlich wie in einer Nebelsituation zu einer Blendung des Fahrzeugführers durch das von den Schneeflocken reflektierte Licht kommen. In diesem Fall sollte das ausgestrahlte Licht unter einem flacheren Winkel zur Fahrbahn ausgestrahlt werden.

Selbstverständlich sollte der Fahrer die Geschwindigkeit seines Fahrzeugs den Sichtverhältnissen anpassen, sodass er sein Fahrzeug innerhalb der Sichtweite vor einem plötzlich auftauchenden Hindernis anhalten kann. Der Vergleich der Sichtweite mit dem eigenen Anhalteweg, der aus der gefahrenen Geschwindigkeit resultiert, ist für den Fahrer

nicht einfach durchzuführen. Der Autofahrer kann durch Assistenzsysteme, welche die Lichtverteilungen an die Sichtverhältnisse anpassen, unterstützt werden. Sensoren in heutigen Fahrzeugen erfassen bereits vielfältige Daten wie Umgebungshelligkeit, Temperatur, Regen und Nebel. Die Implementierung der oben beschriebenen Ideen in das Fahrzeug ist also keine Vision. Mit einer Serieneinführung ist zu rechnen.

Zur maximalen Steigerung der Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr ist es nötig, neben den Frontscheinwerfern auch andere lichttechnische Einrichtungen am Kraftfahrzeug adaptiv zu gestalten. Hier sei im Besonderen die Rückleuchte genannt. Die Rückleuchte dient in erster Linie dem Erkennen des Fahrzeuges durch andere Verkehrsteilnehmer. Eine Anpassung der Helligkeit an die Witterungsbedingungen zur Verbesserung der Erkennbarkeit ist durch eine Neufassung der ECE-Regelung 7 bereits vorgesehen.

4.4 Straßentyp und Streckengeometrie

4.4.1 Straßentyp

Neben einer Anpassung der Lichtverteilung an die Witterungs- und Sichtverhältnisse ist ferner eine Anpassung an den Straßentyp und seine Geometrie erforderlich.

Für die Ermittlung der nötigen Anforderungen für bestimmte Straßentypen müssen Faktoren berücksichtigt werden, die sich in Abhängigkeit vom Straßentyp ändern. Dazu zählen die Geschwindigkeit des Fahrzeuges, die Straßengeometrie, andere Verkehrsteilnehmer sowie der Adaptationszustand des Fahrzeugführers.

Landstraße

Die wohl größten Anforderungen an eine Scheinwerferlichtverteilung bestehen während einer Landstraßenfahrt. Die Geschwindigkeit des Fahrzeuges beträgt hier bis zu 100 km/h. Die Straßengeometrie ist relativ schmal, wodurch der seitliche Abstand zweier sich begegnender Fahrzeuge relativ schmal ist. Im Durchschnitt beträgt der Seitenabstand auf Bundesstraßen 3,40 m, auf Landstraßen außerorts 2,75 m, jeweils bezogen auf die Fahrzeugmitten [DAM95]. Landstraßen zeichnen sich weiterhin durch kleine Kurven-, Kuppen- oder Senkenradien aus (vgl. Kapitel 4.4.2). Durch die kleinen Kurven-

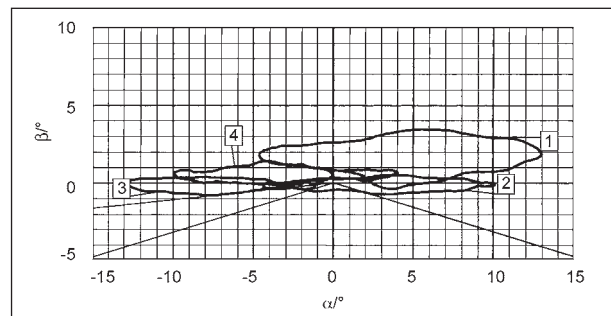


Bild 32: Zusammenfassung der einzelnen 90%-Objekte für Landstraßen; Quelle: [DAM95]

1: Verkehrszeichen rechts; 2: Leitposten rechts; 3: Leitposten links; 4: Augenposition des Gegenverkehrs

radien und die ständig wechselnden Geschwindigkeiten kommt es zu großen Nickwinkeln des Fahrzeuges und somit zu Verkippungen der Hell-Dunkel-Grenze auf der Fahrbahn. Die kleinen Kuppen- und Senkenradien verursachen eine Veränderung der Reichweite der Lichtverteilung. Eine weitere Problematik besteht durch die relativ geringe Umfeldbeleuchtung. Der Fahrzeugführer adaptiert auf ein niedriges Leuchtdichteniveau. Dadurch ist er besonders blendempfindlich.

Für die Landstraßenlichtverteilung gilt es, einen sinnvollen Kompromiss zwischen der Ausleuchtung des Verkehrsraumes und der Blendungsminimierung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer zu finden. DAMASKY [DAM95] gibt in seiner Dissertation Vorschläge für eine optimale Lichtverteilung basierend auf der Lage von verkehrsrelevanten Objekten im Straßenverkehr. Bild 32 zeigt die Bereiche, in denen sich verkehrsrelevante Objekte mit einer 90%igen Wahrscheinlichkeit befinden.

Für die dargestellten Bereiche ergeben sich verschiedene Anforderungen. Die Verkehrszeichen (Bereich 1) sollen mit einer Mindestlichtstärke beleuchtet werden, um die Erkennbarkeit zu gewährleisten. Die Fahrbahnmarkierung, sowie die Leitposten (Bereich 3 und 4) werden idealerweise gleichmäßig ausgeleuchtet. Für die Blendungsminimierung soll die Beleuchtungsstärke im Bereich 4 unter $E_{25} = 1 \text{ lx}$ liegen. Aus der Lage der Objekte ergibt sich die bereits etablierte Asymmetrie der Lichtverteilung, durch die die rechte Fahrbahnhälfte weiter ausgeleuchtet wird als die linke Fahrbahnhälfte. Für den unteren nicht gekennzeichneten Bereich schlägt DAMASKY Beleuchtungsstärken über $E_{25} = 25 \text{ lx}$ vor. Aus diesen Anforderungen resultiert die in Bild 33 dargestellte Lichtverteilung.

Die notwendige Schärfe der Hell-Dunkel-Grenze einer Lichtverteilung kann aus den auftretenden

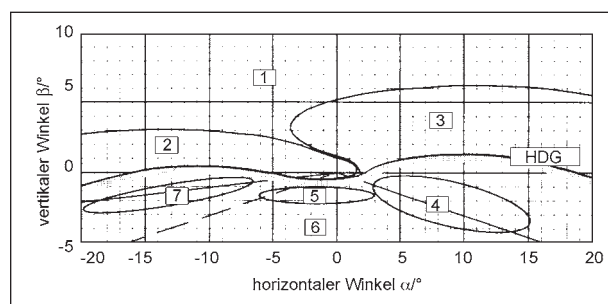


Bild 33: Beispiel für die Lichtverteilung eines Landstraßenlichtes; Quelle: [DAM95]

- 1: $E < 1,5 \text{ lx}$; 2: $0,5 \text{ lx} < E < 1,0 \text{ lx}$; 3: $E < 2,5 \text{ lx}$;
 4: $E > 1,5 \text{ lx}$; 5: $25 \text{ lx} < E < 50 \text{ lx}$; 6: $5 \text{ lx} < E < 15 \text{ lx}$;
 7: $E > 10 \text{ lx}$ (bezogen auf eine 25 m entfernte Prüf-
 wand)

Nickwinkeländerungen des Fahrzeuges beim Beschleunigen bzw. Bremsen abgeleitet werden. Während einer Landstraßenfahrt treten mittlere bis hohe Nickwinkel des Fahrzeuges auf. Infolgedessen ist es sinnvoll, die Hell-Dunkel-Grenze unscharf zu gestalten, um eine Blendung des Gegenverkehrs zu minimieren. Im Fall einer scharfen Hell-Dunkel-Grenze mit großer Reichweite ist die Verwendung einer dynamischen Leuchtweitenregelung zwingend notwendig.

Autobahn

Die Autobahnfahrt stellt gänzlich andere Anforderungen an die Lichtverteilung eines Scheinwerfers als die Fahrt auf einer Landstraße. Die gefahrenen Geschwindigkeiten sind vergleichsweise hoch. Folglich ist eine große Reichweite der Lichtverteilung nötig, um potenziell gefährliche Objekte rechtzeitig zu erkennen. Bei Einhaltung der Richtgeschwindigkeit von 130 km/h legt ein Fahrzeug pro Sekunde 36 m zurück, bei einer Geschwindigkeit von 180 km/h sogar 50 m. Die traditionelle Lichtverteilung besitzt lediglich eine Reichweite von ca. 65 m. Bei einer durchschnittlichen Reaktionszeit von 0,8 s [JEB06] beträgt die in dieser Zeit gefahrene Strecke bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h fast 29 m. Unter der Annahme, die Verzögerung eines Fahrzeuges mit hoher Bremsleistung beträgt bei einer Notbremsung 10 m/s^2 , ergibt sich ein gesamter Anhalteweg von etwa 94 m. Erkennt ein Fahrzeugführer ein Hindernis tatsächlich erst in der Reichweite des Abblendlichtes, kann er bereits bei diesen für Autobahnen relativ kleinen Geschwindigkeiten das Fahrzeug nicht mehr rechtzeitig zum Stillstand bringen.

Eine Erhöhung der Reichweite könnte beispielsweise über eine höhere Schärfe der Hell-Dunkel-Gren-

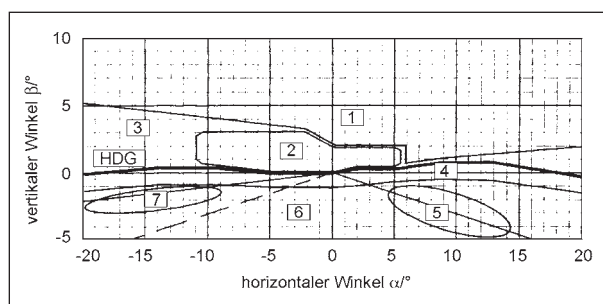


Bild 34: Beispiel für die Lichtverteilung eines Autobahnlichtes; Quelle: [DAM95]

- 1: $E < 2,0 \text{ lx}$; 2: $E < 1,0 \text{ lx}$; 3: $E < 1,5 \text{ lx}$;
 4: Fixationsbereich $25 \text{ lx} < E < 100 \text{ lx}$ zur HDG ansteigend; 5: $E > 15 \text{ lx}$; 6: $5 \text{ lx} < E < 25 \text{ lx}$; 7: $E > 15 \text{ lx}$ (bezogen auf eine 25 m entfernte Prüf-
 wand)

ze umgesetzt werden oder über einen flacheren Winkel der Ausleuchtung. Anders als beim Landstraßenlicht kommt es hier nicht zur Blendung des Gegenverkehrs, denn die Nickwinkeländerungen des Fahrzeuges sind aufgrund der kleineren Beschleunigungen relativ gering. Außerdem begünstigt die breite Fahrbahn sowie eine ausreichende bauliche Trennung der Autobahn die Blendungsminimierung der entgegenkommenden Fahrzeuge.

Vielmehr muss hier eine Rückspiegelblendung des überholten Fahrzeuges durch das überholende Fahrzeug vermieden werden. Die klassische Abblendlichtverteilung leuchtet aufgrund der asymmetrischen Hell-Dunkel-Grenze den rechten Teil der Fahrbahn weiter aus als den linken Teil (siehe Bild 25). Dadurch werden die rechten Fahrspuren der Autobahn sehr weit ausgeleuchtet. Besonders bei Fahrzeugen mit niedrig angebrachten Spiegeln wird das Licht des überholenden Fahrzeuges über den linken Rückspiegel gerichtet in das Auge des Fahrzeugführers des überholten Fahrzeuges reflektiert. Eine Analyse dieser Blendungssituation in Abhängigkeit von der Scheinwerferanbauhöhe wurde von KOSMATKA durchgeführt. Die SAE-Studie resultiert hierbei in einer Limitierung der Scheinwerferanbauhöhe. Eine auf diese Situation angepasste Lichtverteilung erscheint jedoch nicht sinnvoll, da die Alternative eines blendfreien Rückspiegels einfacher und kostengünstiger zu realisieren ist. Ferner kann die Anzahl der verwendeten Lichtverteilungen zugunsten der einfacheren technischen Umsetzung reduziert werden.

Die von DAMASKY [DAM95] vorgeschlagene Lichtverteilung für die Autobahnfahrt ist in Bild 34 dargestellt. Bereich 1 stellt den Überkopfbereich dar, in dem sich die Beschilderung befindet. Hier sollte die Lichtverteilung homogen eine niedrige Beleuch-

tungsstärke von weniger als $E_{25} = 2 \text{ lx}$ aufweisen. Bereich 2 kennzeichnet den Blendbereich, in dem die Beleuchtungsstärke unter $E_{25} = 1 \text{ lx}$ liegen sollte. Neben der Überkopfbeschilderung befinden sich weitere Verkehrszeichen im Bereich 3. In dieser Zone sollte die Beleuchtungsstärke $E_{25} = 1,5 \text{ lx}$ nicht überschreiten. Die Seitenbereiche (Bereiche 5 und 7) werden mit wenigstens $E_{25} = 15 \text{ lx}$ ausgeleuchtet, das Vorfeld mit mindestens $E_{25} = 25 \text{ lx}$.

Stadtfahrt

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Stadtlichtverteilung erörtert. Die gefahrenen Geschwindigkeiten sind während einer Stadtfahrt sehr gering. Im Gegensatz dazu kommt es zu hohen Beschleunigungswerten. Diese hohen Beschleunigungen im Zusammenhang mit häufig auftretenden Unebenheiten auf innerstädtischen Straßen verursachen große Nickwinkel des Fahrzeugs. Dadurch entsteht eine erhöhte Blendung des Gegenverkehrs. Bei Nichtvorhandensein einer dynamischen Leuchtweiteregelung stellt sich die Notwendigkeit einer Hell-Dunkel-Grenze mit geringer Schärfe, um diese Blendung zu minimieren.

Nachteil einer unscharfen Hell-Dunkel-Grenze ist die geringe Reichweite des Abblendlichtes. Bei den geringen Geschwindigkeiten und der durch die stationäre Beleuchtung erhöhten Umfeldleuchtdichte ist eine rechtzeitige Erkennung von Gefahrenquellen trotz dessen gewährleistet.

Während einer Stadtfahrt ist mit häufigem Abbiegen zu rechnen. Dies bringt weitere Anforderungen an die Stadtlichtverteilung mit sich. Die asymmetrische Form der Hell-Dunkel-Grenze kann beim Rechtsabbiegen zu einer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen. Eine symmetrische Geometrie würde diese Blendung vermeiden. Ergänzend dazu empfiehlt sich eine höhere Beleuchtungsstärke im Vorfeld- und Seitenbereich, um hier die Erkennbarkeit des Fußgängerbereiches zu erhöhen.

Nach DAMASKY [DAM95] setzt sich die Stadtlichtverteilung wie folgt zusammen. Der Bereich 1 wird mit einer Beleuchtungsstärke von höchstens $E_{25} = 2 \text{ lx}$, der Bereich 2 mit einer maximalen Beleuchtungsstärke von $E_{25} = 1 \text{ lx}$ beleuchtet. Die Seitenausleuchtung sollte eine Beleuchtungsstärke von mindestens $E_{25} = 15 \text{ lx}$ aufweisen. Der Bereich 6 sollte zwischen $E_{25} = 5 \text{ lx}$ und $E_{25} = 25 \text{ lx}$ liegen (Bild 35).

Der Abbiegevorgang kann neben der Modulation der Lichtverteilung im Hauptscheinwerfer zudem

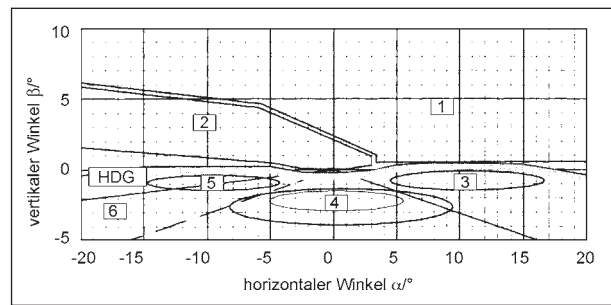


Bild 35: Beispiel für die Lichtverteilung eines Stadtlichtes; Quelle: [DAM95]

1: $E < 2,0 \text{ lx}$; 2: $E < 1,0 \text{ lx}$; 3: $E > 25 \text{ lx}$; 4: $E < 15 \text{ lx}$; 5: $E > 25 \text{ lx}$; 6: $5 \text{ lx} < E < 25 \text{ lx}$ (bezogen auf eine 25 m entfernte Prüfwand)

durch den Einsatz von Abbiegeleuchten erleichtert werden.

Die hohe Umfeldleuchtdichte durch die ortsfeste Verkehrsbeleuchtung in der Stadt begünstigt im Weiteren die Blendungsminimierung, da der Fahrzeugführer auf ein höheres Leuchtdichteniveau adaptiert.

4.4.2 Streckengeometrie

Üblicherweise werden in heutigen Automobilen statische Scheinwerfersysteme eingesetzt, die das Licht unabhängig von der Streckenführung stets in die gleiche Richtung lenken. Die Konstrukteure gehen hier von einer idealen geraden und waagerechten Straßenlinie aus, für die ein Scheinwerfer optimiert wird.

Da der reale Straßenverlauf jedoch stets Kurven, Kuppen und Senken aufweist, ist ein statischer Scheinwerfer außerhalb der geraden Streckenführung nicht ideal. Besonders in Linkskurven wird die Erkennbarkeitsentfernung aufgrund der asymmetrischen Lichtverteilung deutlich reduziert, während in Rechtskurven eine Blendung des Gegenverkehrs auftritt (Bild 36). Ferner besteht eine Abhängigkeit der Scheinwerferreichweite vom vertikalen Krümmungsradius der Straße auf Kuppen sowie in Senken.

Hier stellt sich die Forderung nach einem adaptiven System, welches sich der Straßengeometrie anpasst und somit auch in Kurven, Kuppen und Senken eine gute Ausleuchtung der Straße bei gleichzeitiger Blendungsminimierung gewährleistet. Ein horizontal und vertikal schwenkbarer Lichtkegel erfüllt diese Anforderung (Bild 37). Zur Festlegung der aus der Streckengeometrie und Straßenführung resultierenden optimalen Parameter eines solchen

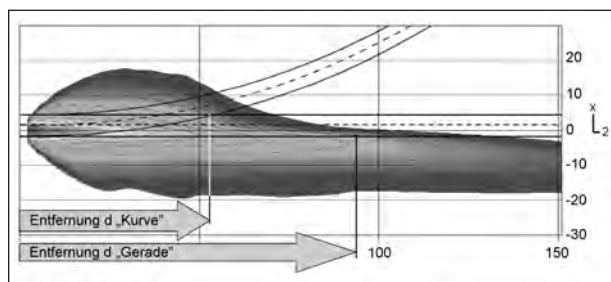


Bild 36: Abblendlichtverteilung eines traditionellen Scheinwerfers. In Linkskurven kommt es bedingt durch die Asymmetrie der Verteilung zu einer Reduktion der Erkennbarkeitsentfernung; Quelle: [JEB06]

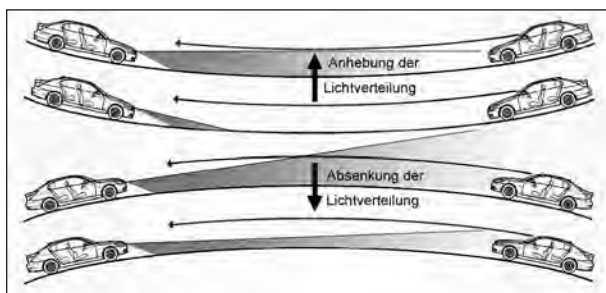


Bild 37: Prinzipdarstellungen eines sich der Straßengeometrie anpassenden Scheinwerfersystems am Beispiel einer Kuppe bzw. Senke; Quelle: [KUH05]

adaptiven Systems ist es zunächst wichtig, die genauen Straßeneigenschaften zu analysieren.

Die Streckengeometrie wird in Deutschland durch die „Richtlinie für die Anlage von Straßen“ (RAS) [FUE05] festgelegt. Diese legt je nach Entwurfsgeschwindigkeit der Straße unter anderem minimale Kurvenradien und Kurvenlängen, maximale Steigungen und Gefälle der Straße, sowie Formen der Kurven- und Neigungswechsel fest.

ROOS führt in seinem Skript [ISE06] aus, dass der unbewusst erlebte Eindruck einer Straße, die so genannte Streckencharakteristik, das Geschwindigkeitsverhalten des Kraftfahrers deutlich beeinflusst. Daraus leitet sich die Forderung nach Stetigkeit der Trassierungslinie ab.

Die Entwurfsgeschwindigkeit einer Straße richtet sich nach ihrer Funktion. Aus der Entwurfsgeschwindigkeit einer Straße, die von den Planern über längere Strecken konstant gehalten wird, ergeben sich für eine stetige Trassierung Mindestradien in horizontaler Richtung (Bild 38) und vertikaler Richtung (Bild 39, Bild 40) sowie Mindestlängen der Kreisbögen.

V_e [km/h]	min R [m]	min L [m]
50	80	30
60	120	35
70	180	40
80	250	45
90	340	50
100	450	55
120	720	65

Bild 38: Kurvenmindestradien (min R) und Mindestlänge (min L) der Kreisbögen (RAS-L 1995) in Abhängigkeit der Entwurfsgeschwindigkeit (V_e); Quelle: [ISE06]

V_e [km/h]	min H_K [m] (bei S_n)	H_K [m] (bei $0.5 S_{\bar{U}}$ /bei $S_{\bar{U}}$)
50	1.400	7.000/28.200
60	2.400	7.800/30.000
70	3.150	8.600/35.000
80	4.400	10.300/40.000
90	5.700	12.200/48.000
100	8.300	13.000/52.000
120	16.000	-

Bild 39: Kuppenmindestradien (min H_K) und Kuppenradien (H_K) mit halber und voller Überholsichtweite ($S_{\bar{U}}$) (RAS-L 1995); Quelle: [ISE06]

V_e [km/h]	H_w [m]
50	500
60	750
70	1.000
80	1.300
90	2.400
100	3.800
120	8.800

Bild 40: Empfohlene Wannenmindestradien (min H_w) (RAS-L 1995); Quelle: [ISE06]

Die Kuppenmindestradien erschließen sich aus der Forderung, dass der Fahrer grundsätzlich vor einem plötzlich auftauchenden Hindernis rechtzeitig anhalten können sollte. Kuppenradien, die zwischen der halben und der vollen Überholsichtweite²¹ liegen, fördern kritische Überholvorgänge und sollten daher bei der Trassierung vermieden werden.

Für die Mindestradien von Senken (Wannen) werden Empfehlungen gegeben, um die Zentrifugalbeschleunigung unter $0,5 \text{ m/s}^2$ zu halten. Dieser Wert gilt als noch komfortabel für den Fahrzeugführer.

²¹ Überholsichtweite: Sichtweite, die ein Fahrer benötigt, um einen Überholvorgang sicher durchzuführen

Diese gesetzlichen Vorgaben bzw. Empfehlungen zeigen, dass sich der Straßenbau weitestgehend an die von der Natur vorgegebenen Höhen- und Verlaufslinien halten kann.

Um dem Fahrzeugführer in jeder Situation eine hohe Erkennbarkeitsentfernung zu ermöglichen sowie die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden, ist ein Schwenken der Lichtverteilung notwendig.

Besonders das Sicherheitspotenzial des Kurvenlichtes wird als hoch eingestuft. Von HOFFMANN [HOF03] beschäftigte sich in seiner Dissertation unter anderem mit dieser Thematik. Demzufolge steigt besonders in Kurven mit kleinen Radien die Unfallwahrscheinlichkeit bei Nacht signifikant an. Nach GOTOTH [GOT04] geschehen die tödlich verlaufenden Unfälle meist in Kurven. Eine Integration eines dynamischen Kurvenlichtes in jedes Kraftfahrzeug könnte somit mit hoher Wahrscheinlichkeit die Unfallzahlen bei Nacht erheblich senken.

Die Möglichkeiten zur Realisierung eines Systems mit schwenkbarem Lichtkegel werden in Kapitel 5.2 dargestellt

4.5 Fahrdynamik und Beladung

Während der Fahrt unterliegen Fahrzeuge aufgrund der Fahrdynamik ständigen Schwankungen des Aufbaus bezogen zu den Fahrbahnachsen (Bild 41). Diese Schwankungen verursachen eine ständige Lageänderung der Lichtverteilung auf der Fahrbohnoberfläche. Bisher gleichen Serienscheinwerfer diese Schwankungen nur bedingt mit Hilfe der statischen Leuchtweitenregelung aus. Um in jeder Situation eine optimale Sicht des Fahrzeugführers zu gewährleisten und die Blendung des Gegenverkehrs zu minimieren, ist eine vollständige Anpassung der Lichtverteilung an die Fahrzeugbewegungen erforderlich.

Die Neigung des Fahrzeugaufbaus hat zwei verschiedene Ursachen. Zum einen kommt es zu Verschiebungen des Fahrzeuges aufgrund der Zuladung, beispielsweise durch die Betankungsmenge oder die Anzahl der Insassen. Diese Faktoren werden als quasi-statisch bezeichnet. Zum anderen kommt es während der Fahrt zu Fahrzeugneigungen bezogen zur Längsachse der Fahrbohn, die durch den Lastwechsel beim Beschleunigen oder Bremsen erzeugt werden, sowie zu Fahrzeugnei-

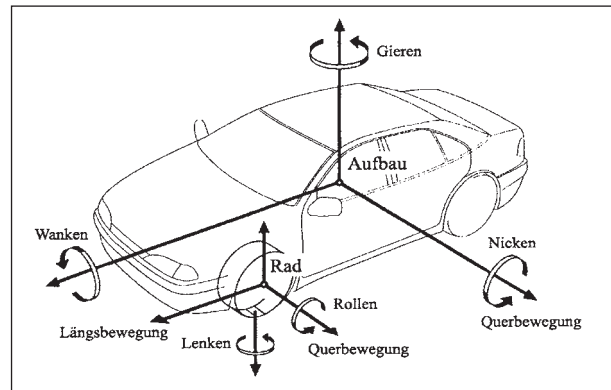


Bild 41: Bewegungsgrößen des Fahrzeuges; Quelle: [SCHW03]

gungen bezogen zur Querachse der Fahrbohn, welche in Kurven verursacht werden. Diese Faktoren werden als dynamische Verschiebung bezeichnet.

Um Neigungswinkel auszugleichen, die durch eine Beladung des Fahrzeuges verursacht werden, schreibt die ECE bereits seit 1998 eine Leuchtweitenregelung im Fahrzeug vor (ECE-Regelung 48). Man unterscheidet zwei Systeme, die manuelle und die automatische Leuchtweitenregelung. Bei der manuellen Regulierung erfolgt die Einstellung der Leuchtweite durch den Fahrzeugführer und setzt somit ein gewisses Pflichtbewusstsein des Fahrzeugführers voraus. Die in Kapitel 3 dargestellten Ergebnisse der vom LTI Karlsruhe durchgeführten Umfrage zeigen allerdings, dass ein großer Anteil der Fahrzeugführer keine Anpassung der Leuchtweite an den Beladungszustand vornimmt. Die automatische Regulierung ermittelt über Achssensoren die Neigung des Fahrzeuges und reguliert die Leuchtweite autark. Dieses System wird von der ECE in Scheinwerfern mit Gasentladungslampen vorgeschrieben. Diese Systeme gleichen allerdings lediglich die statischen Faktoren aus, nicht aber die durch die Fahrdynamik verursachten Nickbewegungen des Fahrzeuges. Für eine blendfreie optimale Ausleuchtung wird ein adaptives dynamisches System benötigt.

Die größten Nickbewegungen werden im Fall einer Notbremsung erreicht, bei der die Verzögerung bis zu -10 m/s^2 beträgt. Während der Normalfahrt sind die Werte für Beschleunigung und Verzögerung jedoch wesentlich geringer. Insbesondere hängen diese Werte vom jeweiligen Straßentyp ab. Im Folgenden werden die Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte für die Stadtfahrt, die Landstraßenfahrt und die Autobahnfahrt genannt.

Fahrzeugtyp	Nickwinkeländerung bei Bremsung mit 3 m s^{-2}	Nickwinkeländerung bei Beschleunigung mit 3 m s^{-2}
Mercedes E-Klasse	-0.9°	1.1°
Mercedes E-Klasse	-1°	0.6°
Audi 80	-0.6°	1°
VW Passat 2.0	-0.6°	-0.55°
VW Golf GL	-0.6°	-0.8°
Opel Omega Lim.	-0.45°	1.1°
Opel Vectra GLS	-0.55°	0.9°
Ford	-0.55°	k. A.

Bild 42: Nickwinkel verschiedener Fahrzeugtypen bei einer Beschleunigung und Verzögerung von jeweils $a = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ und mit einer Besetzung von 2 Personen; Quelle: [DAM95]

Die größten Beschleunigungs- und Verzögerungswerte werden während einer Stadtfahrt erreicht. Die geringen Geschwindigkeiten ermöglichen relativ hohe Längsbeschleunigungswerte. Ein Mittelklassefahrzeug beschleunigt aus dem Stand auf eine Geschwindigkeit von 50 km/h mit durchschnittlich 3 m/s^2 [DAM95]. Der daraus entstehende Nickwinkel des Fahrzeuges hängt vom Fahrzeugtyp und von der Beladung ab (Bild 42) und kann Werte zwischen $-0,45^\circ$ bis $-1,0^\circ$ beim Bremsen und $0,6^\circ$ bis $1,1^\circ$ beim Beschleunigen annehmen. Der Neigungswinkel des Abblendlichtes beträgt bezogen zur Fahrzeugachse lediglich $0,57^\circ$. Demzufolge kommt es selbst bei Fahrzeugen mit geringen Nickwinkeländerungen zu einer Verdoppelung bzw. Halbierung der Reichweite des Abblendlichtes bei den genannten Beschleunigungen. Beim Bremsen resultiert daraus eine Verringerung der Erkennbarkeitsentfernung, beim Beschleunigen eine Blendung des Gegenverkehrs, besonders bei Scheinwerfern mit einer besonders scharfen Hell-Dunkel-Grenze.

Auf der Landsstraße bzw. der Autobahn treten bedingt durch die höheren Geschwindigkeiten kleinere Beschleunigungswerte und somit kleinere Fahrzeuglängsbewegungen auf. Für die Landstraße betragen die Nickwinkel beim Bremsen $-0,35^\circ$ bis $-0,8^\circ$ und beim Beschleunigen $0,5$ bis $0,8^\circ$. Im Fall der Autobahnfahrt liegen die Nickwinkel beim Bremsen zwischen $-0,1^\circ$ und $-0,25^\circ$ sowie beim Beschleunigen zwischen $0,17^\circ$ und $0,3^\circ$. Diese verhältnismäßig kleinen Fahrzeugbewegungen sind jedoch auf keinen Fall zu vernachlässigen und soll-

ten in zukünftigen adaptiven Scheinwerfermodellen in das Konzept eingehen. Bisher sind dynamische Leuchtweitenregelungen nur in wenigen Automobilen integriert. Eine Vorschrift hierzu gibt es derzeit in den Regelwerken der ECE nicht.

Neben den Längsbeschleunigungskräften entstehen Querschleunigungskräfte, die eine Seitenneigung des Fahrzeuges und dadurch eine Verkipfung der Hell-Dunkel-Grenze verursachen. Diese Verkipfung bewirkt eine Änderung der Reichweite der Lichtverteilung und darüber hinaus eine ungleichmäßige Ausleuchtung der Fahrbahn. Wie auch bei der Längsneigung des Fahrzeuges hängt die Seitenneigung vom Gewicht und vom Fahrwerk des Fahrzeuges sowie von der gefahrenen Geschwindigkeit und vom Kurvenradius ab. Die größten Querschleunigungskräfte werden in der Stadt und auf kurvigen Landstraßen erreicht. Aus der Seitenneigung in Kurven leitet sich die Notwendigkeit einer Schräglagenkompensation ab, welche eine Winkelkorrektur der Hell-Dunkel-Grenze in Kurven vornimmt. Ein solches System wird bereits diskutiert, ist jedoch bislang in keinem Serienscheinwerfer eingebaut. Eine Schräglagenkompensation bringt besonders bei Motorrädern entscheidende Vorteile mit sich, da Motorräder konzeptbedingt sehr große Schräglagen einnehmen können. Dabei wird die Hell-Dunkel-Grenze sehr stark verkippt.

Aus der Neigung des Fahrzeuges bezogen zur Längs- sowie Querachse der Fahrbahn resultieren weitere notwendige Parameter für ein optimales Scheinwerfersystem. Die automatische dynamische Leuchtweitenregelung und die Schräglagenkompensation stellen diese Parameter dar. Die Regulierung sollte sehr schnell erfolgen.

4.6 Fahrzeugtyp

Die im modernen Straßenverkehr verwendeten Fahrzeuge differieren deutlich voneinander. Je nach Verwendungszweck ergeben sich spezielle Anforderungen und damit auch individuelle Eigenschaften. Als Beispiel kann der Vergleich eines Sportwagens mit einem Kleintransporter genannt werden. Diese Fahrzeugtypen unterscheiden sich wesentlich in Hinsicht auf Höchstgeschwindigkeiten und Fahrdynamik.

Entsprechend diesen differenzierten Eigenschaften sollte der Scheinwerfer ebenso wie viele andere Fahrzeugbauteile spezifisch entwickelt werden. So sind Fahrdynamik, Höchstgeschwindigkeit und

Fahrzeuggeometrie wesentliche Kriterien für ein Scheinwerferkonzept. Aus der Fahrdynamik können die maximal benötigten vertikalen Schwenkwinkel einer dynamischen Leuchtweitenregelung abgeleitet werden. Gehen motorisierte Zweiräder in die Betrachtung mit ein, bildet die Fahrdynamik auch die Berechnungsgrundlage für eine Schräglagenkompensation.

Ferner können aus den fahrzeugspezifischen Eigenschaften Parameter für das Konzept der verwendeten Lichtverteilung abgeleitet werden. So ergeben sich aus der Höchstgeschwindigkeit und der Beladungsmenge der Bremsweg und somit die Minimalreichweite eines potenziellen Autobahnlichtes.

Bezogen auf die Lichtverteilung sind nicht nur die fahrtechnischen Aspekte relevant, sondern auch die Fahrzeuggeometrie selbst. So gibt sie Aufschluss über die Größe des Bereiches direkt vor dem Fahrzeug, welcher nicht vom Fahrzeugführer eingesehen werden kann. Da dieser Bereich durch die direkte Reflexion des vom Scheinwerfer ausgestrahlten Lichtes lediglich zur Blendung anderer Verkehrsteilnehmer beiträgt, sollte eine Ausleuchtung vermieden werden. So kann vor allem bei Regen die Blendung des Gegenverkehrs verringert werden. Daher ist es zweckmäßig, die Ausleuchtung des direkten Vorfeldes entsprechend dem Fahrzeugtyp anzupassen. In einer in Planung befindlichen Untersuchung des Lichttechnischen Institutes in Karlsruhe sollen diesbezüglich Empfehlungen für Scheinwerferlichtverteilungen abgeleitet werden.

Die Fahrzeuggeometrie stellt zudem eine Berechnungsgrundlage für Schlechtwetterlichtverteilungen dar. Nach ROSENHAHN [ROS99] hängt die Streuleuchtdichte im Nebel von der relativen Position der Scheinwerfer zur Augenposition des Fahrzeugführers ab. Da sich aus der unterschiedlichen Fahrzeuggeometrie auch verschiedene Relativpositionen ergeben, ist eine Anpassung einer potenziellen Nebellichtverteilung an den Fahrzeugtyp denkbar. In eigenen Recherchen wurde die Relativposition des rechten Scheinwerfers zur Augenposition des Fahrzeugführers in Abhängigkeit von verschiedenen Fahrzeugtypen eruiert. Als Grundlage dienten hier die Fahrzeugabmessungen, welche den technischen Datenblättern von insgesamt 40 Fahrzeugen verschiedener Typklassen entnommen wurden. Errechnet wurde der horizontale und vertikale Winkel der Verbindungsachse zwischen Augenposition und rechtem Scheinwerfer bezogen zur Blickrichtung Geradeaus (Bild 43).

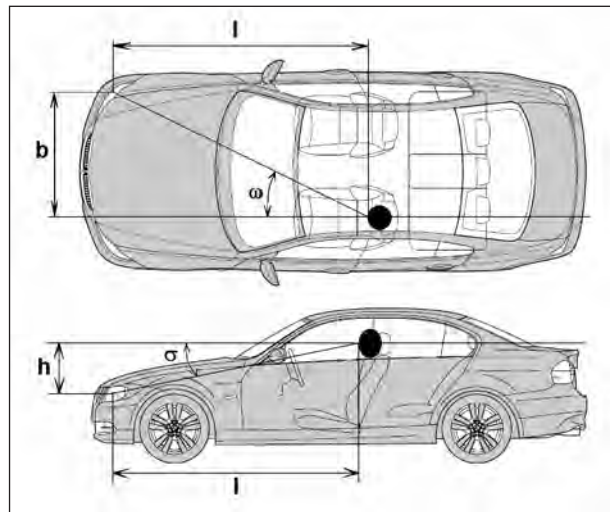


Bild 43: Winkel der Achse zwischen der Augenposition des Fahrers und rechtem Scheinwerfer bezogen zur Blickrichtung Geradeaus
 l: Längsabstand Augenposition – Scheinwerfer, b: Querabstand Augenposition – Scheinwerfer, h: vertikaler Abstand Augenposition – Scheinwerfer, ω : horizontaler Winkel, σ : vertikaler Winkel

Diese Recherche stellt bislang lediglich eine Voruntersuchung dar. Sitzeinstellung, Fahrergröße wie auch die seitliche Sitzposition des Fahrers waren stets konstant. Die in der Recherche errechneten Scheinwerferpositionen bilden zunächst die Entscheidungsgrundlage für eine ausführliche Studie. Aufbauend auf den Ergebnissen von ROSENHAHN [ROS99] könnten weitere Untersuchungen für eine Nebellichtverteilung durchgeführt werden. Insbesondere könnte die Abhängigkeit der Lichtstärke beider Scheinwerfer vom Fahrzeugtyp ermittelt werden.

Im Folgenden werden die bisher gewonnenen Daten dargestellt.

4.6.1 Personenkraftwagen (Pkw)

Als Personenkraftwagen (Pkw) bezeichnet man zur Personenbeförderung ausgelegte und gebaute Fahrzeuge mit höchstens acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz (Klasse M_1 nach den Richtlinien der Europäischen Gemeinschaft für Straßenfahrzeuge) [FEE04]. Man unterscheidet zwischen einer Vielzahl von Pkw-Typen mit jeweils sehr individuellen Eigenschaften.

Die am häufigsten verwendete Bauart ist die Limousine. Analysiert wurden die Fahrzeugdaten von vier Limousinen der Mittelklasse und sechs Limousinen der Oberklasse. Sowohl die horizontalen als auch die vertikalen Winkel unterscheiden sich bei

allen Fahrzeugen nur geringfügig voneinander. Die gemittelten Winkel der untersuchten Fahrzeuge der Mittelklasse betragen horizontal $\omega = 26,5^\circ$ und vertikal $\sigma = 12,5^\circ$. Die bei den Oberklasselimousinen berechneten Winkel betragen $\omega = 25^\circ$ und $\sigma = 11,5^\circ$ und sind damit geringfügig kleiner.

Aufgrund der langen Motorhaube und der tiefen Sitzposition des Fahrzeugführers scheint eine getrennte Betrachtung von Sportwagen angebracht. Eruiert wurden die Winkel ω und σ von vier verschiedenen Fahrzeugen. Die Analyse zeigt jedoch, dass sich die relative Lage des rechten Scheinwerfers mit mittleren horizontalen Winkel von $\omega = 24^\circ$ und mittleren vertikalen Winkel mit $\sigma = 9,5^\circ$ nur geringfügig von den Werten der Limousinen unterscheidet.

In den letzten Jahren erfreuen sich SUVs²² wachsender Beliebtheit. Fünf Fahrzeuge dieses Typs wurden betrachtet. Mit mittleren Winkeln von $\omega = 25^\circ$ und $\sigma = 13^\circ$ unterscheiden sie sich in dieser Hinsicht nur unwesentlich von den Limousinen.

Im Übrigen wurden drei Vans in die Analyse mit einbezogen. Aufgrund der kurzen Motorhaube und der erhöhten Sitzposition nehmen die Winkel bei diesem Fahrzeugtyp wesentlich größere Werte an. Der mittlere horizontale Winkel beträgt $\omega = 32^\circ$, der mittlere vertikale Winkel $\sigma = 20,5^\circ$.

Der Kleintransporter besitzt eine mit dem Van vergleichbare Geometrie. Hier sitzt der Fahrzeugführer ebenfalls sehr hoch. Der horizontale Winkel wurde hier im Mittel mit $\omega = 38^\circ$ bestimmt, der vertikale Winkel mit $\sigma = 23,5^\circ$.

Aus den errechneten Winkeln wird ersichtlich, dass sich die relativen rechten Scheinwerferpositionen bezogen zur Augenposition des Fahrers bei den untersuchten Typklassen lediglich geringfügig unterscheiden. Lediglich Vans und Kleintransporter differieren maßgeblich von den anderen Fahrzeugtypen. Daher wäre bei den Personenkraftwagen eine Zweiklasseneinteilung denkbar. Ob ein fahrzeugabhängiges Dimmen für eine Nebellichtverteilung von Vorteil ist, werden zukünftige Untersuchungen ergeben.

4.6.2 Lastkraftwagen (Lkw)

Lastkraftwagen sind Fahrzeuge, die zum Transport von Gütern vorgesehen sind. In diesem Kapitel werden Lastkraftwagen mit einer zulässigen Ge-

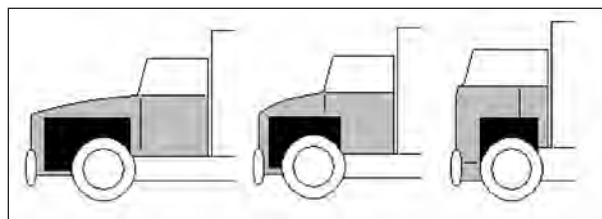


Bild 44: Unterschiedliche Lkw-Bauformen, von links nach rechts: Langhauber, Kurzhauber, Frontlenker

samtmasse von mehr als 3,5 t betrachtet (Klasse N_1 , N_2 und N_3 nach den Richtlinien der Europäischen Gemeinschaft für Straßenfahrzeuge) [FEE04]. Wie auch beim Pkw wird eine Vielzahl verschiedener Lkw-Typen mit individuellen Eigenschaften unterschieden. Besonders große Unterschiede in Hinsicht auf die relative Scheinwerferlage zur Fahrerposition bestehen zwischen Langhaubern, Kurzhaubern und Frontlenkern (Bild 44). Beim Langhauber befindet sich der Motor des Fahrzeuges vor dem Fahrerhaus, wodurch der vertikale Winkel der Verbindungsachse zwischen Augenposition und rechtem Scheinwerfer bezogen zur Blickrichtung Geradeaus vergleichsweise flach ist. Kurzhauber und Frontlenker verfügen über einen je nach Typ teilweise oder ganz im Fahrerhaus integrierten Motor, woraus ein entsprechend größerer Winkel resultiert.

Entgegen den USA bezieht sich die Längenbegrenzung für Lkw in der europäischen Union nicht nur auf die Ladelänge, sondern auf das gesamte Fahrzeug. Daher werden in der EU fast ausschließlich Frontlenker eingesetzt. Die ermittelten relativen Scheinwerferpositionen beziehen sich demnach nur auf diesen Lkw-Typ.

Zur Ermittlung der relativen Lage des rechten Scheinwerfers wurden die Fahrzeugdaten von insgesamt 14 Lkw aufgenommen. Die Position des Scheinwerfers wird maßgeblich durch die Größe des Fahrerhauses bestimmt. In diesem Zusammenhang scheint eine getrennte Betrachtung der Lkw mit einem Gesamtgewicht bis 7,5 t und Lkw mit einem Gesamtgewicht über 7,5 t sinnvoll.

Im Fall der untersuchten Lkw unter 7,5 t wurden ein mittlerer horizontaler Winkel von $\omega = 57^\circ$ sowie ein mittlerer vertikaler Winkel von $\sigma = 54,5^\circ$ eruiert. Bei Lkw mit einem Gesamtgewicht über 7,5 t differieren aufgrund der unterschiedlichen Sitzhöhe lediglich die vertikalen Winkel. Dieser beträgt im Mittel $\sigma = 60,5^\circ$. Ob eine potenzielle Klasseneinteilung für das Konzept einer Nebellichtverteilung für verschiedene Lkw-Größen lediglich aufgrund der unterschied-

²² SUV: Sports Utility Vehicle

lichen Sitzhöhe erforderlich ist, muss in weiteren Untersuchungen überprüft werden.

4.7 Fahrzeugverschmutzung

Die Front und damit die Scheinwerfer eines Fahrzeuges verschmutzen durch den täglichen Gebrauch besonders schnell. Neben der Reduktion des emittierten Lichtstroms wird durch die Schmutzschicht Streulicht erzeugt, welches zur Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen kann. Untersuchungen [SCHM78] haben ergeben, dass die Reduktion der Sehweite durch die Verschmutzung von Scheinwerfern je nach Straßenzustand so erheblich sein kann, dass ein sicheres Führen des Fahrzeuges bei Nacht nicht mehr gewährleistet ist.

Mit diesem Hintergrund könnte eine Erhöhung der Lichtstärken bei einer Verschmutzung der Scheinwerfer erfolgen und so die Beleuchtungsstärken auf der Fahrbahn unabhängig von Verschmutzungsgrad konstant gehalten werden. Weiterhin würde das Signalbild des Fahrzeuges stets gleich von anderen Verkehrsteilnehmern wahrgenommen werden.

Allerdings lässt sich die Reduzierung der Lichtstärke durch Verschmutzung nicht einfach über die Erhöhung des Lampenlichtstroms ausgleichen, da die Schmutzschicht in den seltensten Fällen so gleichmäßig ist, dass der gesetzlich vorgeschriebene Lichtkegel mit seiner Hell-Dunkel-Grenze erhalten bleibt. Hier kann die wesentlich einfachere Variante einer Scheinwerferreinigungsanlage empfohlen werden (Bild 45). Diese Variante hat sich bereits etabliert und ist bei Fahrzeugen mit Gasentladungsscheinwerfern nach ECE-Regelung 98 sogar vorgeschrieben.



Bild 45: Scheinwerferreinigungsanlage für Gasentladungsscheinwerfer; Quelle: [IQ2]

ungsscheinwerfern nach ECE-Regelung 98 sogar vorgeschrieben.

Für Fahrzeuge mit Glühlampenscheinwerfer gibt es zurzeit keinen obligatorischen Anbau für eine Scheinwerferreinigungsanlage seitens der ECE. Zukünftige Fahrzeuge sollten allerdings unabhängig vom Scheinwerfertyp ein solches System besitzen, da die Lichtstärke bei Verschmutzung unabhängig vom Typ der Lichtquelle sinkt.

Eine Reduzierung des Lichtstroms der Scheinwerfer wird in der Regel erst ab etwa 50 % vom Fahrzeugführer bemerkt [SCHM78]. Um bereits ab einem geringeren Verschmutzungsgrad eine Reinigung sicherzustellen und zur Entlastung des Fahrzeugführers, könnte eine Scheinwerferreinigungsanlage auch völlig autonom arbeiten. Ein Sensor würde in diesem Fall die Verschmutzung detektieren und entscheiden, wann gereinigt wird.

4.8 Physiologische und technische Parameter

In den vorherigen Kapiteln wurden Parameter diskutiert, welche aus dem Umfeld oder dem Fahrzeug resultieren. Weitere zu berücksichtigende Faktoren ergeben sich aus der Art des Empfängers der emittierten Strahlung des Scheinwerfers.

Bisher hat der Mensch selbst die Informationen über den Verkehrsraum aufgenommen und verarbeitet. Moderne Technologien ermöglichen es heutzutage theoretisch, den Menschen als Empfänger durch technische Sensoren abzulösen.

Technische Empfänger zeichnen sich durch sehr geringe Streubreiten aus. Sie sind in der Lage, Informationen sehr schnell aufzunehmen, und unterliegen keinen Leistungsschwankungen. Des Weiteren treten keine Halluzinationen auf, während der Mensch Objekte konstruieren kann, die nicht vorhanden sind. Jedoch kann es zu softwarebedingten Fehlinterpretationen von Objekten kommen.

Sensoren haben allerdings auch wesentliche Nachteile gegenüber dem Auge. Handelt es sich um komplexe Strukturen, kann der Mensch diese viel schneller erfassen als technische Systeme. Durch das stereoskopische Sehen kann der Mensch außerdem Entfernungen besser einschätzen als beispielsweise eine Kamera. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Dynamik des Auges. Die Einstellung der Helligkeitsempfindlichkeit, der Schärfe und die Ausrichtung des Auges erfolgen sehr schnell. Diese Ei-

igenschaften lassen sich zwar auch mit technischen Empfängern realisieren, allerdings sind der Aufwand und die damit verbundenen Kosten sehr hoch.

Aus den genannten Eigenschaften wird schnell deutlich, dass Sensorsysteme zurzeit lediglich unterstützend integriert werden können. Auch bei zukünftigen Scheinwerfern gilt es, die Eigenschaften der Scheinwerfer primär für das menschliche Auge zu optimieren.

4.8.1 Das visuelle System des Menschen

Spektrale Hellempfindlichkeitskurve

Wichtige Aspekte für die Konzeption eines für den Menschen optimierten Scheinwerfers leiten sich aus der Physiologie des Auges ab. Die spektrale Hellempfindlichkeit des Auges stellt hier einen wichtigen Aspekt dar. Sie gibt Aufschluss über das Spektrum, welches vom Scheinwerfer emittiert werden sollte. Die spektrale Hellempfindlichkeit des Auges wird im photopischen²³ Bereich durch die $V(\lambda)$ -Kurve beschrieben (Bild 46). Das Auge detektiert Strahlung im Wellenlängenbereich von ca. 380 nm bis 780 nm. Das Maximum der Empfindlichkeit liegt am Tag bei 555 nm. Bei geringem Beleuchtungsniveau verschiebt sich das Maximum der Kurve in den kurzwelligeren Bereich. Im nächtlichen Straßenverkehr, man spricht auch vom mesopischen²⁴ Bereich, liegt das Maximum der Kurve zwischen 505 nm und 555. Folglich ergibt sich ein bestmöglicher visueller Nutzeffekt für das Auge, wenn der größte Teil des emittierten Spektrums im grünen Wellenlängenbereich liegt.

Die am meisten verwendete Lichtquelle in der automobilen Scheinwerfertechnik ist immer noch die Halogenglühlampe. Als Temperaturstrahler emittiert sie den größten Teil ihrer Energie im Infrarotbereich und nur einen geringen Teil der Strahlung im sichtbaren Bereich (Bild 47). Die Farbtemperatur beträgt in etwa 3.000 K. Die Farbe des ausgestrahlten Lichtes ist leicht gelblich. Bei mesopischer Bewertung der spektralen Verteilungskurve der Halogenglühlampe wird deutlich, dass der visuelle Nutzeffekt relativ gering ist.

²³ Photopisch: Als photopisches Sehen bezeichnet man das Sehen bei Umfeldleuchtdichten von mehr als $L = 10 \text{ cd/m}^2$.

²⁴ Mesopisch: Als mesopisches Sehen bezeichnet man das Sehen bei Umfeldleuchtdichten von $0,01 \text{ cd/m}^2 < L < 10 \text{ cd/m}^2$.

Die zurzeit meist nur in der Oberklasse oder gegen Aufpreis erhältlichen Hochdruck-Gasentladungslampen sind keine thermischen Strahler. Sie emittieren daher den größten Teil ihrer Energie im sichtbaren Bereich (Bild 48). Ihr Spektrum ist anders als bei der Glühlampe diskontinuierlich. Mit einer Farbtemperatur von etwa 4.200 K strahlen sie bläulich-weißes Licht aus. Bewertet man erneut das Spek-

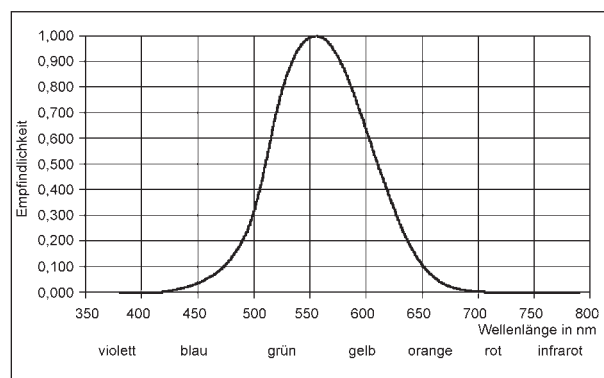


Bild 46: Spektrale Hellempfindlichkeitskurve ($V(\lambda)$ -Kurve) des menschlichen Auges für das Tagessehen; Quelle: [JEB06]

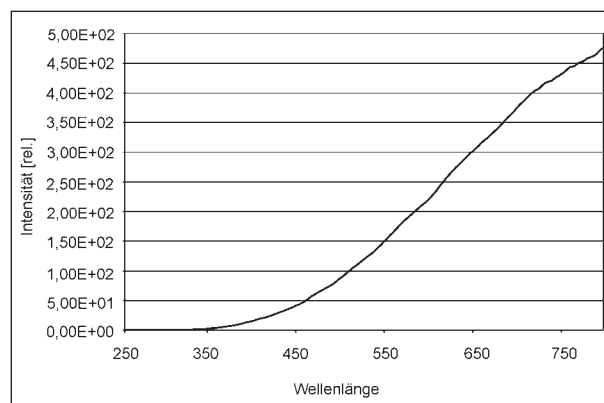


Bild 47: Emissionsspektrum einer Halogenglühlampe; Quelle: eigene Messung

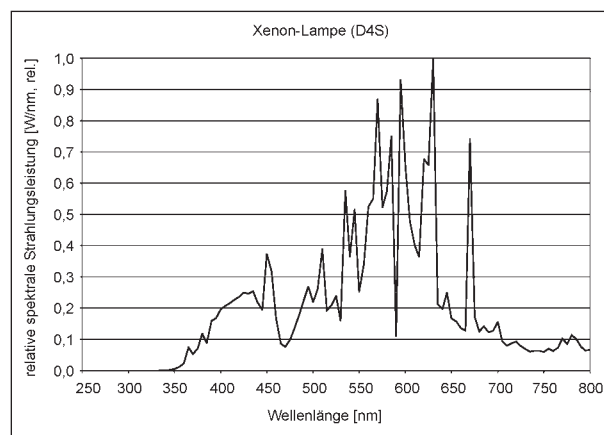


Bild 48: Emissionsspektrum einer Gasentladungslampe; Quelle: eigene Messung

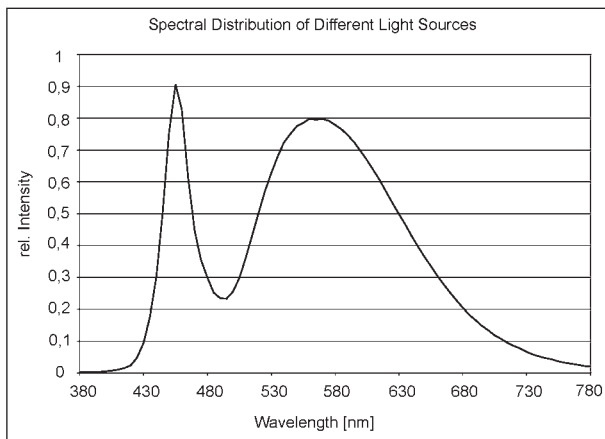


Bild 49: Emissionsspektrum einer Weißlicht-LED; Quelle: eigene Messung

trum der Lichtquelle mesopisch, kann ein wesentlich höherer visueller Nutzeffekt abgeleitet werden.

In naher Zukunft wird auch die LED als Lichtquelle für das Hauptlicht eines Scheinwerfers verwendet werden. Die LED emittiert praktisch sämtliche Strahlung im sichtbaren Bereich. Für die automobilen Scheinwerfertechnologie eignen sich insbesondere Weißlicht-Power-LEDs. Ein typisches Spektrum ist in Bild 49 dargestellt. Aufgrund der derzeitigen Optimierungsstrategie zwischen warmweißer Lichtfarbe, hohem Farbwiedergabeindex und hoher Effizienz liegt die Farbtemperatur je nach verwendetem Phosphor unter Umständen etwa 1.000 K über der Farbtemperatur des Xenon-Lichtes. Somit ist der visuelle Nutzeffekt für das Auge entsprechend den vorangegangenen Betrachtungen ebenfalls höher einzustufen. In Zukunft werden voraussichtlich auch LEDs mit einer geringeren Farbtemperatur zur Verfügung stehen.

An dieser Stelle soll darauf verwiesen werden, dass die Bewertung des Spektrums hinsichtlich des visuellen Nutzeffektes unter mesopischen Bedingungen im Widerstreit zu Untersuchungsergebnissen in Bezug auf die psychologische Blendung in Abhängigkeit von der Farbtemperatur steht. Die zuvor genannten Untersuchungen wurden teilweise mit relativ kleinen „Blendquellen“ durchgeführt. Somit wurde nicht klar zwischen Blendwirkungen, die aufgrund der Objektgröße entstehen können, und der reinen psychologischen Wirkung aufgrund des Farbspektrums differenziert. Hierzu wären weitere Untersuchungen notwendig.

Adaption und Blendung

Zum Zweck der Leistungsoptimierung passt sich das Auge der Helligkeit des Umfeldes an. Dieser

Vorgang wird als Adaption bezeichnet. Zur Adaption zählen die Änderung der Pupillengröße, der Übergang vom Zapfen- auf das Stäbchensehen sowie weitere komplexe neuronale Vorgänge. Aus der Adaption und dem Blendverhalten des Auges leiten sich wichtige Parameter für die Lichtverteilung ab.

Blendung kann entstehen, wenn die Leuchtdichtestruktur innerhalb des Gesichtsfeldes große Inhomogenitäten aufweist. Befindet sich beispielsweise eine helle Lichtquelle im Gesichtsfeld, kommt es zur Entstehung eines Leuchtdichteschleiers auf der Netzhaut. Dieser Schleier wird durch Streulicht erzeugt, welches durch Inhomogenitäten der brechenden Medien im Auge entsteht. Aufgrund dieses Schleiers kommt es zu einer Adaption des Auges auf ein höheres Leuchtdichteniveau und zu einem Verlust der Sehleistung. Diese Form von Blendung wird als physiologische Blendung bezeichnet.

Neben der physiologischen Blendung können helle Lichtquellen im Gesichtsfeld eine psychologische Blendung verursachen. In diesem Fall kommt es nicht zu einer messbaren Reduktion der Sehleistung, sondern lediglich zu einer unbewussten Störung der visuellen Informationsaufnahme. Der Grad der Störung kann entweder über eine subjektive Beurteilung (De-Boer-Skala) oder über ergonomische Messverfahren (Ermittlung der Arbeitsleistung) bestimmt werden.

Nach dieser Theorie führen große Inhomogenitäten mit besonders hellen Flächen in der Lichtverteilung zu einer Blendung des Fahrzeugführers durch die eigenen Scheinwerfer, auch wenn diese hellen Flächenelemente klein sind. In diesem Zusammenhang muss besonders die Ausleuchtung des Vorfeldes und der nahen Seitenbereiche betrachtet werden, da die Beleuchtungsstärke in diesen Bereichen aufgrund des geringen Abstands zu den Scheinwerfern hohe Werte annehmen kann. Die Regelwerke der ECE lassen den Scheinwerferherstellern bislang einen großen Freiraum für die Beleuchtungsstärke dieser Bereiche.

Zur Beurteilung der Blendung, die durch eine hohe Leuchtdichte der Vorfeld- und Seitenausleuchtung verursacht wird, führte JEBAS [JEB06] im Rahmen seiner Diplomarbeit dynamischen Untersuchungen am Lichttechnischen Institut in Karlsruhe (LTI) durch. Untersucht wurde der Einfluss einer Erhöhung der Leuchtdichte der Vorfeld- bzw. Seitenausleuchtung auf die Erkennbarkeitsentfernung von niedrigen und hohen grauen Tafeln im Straßenverkehr.

Untersucht wurden insgesamt vier verschiedene Lichtverteilungen, bestehend aus einer Lichtverteilung mit einem hellen Vorfeld, einer Verteilung mit einer hellen Seitenausleuchtung, einer Lichtverteilung mit einem kombinierten hellen Vorfeld- und Seitenbereich sowie als Referenz eine Lichtverteilung mit geringer Leuchtdichte in diesen Bereichen. Die Leuchtdichte der Vorfeldausleuchtung wurde im Versuch von $L = 1,5 \text{ cd/m}^2$ auf $L = 3 \text{ cd/m}^2$ erhöht, die Leuchtdichte der Seitenausleuchtung von $L = 0,3 \text{ cd/m}^2$ auf $L = 1,2 \text{ cd/m}^2$.

Zur Generierung dieser verschiedenen Lichtverteilungen wurde am Lichttechnischen Institut in Karlsruhe eigens ein spezieller LED-Forschungsscheinwerfer entwickelt (Bild 50). Dieser Scheinwerfer besteht aus 32 mechanisch verstellbaren LED-Modulen mit jeweils vier Golden-Dragon-LEDs der Firma Osram. Jede LED lässt sich über einen Laptop einzeln ansteuern. Dadurch lassen sich verschiedenen Lichtverteilungen erzeugen.

Nach den Ergebnissen dieser Studie führt eine Erhöhung der Leuchtdichte im Vorfeld- sowie im Seitenbereich zu einem Anstieg der Erkennbarkeitsentfernung im Straßenverkehr (Bild 51). Der Grund hierfür ist die Erhöhung der Objektleuchtdichte durch das von der Straße reflektierte Licht der Vorfeld- und Seitenausleuchtung. Die Erhöhung des Objektkontrastes zum Hintergrund hat demnach einen größeren positiven Einfluss als der aus der Erhöhung der Leuchtdichte resultierende negative Einfluss der physiologischen Blendung [JEB06].

Im Versuch wurde weiterhin die psychologische Blendung mit Hilfe von Fragebögen ermittelt. Im Fall der separaten Erhöhung der Leuchtdichte im Vorfeld- und Seitenbereich wurde eine Verbesserung der Sehsituation nachgewiesen. Bei kombinierter Vorfeld- und Seitenausleuchtung, d. h. bei einer großflächigen Erhöhung der Leuchtdichte in diesen Bereichen, gaben die Probanden eine psychologische Blendung an.

Dieser Untersuchung zufolge ist die durch helle Bereiche in der Lichtverteilung verursachte Blendung für den Fahrer durch die fahrzeugeigenen Scheinwerfer gering. Erst bei einer großflächigen Erhöhung der Leuchtdichte kommt es zur nachteiligen psychologischen Blendung.

VÖLKER [VOE06] beschäftigte sich ebenfalls mit der Thematik der Blendung durch ein helles Vorfeld. Seine Untersuchungen fanden im Labor statt. Den Ergebnissen dieser Studie zufolge führt eine



Bild 50: LED-Forschungsscheinwerfer des Lichttechnischen Institutes (LTI) in Karlsruhe; Quelle: [JEB06]

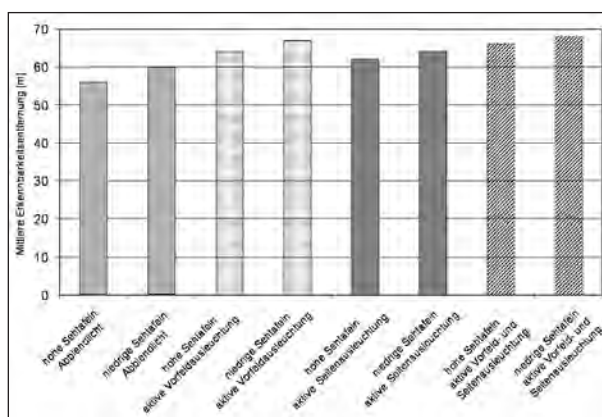


Bild 51: Erkennbarkeitsentfernung in Abhängigkeit der untersuchten Lichtverteilung der Sehzeichen

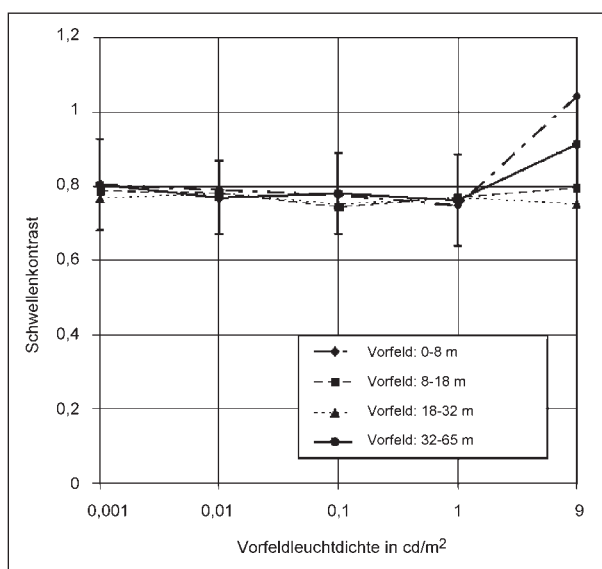


Bild 52: Schwellenkontrast in Abhängigkeit der Vorfeldleuchtdichte; Quelle: [VOE06]

Erhöhung der Leuchtdichte ab $L = 1 \text{ cd/m}^2$ zu einer geringen Erhöhung des Schwellenkontrastes und somit zu einer Abnahme der Sehleistung (Bild 52).

Beide Untersuchungen belegen, dass sich lediglich hohe Leuchtdichten im Vorfeld- und Seitenbereich negativ auswirken. VÖLKER konnte hier eine ge-

ringe physiologische Blendung nachweisen, JEBAS eine psychologische Blendung. Aus dem reinen Gesichtspunkt der Blendung des Fahrzeugführers selbst ist es demnach nicht nötig, die Leuchtdichten im Vorfeld und dem Seitenbereich zu reduzieren.

Wie bereits beschrieben resultiert die Adaptation des visuellen Systems auf ein höheres Leuchtdichtenniveau aus dem Streulicht, welches durch im Augapfel vorhandene Inhomogenitäten verursacht wird. Da Anzahl und Größe dieser Streuzentren altersabhängig sind, kann auch eine Altersabhängigkeit der Blendung abgeleitet werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob eine Anpassung der Lichtverteilung an das Alter des Fahrers sinnvoll ist.

VÖLKER untersuchte in seiner Habilitation den Einfluss von verschiedenen Leuchtdichteverteilungen des Vorfeldes auf die Kontrastschwelle von Probanden mit einem Alter von unter und über 35 Jahren. Seiner Untersuchung zufolge kann allerdings kein wesentlicher Einfluss des Alters auf die Kontrastschwellenerhöhung bei höheren Vorfeldleuchtdichten nachgewiesen werden. Daraus leitet sich eine in dieser Hinsicht vom Alter unabhängige Lichtverteilung für Scheinwerferkonzepte ab.

Das visuelle System ist stets auf der Suche nach visuell attraktiven Mustern, wie beispielsweise sich bewegende Objekte oder helle Flächen. Für den automobilen Scheinwerfer ergeben sich in diesem Kontext zwei Fragen: zum einen, ob am fahrenden Fahrzeug vorbei ziehende Objekte häufiger fixiert werden, wenn man diese stärker ausleuchtet; zum anderen, ob Bereiche mit hohen Leuchtdichten zu einer vermehrten Fixation führen.

Da aufgrund des geringen Abstandes zu den Scheinwerfern die Leuchtdichte der Vorfeldausleuchtung relativ hohe Werte annehmen kann, ist es notwendig, die Abhängigkeit der Fixation von der Leuchtdichte dieses Bereiches zu untersuchen. Eine vermehrte Fixation könnte dazu führen, dass der Fahrzeugführer den aus Sicherheitsgründen wichtigen Bereich unbewusst weniger beachtet und somit die Verkehrssicherheit gefährdet. Dieser Bereich befindet sich in der Entfernung vor dem Fahrzeug, in der das Fahrzeug sicher zum Stehen gebracht werden kann. Bei der auf der Landstraße gefahrenen Geschwindigkeit von maximal 100 km/h ergeben sich bei einer Verzögerung von -10 m/s^2 (Notbremsung) und einer Reaktionszeit von 0,8 s

ein Anhalteweg und somit eine minimale Reichweite für die Fixation von 60 m.

Zur Überprüfung der Theorie, hohe Leuchtdichten der Vorfeld- und Seitenausleuchtung führen zu einer vermehrten Fixation dieser Bereiche, werden voraussichtlich Ende 2007 am Lichttechnischen Institut in Karlsruhe Untersuchungen mit Hilfe eines Eye-Tracking-Systems durchgeführt. Für diese Studie wird ebenfalls der in Bild 50 dargestellte Forschungsscheinwerfer verwendet, mit dem verschiedene Lichtverteilungen generiert werden konnten. Zunächst werden die Blickbewegungen von Probanden während einer Fahrt mit einer Lichtverteilung mit geringer Intensität der Vorfeld- und Seitenausleuchtung aufgezeichnet. Diese können dann mit den Blickbewegungen während einer Fahrt mit einer Lichtverteilung mit hoher Intensität der Vorfeld- und Seitenausleuchtung verglichen werden. Die Ergebnisse dieser Studie werden in einem weiteren Forschungsbericht vorgestellt werden.

4.8.2 Technische Sensoren

Moderne Sensorsysteme können den Fahrer bei der Aufnahme der verkehrsrelevanten Informationen unterstützen. In Situationen, in denen schlechte Sichtverhältnisse vorliegen, könnten Informationen über die Lage von verkehrsrelevanten Objekten von technischen Sensoren detektiert werden. Im Folgenden werden die Möglichkeiten einer Unterstützung des Fahrzeugführers durch technische Sensoren erörtert.

Nachtsicht-Systeme

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Erkennbarkeit von Objekten im Straßenverkehr bei gleichzeitiger Blendungsminimierung ist die Verwendung eines Nachtsicht-Systems (engl.: Night Vision). Diese Systeme nehmen ein Bild der vorausliegenden Straßenszene auf und präsentieren dieses auf einem Display im Sichtbereich des Fahrers. Für die Bildaufnahme wird hier der Infrarotbereich der Strahlung, d. h. der Wellenlängenbereich von ca. $780 \text{ nm} < \lambda = < 20 \text{ }\mu\text{m}$, verwendet.

Man unterscheidet zwei Systeme. Zum einen kann ein passives System mittels Wärmebildkamera die Wärmestrahlung der Körper selbst detektieren, da warme Objekte Strahlung im Ferninfrarotbereich (FIR) emittieren. So heben sich zum Beispiel Fußgänger und Tiere auf einer kalten Fahrbahn im Wärmebild deutlich voneinander ab (Bild 53). Zum

anderen kann eine aktive Ausleuchtung des Straßenbereiches mit naher Infrarotstrahlung (NIR) erfolgen. In diesem Fall können nicht nur Temperaturunterschiede dargestellt werden, sondern die gesamte vom Infrarotemitter ausgeleuchtete Szene (Bild 54). Da Infrarotstrahlung vom Menschen praktisch nicht wahrgenommen wird, kann auch bei aktiver Ausleuchtung die Blendung der Verkehrsteilnehmer ausgeschlossen werden. Nachteil des aktiven Systems ist die kürzere Reichweite im Vergleich zum passiven System sowie die Blendung des Kamerasystems durch den aktiven Infrarotscheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge.

Zur Bereitstellung der Informationen für den Fahrer kann ein Head-up-Display²⁵ oder ein Head-down-Display²⁶ eingesetzt werden. In einer Studie (interne Mitteilung) gaben 10 % der Testfahrer eines Fahrzeugs mit Nachtsichtsystem an, den Blick dauerhaft auf den Bildschirm gerichtet zu haben und ausschließlich nach dessen Bildinhalt gefahren zu sein. Fast alle übrigen Fahrer taten dies zumindest zeitweise. Da aufgrund des kleinen Bildausschnittes jedoch nicht gewährleistet werden kann, dass alle für den Straßenverkehr nötigen Informationen auf dem Display übertragen werden, ist eine dauerhafte Blickabwendung zu vermeiden. Aufgrund der geringeren Sehschärfe in den peripheren Bereichen der Netzhaut richtet der Fahrzeugführer bei einer nicht auf dem Display dargestellten Information, die er im peripheren Gesichtsfeld wahrnimmt, zunächst den Blick auf den Verkehrsraum, bevor er reagiert. Die Zeit, die er für diese Blickzuwendung benötigt, gilt es zu vermeiden. Dies spricht in erster Linie für die Verwendung eines Head-up-Displays.

Auch in Hinsicht auf den Akkommodationsaufwand²⁷ des Auges ist das Head-up-Display zu bevorzugen. Bei einer angenommenen Objektweite

²⁵ Beim Head-down-System muss der Fahrzeugführer den Blick vom Verkehrsraum abwenden, um die Anzeige erfassen zu können

²⁶ Beim Head-up-Display wird die Information in das Sichtfeld des Fahrzeugführers projiziert, sodass dieser den Blick nicht vom Verkehrsraum abwenden muss, um die Anzeige erfassen zu können.

²⁷ Als Akkommodationsaufwand wird der Brechwertzuwachs der Augenlinse bei Einstellung des visuellen Systems vom Fernpunkt auf den Einstellpunkt bezeichnet. Der Fernpunkt liegt unter Annahme eines rechtsichtigen bzw. korrigierten Auges im Unendlichen, der Einstellpunkt im diskutierten Fall in der jeweiligen Displayebene.

²⁸ Die Dioptrie bezeichnet eine in der Augenoptik verwendete Maßeinheit und stellt den Kehrwert der Maßeinheit Meter dar ($1 \text{ dpt} = 1/\text{m}$).

des virtuellen Displaybildes eines Head-up-Displays von 250 cm beträgt der Brechwertzuwachs der Augenlinse lediglich 0,4 dpt²⁸. Bei einem Head-down-Display mit einer angenommenen Objektweite des Displays von 80 cm muss der Fahrzeugführer bereits 1,25 dpt, also mehr als das Dreifache, aufwenden. In Bild 55 ist der Unterschied zwischen beiden Varianten grafisch dargestellt.

Die derzeit technisch und physiologisch sinnvollen Einbauorte von Nachtsichtdisplays zeigt Bild 56, wobei Untersuchungen (interne Mitteilung) ergaben, dass das Head-up-Display vor dem in Blickrichtung installierten Head-down, und dies wie-



Bild 53: FIR-Nachtsichtsystem in einem Fahrzeug des Herstellers BMW; Quelle: [BMW]

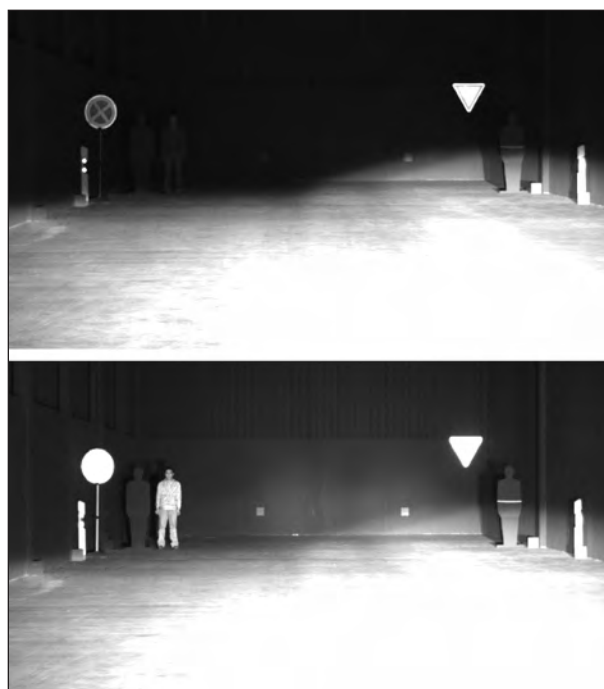


Bild 54: Aufnahme einer Verkehrsszene ohne (oben) und mit (unten) NIR-Nachtsichtsystem; Quelle: [SAR05]

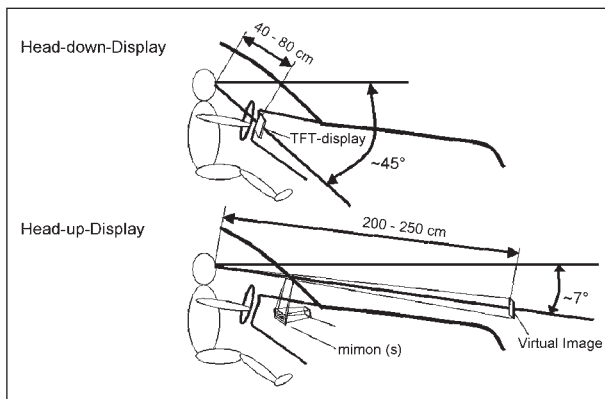


Bild 55: Im Vergleich zum Head-up-Display muss der Fahrer bei der Verwendung des Head-down-Displays den Kopf stärker neigen und für die kürzere Objektweite stärker akkomodieren; Quelle: [LAC05]



Bild 56: Aus heutiger Sicht sinnvolle Anbauorte für ein Display eines Nachtsicht-Systems

derum vor dem in der Mittelkonsole installierten Head-down-Displays von den Testfahrern favorisiert wurde.

Radarsysteme

Das Nachtsicht-System besitzt zwar bei sehr geringen Umfeldleuchtdichten (z. B. in einer Neumondnacht) große Vorteile, in Schlechtwettersituationen, wie beispielsweise im Fall von dichtem Nebel, kann dieses System allerdings nur bedingt die Erkennung von Objekten im Straßenverkehr sicherstellen. Eine Möglichkeit, Objekte auch bei schlechtesten Sichtverhältnissen zu detektieren, ist die Eingliederung eines Radarsystems im Fahrzeug. Diese Technik findet sich bereits in modernen Serienfahrzeugen.

Radar steht für „RADio Detection And Ranging“. Der Radar-Sender sendet eine Welle mit einer Grundfrequenz von 77 GHz oder 24 GHz für den Automobil-Sektor aus, die von Objekten reflektiert wird. Diese Echos kann ein Rechenmodul auswerten und so Entfernungen, aber auch Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen dieser Objekte be-

stimmen. Aus der Laufzeit der Radar-Welle kann der Abstand zu einem Objekt bestimmt werden. Aus der Frequenz der reflektierten Welle kann nach dem Doppler-Prinzip²⁹ berechnet werden, mit welcher Geschwindigkeit sich das Objekt vom eigenen Fahrzeug weg oder darauf zu bewegt. Mit der eigenen Fahrzeuggeschwindigkeit, die über den CAN-Bus bekannt ist, kann die Geschwindigkeit des Objektes berechnet werden.

Die 77-GHz-Radare haben eine Reichweite von ca. 150 Metern und eignen sich so, um andere Fahrzeuge vor dem eigenen Fahrzeug zu detektieren und so zum Beispiel eine Kollisionswarnung auszugeben. Die kostengünstiger herstellbaren 24-GHz-Radare haben je nach Konfiguration eine Reichweite von 50 bis 120 m. Sie eignen sich somit zum Beispiel für die Überwachung des rückwärtigen Verkehrsraumes, um bei einem herannahenden Fahrzeug auf der Nachbarspur einer mehrspurigen Straße bei gleichzeitiger eigener Spurwechselabsicht zu warnen.

Für das 24 GHz Ultra Wide Band (UWB) wurde in der ersten Jahreshälfte 2004 eine Richtlinie durch die ECC (European Communications Commission) erlassen, die eine zeitlich begrenzte Zulassung bis zum Jahr 2013 regelt. In diesem Zeitraum darf zum Schutz der etablierten Dienste (Radioastronomie, Erderkundungs-Satelliten-Service) eine Penetrationsrate von 7 % je europäischem Land nicht überschritten werden. Des Weiteren müssen die Kfz-Systeme in der Nähe der Bodenstationen dieser Dienste abgeschaltet werden. Die Nachfolgefrequenz (79 GHz UWB) ab 2013 wurde zeitgleich ohne Einschränkungen freigegeben.

Lidarsysteme

Nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet das Lidar-System. Lidar steht für „LIght Detection And Ranging“. Es verwendet zur Laufzeitmessung das Licht, also elektromagnetische Wellen mit Frequenzen von mehreren hundert Tera-Hertz (THz). Dazu wird ein kurzer Lichtpuls ausgesendet und eine schnelle Auswerteelektronik berechnet aus der Dauer, bis das reflektierte Licht den Empfänger erreicht hat, die Entfernung zum Objekt. Lidar-Systeme haben

²⁹ Nähern sich Beobachter und Quelle einander, so erhöht sich die Frequenz, entfernen sich die beiden voneinander, verringert sich die Frequenz. Bekanntes Beispiel ist die Tonhöhenänderung des Martinshorns eines vorbeifahrenden Rettungswagens.

eine Detektionsreichweite von 150 bis 200 Metern und können aufgrund der unterschiedlichen Reflexionseigenschaften zum Beispiel Nebel von Fahrzeugen unterscheiden. Lidar-Systeme besitzen gegenüber Radar-Systemen einen Kostenvorteil.

Eine Bauvariante des Lidars ist der so genannte Laserscanner. Dieser sendet über einen rotierenden Spiegel einen Strahl eines Infrarot-Lasers aus. Die Reflexion des Strahls wird von einer Photodiode empfangen und von einer Elektronik, die die Position des Scanner-Spiegels kennt, ausgewertet. Dadurch lässt sich nicht nur wie beim Lidar-System berechnen, dass Objekte im Erfassungsbereich vorhanden sind. Vielmehr lässt sich deren Position und Wegbahn verfolgen und damit für kurze Zeitbereiche näherungsweise vorhersagen.

Photonic Mixer Device

Ein weiteres Bauelement, das mit der Laufzeitmessung von Licht funktioniert, ist das „Photonic Mixer Device“ (PMD). Das vom PMD-Sender abgestrahlte intensitätsmodulierte Licht oder Infrarotstrahlung beleuchtet dabei die zu vermessende Szene. Das zurückgestreute und um die Laufzeit verzögerte Lichtsignal trifft auf den PMD-Sensor, eine Matrix aus sehr schnellen Photodioden. Das empfangene Licht wird in dieser PMD-Matrix als Ladungsbild Entfernungselektiv dargestellt, sodass ein Bild der Szene erzeugt wird, dessen Graustufen den Entfernungen der abgebildeten Objekte entspricht.

Sowohl das Radar-, das Lidar-System als auch das PMD können den Fahrzeugführer bei der Erkennung von Hindernissen während der Fahrt wesentlich unterstützen. Parameter für den Frontscheinwerfer ergeben sich aus dieser Technologie nicht. Das visuelle System des Menschen, für den ein Scheinwerfer konzipiert wird, kann hier lediglich unterstützt werden.

Fotodioden

Sensoren können nicht nur zur Detektion von Objekten eingesetzt werden, sie können weiterhin die Bedienung des Scheinwerfers vereinfachen. So kann beispielsweise ein Lichtsensor eingesetzt werden, um bei definierten Umfeldleuchtdichten automatisch die Fahrzeugbeleuchtung einzuschalten, denn oftmals erweist sich diese scheinbar triviale Aufgabenstellung an den Fahrzeugführer als Gefahrenquelle. In vielen Fällen schaltet der Fahrzeugführer die Beleuchtung erst dann ein, wenn

dessen Sicht selbst eingeschränkt ist. Die Erkennbarkeit des eigenen Fahrzeugs gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern wird nicht berücksichtigt.

Lichtempfindliche Sensoren sind Fotodioden. Diese Sensoren wandeln Licht in elektrischen Strom um. Fotodioden bestehen z. B. für sichtbares Licht aus Silizium-, für infrarotes Licht aus Germanium oder anderen Halbleitermaterialien. Durch die Bestrahlung mit Licht werden bei der in Sperrrichtung betriebenen Diode Ladungsträger freigesetzt, die zu einem Stromfluss führen. Der Fotostrom ist über viele Größenordnungen linear zum Lichteinfall [IQ2]. Mit Hilfe solcher Fotodioden kann die Umgebungshelligkeit gemessen werden, um einen Tunnel oder die Dämmerung zu detektieren und die Hauptscheinwerfer einzuschalten. Solche Systeme haben sich bereits seit mehreren Jahren in der Fahrzeugtechnik etabliert. Eine Vorschrift seitens der ECE gibt es bislang allerdings nicht. Jedoch wird dies derzeit im Zusammenhang mit Tagfahrleuchten intensiv diskutiert.

Fernlichtassistent

Mehrere Studien [HEL00] haben belegt, dass im europäischen Verkehrsraum das Fernlicht nur in fünf bis fünfundzwanzig Prozent aller möglichen Fälle eingeschaltet wird. Eine automatische Umschaltung vom Fern- auf das Abblendlicht könnte den Anteil der Fernlichtfahrten erhöhen und eine Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer durch das Fernlicht vermeiden. Diese Funktion wird als Fernlichtassistent bezeichnet. Bereits 1970 ist ein ähnliches System dieser Art von HICKS umgesetzt worden [HIC70].

Der Fernlichtassistent ermöglicht es einem Fahrzeug, selbstständig bei der Detektion von Verkehrsteilnehmern im eigenen Scheinwerferlicht von Fernlicht auf Abblendlicht abzublenden und nach dem Passieren des Verkehrsteilnehmers wieder auf das Fernlicht aufzublenden.

Ein solches System muss andere Verkehrsteilnehmer wie Lkw, Busse, Pkw, Motorradfahrer und sogar Fahrradfahrer sicher erkennen, darf andererseits nicht durch andere Lichtquellen, wie zum Beispiel Ampeln, Straßenlaternen oder reflektiertes Licht von Leitpfosten, Schildern, Regentropfen oder Schneeflocken, irritiert werden.

Da der Sensor bei Verschmutzung gereinigt werden sollte, bietet sich seine Positionierung im Wischbereich des Scheibenwischers an (Bild 57).



Bild 57: Sensor des Fernlichtassistenten in der Rückspiegelhalterung; Quelle: [KUH05]

Die Assistenzfunktion sollte bei der Bedienung des Fern- und Abblendlichtes lediglich unterstützend wirken. Der Fahrzeugführer sollte stets die oberste Entscheidungsgewalt besitzen, d. h., ein Umschalten zwischen den Lichtverteilungen sollte auf Wunsch des Fahrzeugführers stets möglich sein, auch wenn das Assistenzsystem die jeweils andere Lichtverteilung favorisiert.

5 Technische Realisierung

In Kapitel 4 wurden die Anforderungen an moderne Automobilscheinwerfer erörtert und daraus resultierende Parameter abgeleitet. In diesem Kapitel werden bestehende Scheinwerfersysteme und Systemkomponenten erläutert sowie die Möglichkeiten zur technischen Umsetzung der in Kapitel 4 beschriebenen Parameter diskutiert. Dabei wird neben den technischen Möglichkeiten auch die Wirtschaftlichkeit einer denkbaren Umsetzung betrachtet. Im Anschluss erfolgt eine Bewertung des Potenzials zur Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr.

5.1 Hell-Dunkel-Grenze (HDG)

Um die Reichweite des Scheinwerfers zu erhöhen und dennoch eine Blendung des Gegenverkehrs zu minimieren, schreiben die ECE-Regelungen 98, 112, sowie 123 ein asymmetrisches Abblendlicht mit einer Hell-Dunkel-Grenze vor.

Je nach Scheinwerfersystem wird die Hell-Dunkel-Grenze momentan mit oder ohne Blende im Strahlengang erzeugt. Mit einer Blende arbeiten Paraboloid-Reflexionsoptiken und Projektionsoptiken. Bei der Paraboloid-Optik wird ein unterhalb der

Abblendlichtwendel der Glühlampe befindlicher „Blendlöffel“ oder eine externe „Blendkappe“ verwendet. Projektionsoptiken nutzen eine nahe der Brennweite der Linse integrierte Blende mit der Form der Hell-Dunkel-Grenze. Der wesentliche Nachteil dieser Systeme ist der durch die Blende bedingte relativ niedrige Wirkungsgrad. Ohne Blende arbeiteten Freiform-Reflexionsoptiken, die einen wesentlich höheren Wirkungsgrad besitzen als blendenbasierte Scheinwerfer.

Dieser Überlegung zufolge scheint es zunächst ratsam, für moderne Scheinwerfer stets Freiform-Reflexionsoptiken zu verwenden. Allerdings zeichnen sich diese Systeme durch eine hohe Toleranzempfindlichkeit und eine schlechte Homogenität der Lichtverteilung aus. Des Weiteren können Reflexionssysteme nur bedingt adaptive Funktionen übernehmen. Daraus leitet sich die Notwendigkeit eines nicht blendenbasierten Projektionssystems mit hohem Wirkungsgrad ab. Ein solches System könnte eine Freiform-Projektionsoptik verwenden. Die Hell-Dunkel-Grenze würde in diesem Fall durch die Linse des Projektionssystems erzeugt werden. Fast der gesamte von der Lampe ausgehende Lichtstrom kann dann für die Lichtverteilung genutzt werden.

Da mit einem System dieser Art lediglich eine Lichtverteilung erzeugt werden kann, erfüllt es nicht alle Anforderungen eines adaptiven Scheinwerfers. In Systemen mit getrenntem Abblend- und Fernlichtmodul kann es jedoch Verwendung finden.

5.2 Adaptive Frontbeleuchtungssysteme (AFS)

AFS – Adaptive Frontbeleuchtungssysteme (engl. Adaptive Frontlighting Systems) werden bereits seit einigen Jahren in der automobilen Scheinwerfer-technik verwendet. Anders als beim traditionellen Scheinwerfer, welcher lediglich das Abblendlicht und das Fernlicht generieren kann, ist ein Adaptives Frontbeleuchtungssystem situativ-adaptiv, d. h., es ist in der Lage, sich den ständig wechselnden Umgebungsbedingungen anzupassen. Dadurch kann dieses System auch bei ungünstigen Bedingungen eine Optimierung der Erkennbarkeit verkehrsrelevanter Objekte gewährleisten. Die Umgebungsbedingungen können von den Wetterbedingungen, dem befahrenen Straßentyp oder auch der gefahrenen Geschwindigkeit abhängen. Zum Adaptiven Frontbeleuchtungssystem gehören die Anpassung der Lichtverteilung, der Lichtstärke, das Kurven-

und Abbieglicht sowie die dynamische Leuchtweitenregelung.

5.2.1 Variable Lichtverteilungen

Über die Lichtverteilung eines Scheinwerfers wird definiert, wie der von der Lichtquelle zur Verfügung stehende Lichtstrom abgestrahlt wird. Eine Modulation der Lichtverteilung ermöglicht eine Anpassung an den Straßentyp sowie an verschiedene Witterungsbedingungen.

Erste Scheinwerferkonzepte mit adaptiven Lichtverteilungen wurden bereits in den 70er Jahren in den USA realisiert. In dieser Zeit entwickelte ADLER [ADL73] das Three-Beam Scheinwerfersystem. Neben dem bekannten Abblend- und Fernlicht generierte dieser Scheinwerfer eine dritte Lichtverteilung mit einer 30 % höheren Reichweite. Diese Lichtverteilung war für hohe Geschwindigkeiten außerhalb geschlossener Ortschaften vorgesehen. Aufgrund der Blendung des Gegenverkehrs wurde dieses System jedoch nie in einem Serienfahrzeug integriert.

Im Gegensatz zum Three-Beam-Scheinwerfer sollen moderne adaptive Systeme die Lichtverteilung nicht nur dem Straßentyp anpassen, sondern auch den Witterungsbedingungen (siehe Kapitel 3). Eine Anpassung der Lichtverteilung an jede erdenkliche Umgebungsbedingung ist jedoch aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten und der damit verbundenen hohen Anzahl der Lichtverteilungen nur schwer realisierbar. Da der Entwicklungsaufwand je Lichtverteilung in etwa dem Entwicklungsaufwand eines Scheinwerfers entspricht, entstehen hohe Kosten, die letztendlich der Käufer eines Fahrzeuges zu tragen hat. Neben diesem Punkt spricht auch der technische Aspekt für eine ausgewählte Anzahl an Lichtverteilungen.

Die Automobilindustrie denkt mit der Einführung der AFS-Scheinwerfer als Ersatz für das heutige Abblendlicht an die Realisierung eines Landstraßenlichtes, eines Autobahnlichtes, eines Stadtlichtes und eines Schlechtwetterlichtes (für Links- und Rechtsverkehr). Das Fernlicht soll nach wie vor in seiner traditionellen Form verwendet werden. Genau definierte Vorschläge für die Parameter der Verteilung finden sich in Kapitel 4.3 und 4.4. Zum besseren Verständnis stellen die Bilder 58-62, die

von der Firma Hella entwickelt wurden, die benannten Lichtverteilungen grafisch aus der Birdview-Perspektive dar.

Beim automobilen Scheinwerfer können zwei bereits etablierte optische Konzepte unterschieden werden, das Reflexionssystem und das Projektionssystem (siehe Kapitel 1.2). Je nach Konzept kann die Lichtverteilung mittels mechatronischer Systeme³⁰ durch unterschiedliche technische Ansätze variiert werden.

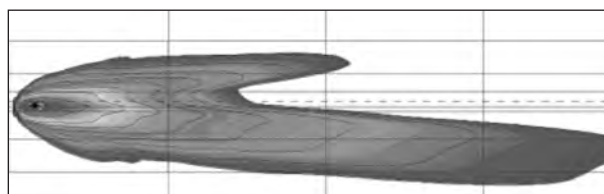


Bild 58: Vorschlag für eine Landstraßenlichtverteilung nach Hella; Quelle: [Hella]

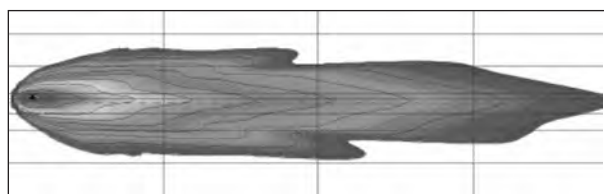


Bild 59: Vorschlag für eine Autobahnlichtverteilung nach Hella; Quelle: [Hella]

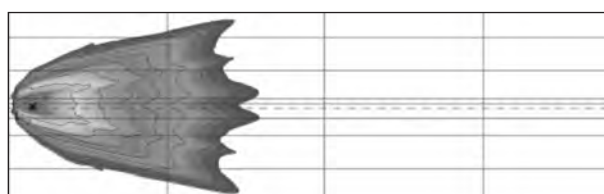


Bild 60: Vorschlag für eine Stadtlichtverteilung nach Hella; Quelle: [Hella]

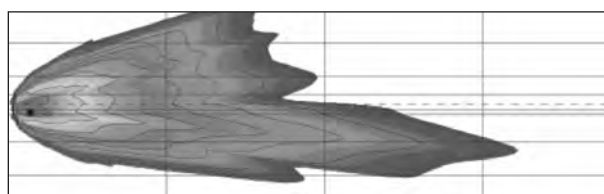


Bild 61: Vorschlag für eine Schlechtwetterlichtverteilung nach Hella; Quelle: [Hella]



Bild 62: Traditionelles Fernlicht; Quelle: [Hella]

³⁰ Mechatronische Systeme bilden einen Regelkreis aus den Funktionsgruppen Mechanik, Sensorik, Informatik und Aktorik.

Konzepte

Eine einfache Möglichkeit zur Modulation der Lichtverteilung bietet das Projektionssystem. Bei diesem Konzept wird die Hell-Dunkel-Grenze in der Regel durch eine im Scheinwerfer befindliche Blende mit der Form der Hell-Dunkel-Grenze erzeugt. Durch die Verwendung einer variablen Blende kann eine bestimmte Anzahl von Lichtverteilungen erzeugt werden. Die Blende erzeugt mittels ihrer jeweiligen Oberflächenkontur eine mögliche Form der Hell-Dunkel-Grenze entsprechend der gewünschten Lichtverteilung. Die Modulation der Lichtverteilung kann entweder über die Drehung einer Walze, einer rotierenden Scheibe oder verschiebbare Komponenten an der Blendenposition erfolgen. Ein kleiner Elektromotor übernimmt die Funktion der Bewegung. Ein System dieser Art mit rotierender Blende wurde von der Firma Hella KGaA Hueck & Co. entwickelt [EICH99] (Bild 63). Vorteil dieses Systems ist die relativ große Gestaltungsfreiheit der einzelnen Verteilungen im Vergleich zu anderen Systemen.

Neben einer reinen Blende können auch Kombinationen aus Blende und Filter verwendet werden. Auf diese Weise wäre es möglich, die Lichtstärke in bestimmten Bereichen lediglich zu verringern. Besonders für eine Schlechtwetterlichtfunktion ist diese Variante von Interesse. Aufgrund der relativ einfachen Mechanik und der geringen Toleranzempfindlichkeit sind die Kosten eines solchen Systems vergleichsweise niedrig.

Projektionssysteme bieten eine weitere Option zur Modulierung der Lichtverteilungen. Über eine rotatorische und translatorische Bewegung der Projek-

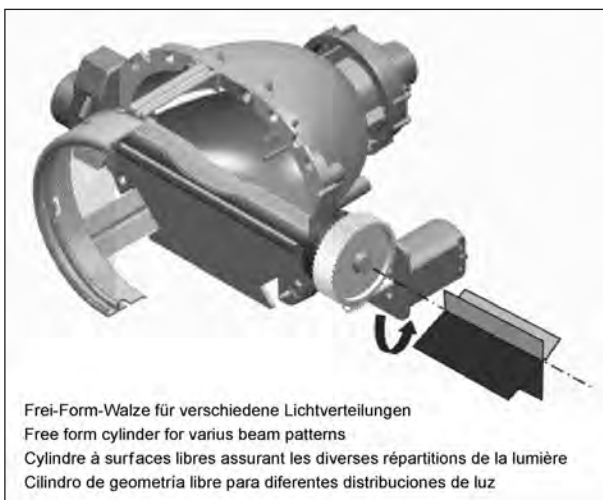


Bild 63: Schematischer Aufbau eines Vario-Xenon-Projektionsmoduls mit Freiformwalze; Quelle: [EICH99]

tionslinse kann die Abstrahlcharakteristik verändert werden. Die gestalterischen Möglichkeiten der Lichtverteilungen sind allerdings geringer als im vorher genannten Beispiel. Vorteilhaft wirkt sich hingegen der höhere Wirkungsgrad aus. Unter dem Namen Total Beam Control beschrieb KOBAYASHI 1991 ein System dieser Art [KOB91].

Anders als bei Projektionssystemen wird die Lichtverteilung bei modernen Freiform-Reflexionssystemen nicht durch eine im Strahlengang befindliche Blende erzeugt, sondern durch die Reflektorgeometrie selbst. Eine auf der Scheinwerferabschlussscheibe befindliche Streuoptik wird heute nur noch selten verwendet. Eine Modulation der Lichtverteilung kann bei diesem Konzept durch eine Bewegung der Lichtquelle, eine Bewegung des Reflektors oder durch das Einbringen von Blenden realisiert werden. Als Beispiel für dieses Konzept kann das Bi-Xenon-Reflexionssystem genannt werden. Bei diesem Scheinwerfer wird durch die Drehung der Xenon-Lampe um ihre horizontale Achse zwischen Fernlicht und Abblendlicht gewechselt.

Eine weitere Möglichkeit, die Lichtverteilung zu variieren, ist die Verwendung von beweglichen Spiegeln im Reflektor. Je nach Anzahl der Spiegel kann der gesamte Lichtstrom oder Teile des Lichtstroms kontrolliert werden. Die Spiegel werden über mechanische Komponenten bewegt und können zwei oder mehrere Zustände annehmen. KOBAYASHI beschreibt 1991 ein Partial-Beam-Control-Konzept, bei dem mit Hilfe von zwei Spiegeln definierte Teile des Lichtstroms in verschiedene Richtungen gelenkt werden können [KOB91]. Aufgrund der vielen beweglichen Teile ist ein solches System jedoch vergleichsweise aufwändig zu realisieren und dadurch auch mit hohen Fertigungskosten verbunden.

Ein Konzept mit einem hohen Freiheitsgrad ist der sog. scannende Scheinwerfer [EICH05]. Zum Einsatz kommen hier ebenfalls zwei bewegliche Spiegel. Diese erzeugen einen Lichtfleck geringer Ausdehnung auf der Straße. Ein Verdrehen der Spiegel bewirkt eine Bewegung dieser beleuchteten Fläche. Bei einer ausreichend hohen Geschwindigkeit wird der sich bewegende Lichtfleck als gleichmäßige Lichtverteilung wahrgenommen. Die Modulation erfolgt über eine unterschiedliche Bewegung der Spiegel. Es empfiehlt sich, den scannenden Scheinwerfer ergänzend zu einer Basislichtverteilung zu verwenden. So kann der Bereich unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze durch die Basislichtverteilung

lung ausgeleuchtet und im zentralen Bereich die Lichtverteilung moduliert werden. Ein System dieser Art (Bild 64) wurde bereits mit gutem Ergebnis getestet [GOE04] (vgl. Kapitel 5.2.6).

KOBAYASHI beschreibt ein aus zwei horizontal beweglichen Modulen bestehendes System zur Modulierung der Breite und Reichweite einer Lichtverteilung [KOB91]. In weiterer Überlegung könnte dieses System aufgrund der Forderung einer Leuchtwertenregelung auch die vertikale Bewegung der Module beinhalten und somit eine größere Gestaltungsfreiheit der Lichtverteilungen ermöglichen. Die Kosten wären jedoch auch in diesem Fall vergleichsweise hoch. Ebenfalls nachteilig wirkt sich der erhöhte Platzbedarf aus.

Die Modulation der Lichtverteilung kann ferner durch den Einsatz zusätzlicher Lichtquellen ermöglicht werden. Dieses Konzept wird von einer aktuellen Scheinwerferstudie der Firma Valeo genutzt

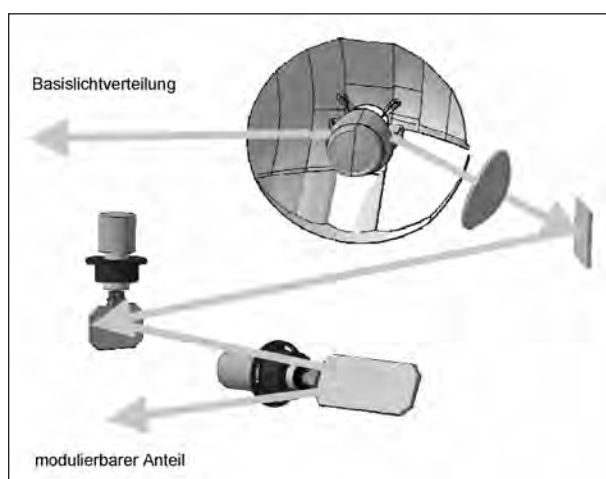


Bild 64: Schematischer Aufbau eines scannenden Scheinwerfers mit Basislichtverteilung und modulierbarem Anteil; Quelle: [GOE04]



Bild 65: Scheinwerfersystem XLED™ der Firma Valeo; Quelle: Valeo

(Bild 65). In diesem Fall wird ein traditionelles Gasentladungs-Projektionssystem durch zusätzliche LEDs ergänzt, welche in Kombination mit dem Projektionsscheinwerfer ein spezielles Autobahnlicht generieren.

Ebenfalls ermöglicht eine Änderung der Lage des Lichtbogens einer Gasentladungslampe eine Modulation der Lichtverteilung ohne mechanische Komponenten. Ein System dieser Art wird von ROTHWELL [ROT98] beschrieben.

In Zusammenhang mit Lichtleitersystemen wurden ebenfalls Scheinwerferkonzepte mit multivariablen Teillichtverteilungen diskutiert. In diesem Fall wird die Modulation der Lichtverteilung durch ein gezieltes Zu- und Abschalten einzelner Lichtleiterelemente erzeugt. Die Variation der Lichtverteilung müsste in diesem Fall jedoch über optisch aufwändige „Umschalter“ oder mehrerer Lichtquellen erfolgen.

Aus der Menge der dargestellten Systeme werden die Möglichkeiten zur Realisierung eines Scheinwerfers mit adaptiver Lichtverteilung ersichtlich. In Hinsicht auf die Wirtschaftlichkeit und die Größe des Systems kann momentan das Projektionssystem in Kombination mit einer modulierbaren Blende präferiert werden. Dieses bietet vielfältige, relativ einfach zu realisierende Gestaltungsmöglichkeiten für die Form der Lichtverteilung.

Weitere Möglichkeiten zur Modulierung der Lichtverteilung mit einem außergewöhnlich hohen Freiheitsgrad entstehen durch den Einsatz eines Pixellichtes. Dieses Thema wird ausführlich in Kapitel 5.2.6 behandelt.

Steuerung der Lichtverteilungen

Der geringe Anteil der Fernlichtfahrten von derzeit etwa 5 % [JEB06] beweist, dass die korrekte Bedienung eines konventionellen Scheinwerfers mit zwei Lichtverteilungen viele Fahrzeugführer bereits überfordert. Demnach ist eine sachgemäße Bedienung eines AFS-Scheinwerfers mit einer Vielzahl situativ adaptiver Lichtverteilungen nicht zu erwarten. Infolge dessen kann ein Vorteil mit einem System dieser Art nur mit Hilfe von Assistenzsystemen erreicht werden. Hier ist ein Netzwerk aus Sensor- und GPS-Systemen notwendig, welche neben den aktuellen Wetterdaten die Lage anderer Verkehrsteilnehmer sowie den befahrenen Straßentyp ermittelt. Die Anpassung der Lichtverteilung erfolgt automatisch. Der Fahrer kann einen größeren Teil seiner Aufmerksamkeit auf den Straßenverkehr richten.

5.2.2 Variable Lichtstärken

Eine Modifizierung der Lichtstärken ist aus mehreren Aspekten sinnvoll. So stellt die Variierung der Lichtstärken beider Scheinwerfer eine einfache Möglichkeit dar, eine Anpassung an verschiedene Witterungsverhältnisse zu unterstützen. Nach ROSENHAIN [ROS99] hängt die Streuleuchtdichte im Nebel von der jeweiligen Anbauposition der Scheinwerfer ab. Der rechte Scheinwerfer erzeugt eine geringere Streuleuchtdichte als der linke Scheinwerfer. Mit diesem Hintergrund könnte durch eine Reduzierung der Lichtstärke des linken Scheinwerfers um etwa 25 % eine Verbesserung der Erkennbarkeitsentfernung erreicht werden (vgl. Kapitel 4.3.1).

Weiterhin ist eine Anpassung der Lichtstärke eines Tagesfahrlichtes an die Umfeldleuchtdichten denkbar. Die simultane Erhöhung beider Scheinwerferlichtstärken bei einer Erhöhung der Umfeldleuchtdichte sorgt für einen konstanten Kontrast und für ein stets gleiches Signalbild.

Die Veränderung der Lichtstärke eines Scheinwerfers kann mit verschiedenen Optionen realisiert werden. Möglich ist beispielsweise ein elektronisches Dimmen der Lichtquelle über eine Pulsweitenmodulation (PWM). In diesem Fall wird ein elektronisches Vorschaltgerät benötigt, welches im Scheinwerfer selbst integriert wird und ein gepulstes Signal erzeugt. Dieses Vorschaltgerät sendet Impulse mit voller Spannung, aber variabler Breite an den Strahler. Ein Rechtecksignal mit konstanter Frequenz wird also mit einem bestimmten Tastverhältnis moduliert (Bild 66). Auf diese Weise ändert sich der elektrische Strom und somit der Lichtstrom.

Die Anpassung des Lichtstroms über die pulswellenmodulierte Ansteuerung der Lichtquelle hat allerdings entscheidende Nachteile. Bei der Verwendung von Glühlampen kommt es durch das Dimmen zu einer Veränderung der Farbtemperatur der Lichtquelle. Das Farbspektrum verschiebt sich in

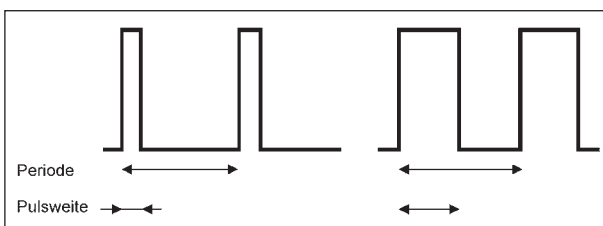


Bild 66: Zwei Rechtecksignale gleicher Periode und unterschiedlicher Pulsweite; Quelle: [IQ3]

den langwelligen Bereich. Das abgestrahlte Licht ist rötlicher. Allein bei der Verwendung von Gasentladungslampen und LEDs kann auch bei einer Veränderung des Lichtstroms eine quasikonstante Farbtemperatur gewährleistet werden. Darüber hinaus führt ein Dimmen von Glühlampen zu einer leichten Schwärzung des Kolbens, die allerdings bei Vollast wieder verschwindet.

Für Glühlampenscheinwerfer sollte ein elektronisches Dimmen aus den genannten Gründen nicht erfolgen. Für Gasentladungsscheinwerfer kann diese Methode bedingt eingesetzt werden. Zwar können Gasentladungslampen ohne wesentliche Farbverschiebung gedimmt werden, allerdings kommt es bei zu starkem Dimmen zu einem Zusammenbruch der Entladung. Aus diesem Grund kann die Lichtstärke eines Gasentladungsscheinwerfers nicht beliebig reduziert werden. Ob ein elektronisches Dimmen sinnvoll ist, hängt also primär vom Dimmfaktor ab und sollte fallspezifisch entschieden werden.

LEDs sind ohne Einschränkung elektronisch dimmbar. Die Farbtemperatur bleibt dabei nahezu konstant. Allerdings kann aufgrund der kurzen Ansprechzeiten von LEDs beim Dimmen mittels Pulsweitenmodulation der sog. Perlschnureffekt auftreten, der bereits von LED-Rückleuchten bekannt ist. Als Perlschnureffekt bezeichnet man das bei einer periodisch pulsierenden Lichtquelle sichtbare Flimmern, wenn sich diese in Relativbewegung zum Auge befindet. Durch die Relativbewegung erscheint die Lichtquelle als eine Aneinanderreihung von einzelnen hellen Flächenelementen, die einer Perlenkette gleichen [WER06] (Bild 67). Ein daraus resultierender nachteiliger Effekt auf Verkehrsteilnehmer ist bislang jedoch nicht nachgewiesen worden.



Bild 67: Perlschnureffekt bei einer LED-Rückleuchte; Quelle: [WER06]

Unabhängig von der Art der Lichtquelle tritt bei Verwendung einer gepulsten Ansteuerung ein essenzielles Problem auf. Durch die Variation des Stromes kommt es zur Entstehung eines elektromagnetischen Feldes, welches eine Störwirkung auf andere elektronische Geräte ausüben kann. Die Auftrittswahrscheinlichkeit einer Störung steigt mit der Frequenz des Ansteuersignals. Besonders betroffen sind Geräte, die der Funkkommunikation dienen, wie beispielsweise das Fahrzeugradio oder das Navigationssystem. Zur Gewährleistung einer elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist darauf zu achten, dass das für die Erzeugung des pulswertenmodulierten Signals notwendige elektronische Vorschaltgerät (EVG) in der Nähe des Scheinwerfers installiert wird, um lange Übertragungswege zu vermeiden. Aus diesem Grund sollte das Vorschaltgerät in der Regel im Scheinwerfer integriert sein. Ferner kann durch die Abschirmung der im Fahrzeug verwendeten Leitungen eine Störung verhindert werden. Hier ist insbesondere eine Kommunikation zwischen Fahrzeug- und Scheinwerferentwickler notwendig.

In Bezug auf die EMV und den Perlschnureffekt müssen weitere Betrachtungen durchgeführt werden. Da der Perlschnureffekt durch eine ausreichend hohe Frequenz vermieden werden kann, ergibt sich ein Konflikt mit der EMV-Problematik. Die einschlägigen Prüfvorschriften bewerten Frequenzanteile ab 150 kHz, d. h., die Beiträge durch Oberwellen müssen daher ab dieser Grenzfrequenz unterhalb der geforderten Schwelle liegen. Da der Perlschnureffekt oberhalb von 400 Hz merklich abnimmt, könnte das Problem durch geringere Flankensteilheiten des PWM-Signals gelöst werden. Jedoch erkaufte man sich diesen Vorteil durch eine höhere thermische Belastung der Schalttransistoren. Hierzu wären weitere Untersuchungen notwendig, um einen optimalen Kompromiss zwischen diesen gegenläufigen Störeffekten zu finden.

Eine Möglichkeit, die Lichtstärke eines Scheinwerfers auch mit einer quasikonstanten Farbtemperatur zu modulieren, bietet der Einsatz eines Neutraldichtefilters. Diese Filter sind neutralgrau eingefärbt und verfälschen die Farbwiedergabe nicht. Lediglich die Lichtdurchtrittsmenge wird verringert. Denkbar ist auch der Einsatz eines Drahtgewebefilters. Nach KETTWICH [KET06] führt der Einsatz eines solchen Filtertyps lediglich zu einer unwesentlichen Veränderung der Farbtemperatur. Nachteil eines Filtereinsatzes ist der zusätzlich notwendige Platzbedarf für den Filter und die zum Vorschalten

benötigten mechanischen Komponenten. Ferner ist der Wirkungsgrad aufgrund des Absorptionsprinzips relativ gering. Diese Möglichkeit könnte in erster Linie in Glühlampenscheinwerfern zum Einsatz kommen.

5.2.3 Dynamische Leuchtweitenregelung

Ziel einer dynamischen Leuchtweitenregelung ist der Ausgleich der durch die Fahrzeugdynamik und die Beladung verursachten Neigungswinkel des Fahrzeuges. Weiterhin soll die Reichweite des Scheinwerfers auch auf Kuppen und in Senken konstant gehalten werden.

Die ECE-Regelung 48 schreibt seit 1998 in Fahrzeugen mit Glühlampenscheinwerfern eine manuelle, in Fahrzeugen mit Gasentladungsscheinwerfern eine automatische quasistatische Leuchtweitenregelung vor. Diese durch die ECE vorgeschriebene Regulierung gleicht allerdings lediglich die unterschiedlichen Beladungszustände des Fahrzeuges aus. Der negative Neigungswinkel der Abblendlichtverteilung von $-0,57^\circ$ kann dabei ausschließlich größere negative Werte annehmen.

Die dynamische Leuchtweitenregelung ist nicht von der ECE vorgeschrieben, aber bereits in einigen Fahrzeugmodellen zu finden. Dieses System gleicht neben der durch die Beladung verursachten Neigung auch die fahrdynamischen Nickwinkel des Fahrzeuges aus. Der Neigungswinkel der Abblendlichtverteilung kann dabei auch einen geringeren negativen Wert annehmen, um beim Bremsen die Reichweite des Scheinwerfers konstant zu halten.

Die Eingangsgröße für die vertikale Korrektur des Lichtkegels ist demnach bei den aktuellen Systemen ausschließlich die Fahrzeugneigung bezogen zur Straßenebene. Eine Korrektur der Scheinwerferreichweite resultierend aus den Straßengegebenheiten, also Kuppen und Senken, sowie aus der Lage anderer Verkehrsteilnehmer erfolgt bislang nicht.

Sensorik und Aktorik

Bestehende Systeme ermitteln den Neigungswinkel der Karosserie mittels Achssensoren (Bild 68). Für eine automatische quasistatische Leuchtweitenregelung ist ein Hinterachssensor ausreichend, wenn der Lastangriffspunkt der Kofferraumbeladung nah an der Hinterachse des Fahrzeuges liegt. Für ein automatisches dynamisches System sind Sensoren an der Vorder- und Hinterachse notwen-

dig. Die Sensordaten werden im weiteren Verlauf beispielsweise an ein elektronisches Steuergerät übermittelt, welches die notwendige Korrektur der Scheinwerfermodule berechnet. Die vom Steuergerät ermittelte Korrektur wird an den Aktor weitergeleitet, welcher das gesamte Reflexions- bzw. Projektionsmodul vertikal schwenkt [IQ4]. Dieses Konzept hat sich bereits bewährt und wird für die aktuell erhältlichen quasistatischen und dynamischen Leuchtweitenregelungen verwendet.

An die Genauigkeit der Achssensoren werden besonders hohe Anforderungen gestellt. Ein Sensorfehler von 2 % kann bereits zu einer Veränderung der Scheinwerferreichweite von bis zu 6 m führen [IRL98]. Aus diesem Grund werden Sensoren mit einem Fehler von weniger als 1 % gefordert. Die Einhaltung dieser Genauigkeit muss auch im Dauerbetrieb gewährleistet werden. Dies ist besonders bei kontaktbehafteten Systemen aufgrund des Verschleißes durch die hohe Anzahl der Stellbewegungen problematisch. Daher wird die Verwendung eines kontaktlosen Achssensors empfohlen, wie der auf dem Induktionsprinzip basierende Sensor von IRLE [IRL98].

Die Daten des Sensorsystems können im weiteren Verlauf auf verschiedene Arten weiterverarbeitet werden. Zum einen können die Daten des vorderen sowie des hinteren Achssensors an ein externes Steuergerät übermittelt werden, welches eine Korrektur des Lichtkegels berechnet und weiterleitet. Eine einfachere Variante ist die Integration des Steuergerätes in den Sensor selbst. Auf diese Weise kann eine aufwändige Verkabelung mit den daraus resultierenden EMV-Problemen eingespart werden. Ferner bieten Fahrzeuge, die mit einem CAN-BUS ausgestattet sind eine weitere Möglichkeit. In diesem Fall können die Sensordaten direkt an den CAN-Bus gesendet und vom Scheinwerfer abgerufen werden.

Als Aktor kann für eine statische Leuchtweitenregelung ein elektrischer Stellmotor verwendet werden.

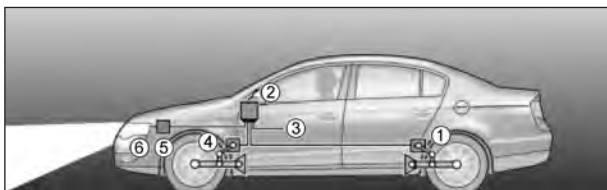


Bild 68: Prinzipdarstellungen der Steuerung einer automatischen Leuchtweitenregelung, Quelle: [IQ4]

1: Sensor, 2: Steuergerät, 3: Geschwindigkeitssignal, 4: Sensor, 5: Aktor, 6: Scheinwerfer

In Hinsicht auf die Geschwindigkeit werden in diesem Fall keine hohen Anforderungen gestellt, da die Einstellung vor Fahrtantritt stattfindet und konstant gehalten wird. Die Stellgeschwindigkeit eines solchen Systems beträgt ca. 0,6 mm/s.

Für eine dynamische Leuchtweitenregelung ist aufgrund seiner großen Dynamik und der hohen Genauigkeit ein Schrittmotor als Aktor besonders empfehlenswert. Eingangsgrößen dieses Schrittmotors sind der Auslenkwinkel sowie die Winkelgeschwindigkeit. So kann das Scheinwerfermodul mit einer definierten Geschwindigkeit in eine festgelegte Position schwenken. Die Kontrolle über die Geschwindigkeit der Einstellbewegung ist von großer Bedeutung, da das Scheinwerfermodul weder sprunghafte noch zu langsame Einstellbewegungen durchführen soll. Die Winkelgeschwindigkeit der Einstellbewegung soll im Idealfall der Geschwindigkeit der Kippbewegung entsprechen. So befindet sich die Hell-Dunkel-Grenze stets in einem konstanten Abstand vor dem Fahrzeug. Da die dynamischen Kippbewegungen meist einen schnellen Ausgleich fordern, können die Scheinwerfermodule üblicherweise mit einer Geschwindigkeit von bis zu 20 mm/s bewegt werden.

Betrachtet man ausschließlich die Korrektur des Nickwinkels des Fahrzeuges, so sind die maximal nötigen vertikalen Schwenkwinkel vom Fahrzeugtyp abhängig. Der maximale Schwenkwinkel eines Kleinbus-Scheinwerfers ist beispielsweise größer als der eines Sportwagens.

Mit der Forderung nach einer Leuchtweitenregelung, die sich der vertikalen Straßengeometrie anpasst, wird schnell deutlich, dass die derzeit verwendeten maximalen Modulschwenkwinkel nicht groß genug sind. Die Wannens- und Kuppenmindestradien nach der „Richtlinie für die Anlage von Straßen“ (RAS) bilden die Berechnungsgrundlage für die maximal nötigen Schwenkwinkel einer sich der Straßengeometrie anpassenden Leuchtweitenregelung. Der kleinste vom Gesetzgeber vorgegebene Wannensmindestradius beträgt 500 m. Daraus ergibt sich bei einem mittleren Fahrzeuggradstand näherungsweise ein Modulschwenkwinkel von $3,8^\circ$ nach oben. Im Fall einer Kuppe ist der Modulschwenkwinkel nach unten geringer, resultierend aus dem größeren Kuppenmindestradius von 1.400 m (nach RAS). Die dargestellten Maximalschwenkwinkel können die Grundlage für die technische Umsetzung neuer Scheinwerfersysteme darstellen.

Zur Detektion einer Kuppe bzw. Senke vor dem Fahrzeug ist ein vorausschauendes Sensorsystem nötig. Hier wäre der Einsatz einer Videokamera denkbar. Über eine Bildverarbeitung könnte die Hell-Dunkel-Grenze ferner der Lage vorausfahrender oder entgegenkommender Fahrzeuge angepasst werden. Ebenso können fahrdynamische Daten zur Ermittlung der vertikalen Straßengeometrie verwendet werden. KUHL beschreibt in seinem Patent [KUH04], wie aus fahrdynamischen Daten geschätzt werden kann, ob das Fahrzeug in eine Senke oder über eine Kuppe fährt.

Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit

Die Forderung nach einer adaptiven Leuchtweitenregelung, welche neben der Beladung auch die Fahrzeugdynamik, die vertikale Straßengeometrie und die Lage anderer Fahrzeuge berücksichtigt, ist ein besonders wichtiger Aspekt bei der Betrachtung adaptiver Scheinwerfersysteme. Zum einen kann die Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer verringert werden. Hier seien die permanente Blendung durch die Beladung des Fahrzeuges als auch die zeitlich begrenzte Blendung beim Beschleunigen oder beim Überfahren von Kuppen genannt. Daneben wird der Effekt des „Aufblitzens“ des Scheinwerfers beim kurzzeitigen Nicken des Fahrzeuges vermieden. Die dynamische Leuchtweitenregelung besitzt demnach primär ein hohes Potenzial, die Blendung entgegenkommender Fahrzeuge zu verringern.

Beim Bremsen und Durchfahren von Senken wird die Erkennbarkeit des Fahrzeugführers optimiert, indem die Reichweite des Scheinwerfers konstant gehalten wird. Dies ist vor allem im Fall einer Notbremsung mit hohen Nickwinkeln von Bedeutung, da die Gefahrensituation weiter-

hin vom Scheinwerfer ausgeleuchtet wird. Nur so kann der Fahrzeugführer eine korrekte Entscheidung treffen, ob ein Ausweichmanöver erforderlich ist. Auch in dieser Hinsicht kann eine Eingliederung dieser Systeme die Verkehrssicherheit erhöhen.

5.2.4 Dynamisches Kurvenlicht

Aus der Anpassung der Scheinwerfer an die horizontale Straßengeometrie resultiert die Notwendigkeit eines dynamischen Kurvenlichtes (Bild 69). Obwohl ein Regelwerk für Adaptive Frontbeleuchtungssysteme erst im Februar 2007 von der ECE verabschiedet wird, ist die Integration des dynamischen Kurvenlichtes im Kraftfahrzeug seit 2002 gesetzlich gestattet. Grund ist die von den AFS-Regelungen getrennte Behandlung dieser Scheinwerferfunktion.

Obwohl die Forderung nach einer dynamischen Leuchtweitenregelung und einem dynamischen Kurvenlicht aus verschiedenen Faktoren resultiert, ist die technische Realisierung ähnlich. Beide Funktionen werden über einen schwenkbaren Lichtkegel realisiert.

Ein aus der Automobilgeschichte bekanntes Beispiel für die Implementierung eines dynamischen Kurvenlichtes im Kraftfahrzeug stellt der Citroën DS dar. Diese ab den 60er Jahren produzierte Limousine besaß vier Frontscheinwerfer, von denen in der späteren Serienentwicklung zwei über einen Bowdenzug um die vertikale Achse geschwenkt werden konnten. Weniger bekannte Beispiele finden sich jedoch bereits in früheren Jahren. So besaß der in den USA produzierte Trucker Torpedo bereits in den 40er Jahren einen einzelnen schwenkbaren Mittelscheinwerfer.

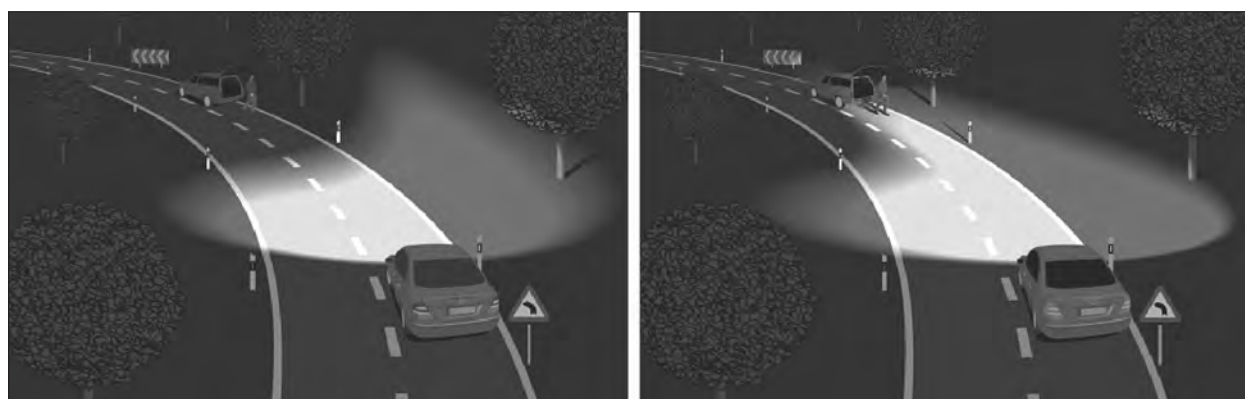


Bild 69: Anpassung des Scheinwerfers an die horizontale Straßengeometrie mit Hilfe des dynamische Kurvenlichtes; Quelle: [IQ5]

Konzepte

Derzeit erhältliche Scheinwerfer mit einer dynamischen Kurvenlichtfunktion nutzen in der Regel ein Projektionsmodul (Bild 70). Der Leuchtweitenregelung ähnlich wird das gesamte Modul geschwenkt, um den Lichtkegel dem Straßenverlauf anzupassen. Als Aktor wird ein Stellmotor benutzt. Je nach Scheinwerfertyp bestehen weitere Konzepte zur Realisierung eines dynamischen Kurvenlichtes, die sich jedoch nicht etablieren konnten. Von HOFFMANN [HOF03] beschäftigte sich mit den Anforderungen an adaptive Scheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen. Die im Folgenden dargestellten Fakten beziehen sich zum Teil auf seine Recherchen.

GOTOTH [GOT04] beschreibt einen horizontal geteilten Reflektor, dessen starre untere Hälfte die Hell-Dunkel-Grenze erzeugt und dessen obere Hälfte drehbar gelagert ist. Ein Einschwenken des Lichtkegels wird lediglich durch die obere Hälfte ermöglicht. Ähnliche Konzepte wurden von den Firmen ZKW und Koito vorgestellt. Bei diesen Designs kommt es zur Auslenkung eines Flächensegmentes des Reflektors und somit zu einer Ausleuchtung der Seitenbereiche. Ein weiteres Prinzip stellt das von WADA [WAD89] vorgestellte System dar, welches in einem starren Reflektor einen weiteren Subreflektor zum Schwenken der Lichtverteilung enthält.

Im Gegensatz zu den derzeit erhältlichen Systemen mit einem komplett schwenkbaren Modul kommt es bei den beschriebenen Konzepten stets zu einer Modulation der Lichtstärkeverteilung in Kurven. Das zur Verfügung stehende Licht wird demnach umverteilt und die Seitenbereiche werden stärker ausgeleuchtet. Die Hell-Dunkel-Grenze bleibt in einer konstanten Position. Das dynamische Kurvenlicht resultiert



Bild 70: Schwenkbare Projektionsmodul der Firma Hella KGaA Hueck & Co.; Quelle: [IQ2]

nicht nur aus der Forderung einer besseren Erkennbarkeitsentfernung für den Fahrzeugführer, sondern auch aus der Blendungsminimierung anderer Verkehrsteilnehmer. Eine in ihrer Position konstante Hell-Dunkel-Grenze kann in Rechtskurven die Blendung eines entgegenkommenden Fahrzeugs nicht verhindern. Somit können Systeme dieser Art die gestellten Anforderungen nicht komplett erfüllen.

Sämtliche vorgestellte Konzepte benötigen einen erhöhten Bauraum für die Bewegung des Scheinwerfermoduls. Mit dem Ziel, den Scheinwerfer kompakter zu gestalten, beschreibt von HOFFMANN [HOF03] zwei weitere Konzepte, die auf der Verwendung eines Projektionsmoduls basieren. Zum einen stellt die horizontale Bewegung der im Modul befindlichen Blende eine Möglichkeit dar, die Hell-Dunkel-Grenze zu verschieben. Andererseits können zwei zusätzliche Linsen eingesetzt werden. Durch ein horizontales Verschieben einer Konkavlinse in Verbindung mit einer Konvexlinse im Strahlengang kann das Maximum der Lichtverteilung in die Kurve verlagert werden. Auf diese Weise kann ein dynamisches Kurvenlicht auch ohne Schwenken des Moduls realisiert werden.

Schwenkwinkel

Zur technischen Umsetzung eines dynamischen Kurvenlichtes ist es zunächst erforderlich, die maximal notwendigen Auslenkwinkel des Lichtkegels zu definieren. Diese können aus den Empfehlungen für Kurvenradien aus der „Richtlinie für die Anlage von Straßen“ (RAS) abgeleitet werden. Von HOFFMANN [HOF03] beschreibt unter der Annahme eines konstanten Kurvenradius den Zusammenhang zwischen Kurvenradius, Anbauhöhe der Scheinwerfer und Schwenkwinkel wie folgt:

$$\alpha_{\max} = a \sin \left(\frac{h \cdot 100}{2 \cdot R} \right) \quad (2)$$

α_{\max} beschreibt den maximal nötigen Schwenkwinkel des Moduls aus gegebener Anbauhöhe h und gegebenem Kurvenradius R .

Bei einem kleinsten empfohlenen Kurvenradius von 80 m und einer durchschnittlichen Scheinwerferanbauhöhe von 0,65 m ergibt sich aus Gleichung (2) ein maximal notwendiger Schwenkwinkel des Lichtkegels von 24°. In Bezug auf die Häufigkeitsverteilung der Kurvenradien ist jedoch in den meisten Fällen ein Schwenkwinkel von unter 5° ausreichend (Bild 71). Aktuelle Systeme erreichen einen Winkel

von etwa 15° und ermöglichen somit eine Anpassung an Kurvenradien von bis zu 126 m. Aufgrund der Seltenheit kleinerer Kurvenradien sowie der geringeren Geschwindigkeit, mit der diese Kurven durchfahren werden, wird ein Maximalschwenkwinkel von 15° als ausreichend erachtet.

Sind die Schwenkwinkel beider Lichtkegel gleich, wird dies nach SCHWAB [SCHW03] als paralleles Schwenkprinzip (1 in Bild 72) bezeichnet. Beim divergenten Schwenkprinzip wird lediglich der innere Scheinwerfer in die Kurve geschwenkt (2 in Bild 72). Hier bleibt besonders in engen Kurven ein Teil des Lichtstroms vor dem Fahrzeug. Schwenkt der kurvenäußere Scheinwerfer mit einem kleineren Winkel als der kurveninnere Scheinwerfer (3 in Bild 72), so spricht man vom divergenten Schwenkprinzip, im entgegengesetzten Fall vom konvergenten Schwenkprinzip. Welches Methodik angewandt

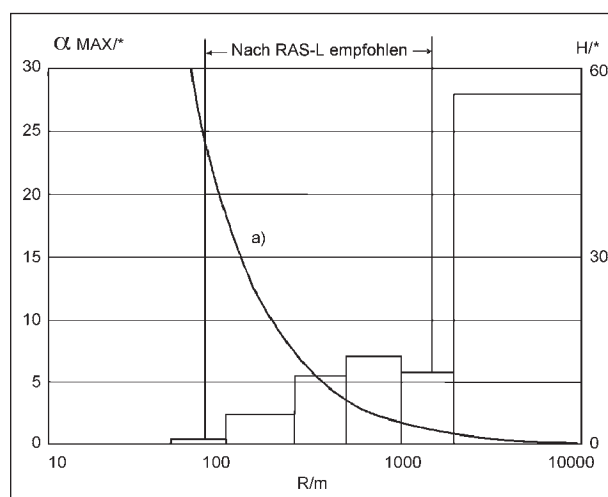


Bild 71: Häufigkeitsverteilung H der Kurvenradien auf Fernstraßen nach ELSNER [ELS90] und entsprechende maximale Schwenkwinkel α_{max} , a) maximaler Schwenkwinkel nach (2); Quelle: [HOF03]

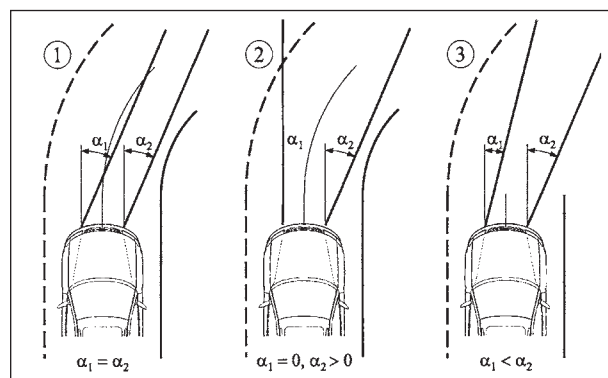


Bild 72: Schwenkstrategien verschiedener Kurvenlichtsysteme; Quelle: [SCHW03]
1: paralleles Schwenkprinzip, 2: einseitig divergentes Schwenkprinzip, 3: divergentes Schwenkprinzip

werden sollte, hängt nach von HOFFMANN [HOF03] von der Art der verwendeten Sensorik ab.

Sensorik

Die Sensorik dient zur Ermittlung des Kurvenradius und kann in eine prädiktive Steuerung und nicht prädiktive Steuerung unterteilt werden. Für die prädiktive Steuerung kommen eine oder mehrere Videokameras zum Einsatz, welche den Kurvenradius über die Fahrspurmarkierung bereits im Voraus detektieren. Die Reichweite dieser Videosensorik ist mit etwa 100 m ausreichend [BOS02]. Nicht prädiktive Sensoren ermitteln den Radius der Kurve aus den Daten der Fahrdynamik. Aufgrund der Wirtschaftlichkeit werden bislang nicht prädiktive Sensoren für die Realisierung eines Kurvenlichtes eingesetzt, da die Daten aus der Fahrdynamik in der Regel ohnehin im CAN-Bus für das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) bereitgestellt werden.

Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit

Unfallanalysen zeigen, dass der Anteil nächtlicher Verkehrsunfälle auf Landstraßen im Kurvenbereich signifikant größer ist als auf geraden Streckenabschnitten. Das Risiko, in einer Kurve zu verunglücken, ist je nach Zustand der Landstraße im Vergleich zur Geraden 1,4-2,6 mal größer [SCHW03].

Bei Tageslicht unterscheidet sich die Anteile der Unfälle in Rechts- sowie Linkskurven trotz gleicher Verteilung beider Kurvenrichtungen maßgeblich voneinander (Bild 73). Der Anteil der Unfälle in

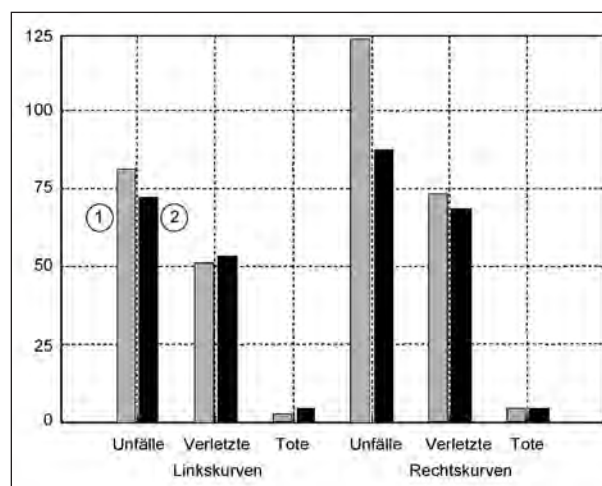


Bild 73: Unterschiede im Unfallgeschehen zwischen Links- und Rechtskurve bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen; Quelle: [SCHW03]
1: Unfallgeschehen bei Tag, 2: Unfallgeschehen bei Nacht

Rechtskurven ist wesentlich größer als in Linkskurven. Nachts kann keine nennenswerte Abhängigkeit der Unfallhäufigkeit von der Kurvenrichtung nachgewiesen werden. Die Verteilung zwischen Rechts- und Linkskurve ist in etwa gleich. Während am Tag also die geometrische Sichtweite für das Einschätzen der Kurvensituation verantwortlich ist, sind während einer Nachtfahrt die Lichtverteilung des Scheinwerfers sowie die Leistungsfähigkeit des visuellen Systems ausschlaggebend. Dementsprechend hoch ist das Sicherheitspotenzial eines dynamischen Kurvenlichtes [SCHW03].

Zahlreiche Studien haben den Sicherheitsgewinn im Straßenverkehr durch die Verwendung des dynamischen Kurvenlichtes bereits bestätigt. GOTOH [GOT04] konnte in einer Rechtskurve mit einem Radius von 50 m eine Erhöhung der Reichweite um 66 % bei annähernd konstanter psychologischer Blendung nachweisen. In Linkskurven nahm die psychologische Blendung geringfügig zu.

Untersuchungen von GRIMM bezüglich des Reichweitengewinns in Linkskurven ergaben ebenfalls sehr positive Ergebnisse. GRIMM simulierte weiterhin die Blendung des Gegenverkehrs. Demnach führt die Verwendung des dynamischen Kurvenlichtes zu einer verminderten Blendung in Rechtskurven sowie zu einer leichten Erhöhung der Blendung in Linkskurven.

SCHWAB [SCHW03] ermittelte den Reichweitengewinn des dynamischen Kurvenlichtes in Abhängigkeit der in Bild 72 dargestellten Schwenkstrategien im Vergleich zu konventionellen Systemen. Er konnte deutliche Reichweitengewinne in Rechts- sowie in Linkskurven nachweisen. Eine signifikante Abhängigkeit der Reichweite von den verschiedenen Schwenkstrategien während der Kurvenfahrt bestand lediglich in Linkskurven (Bild 74). Im Gegensatz dazu konnte bei der Kurvenausfahrt besonders in Rechtskurven eine Abhängigkeit nachgewiesen werden. Die besten Ergebnisse wurden in der Summe von der einseitigen Schwenkstrategie erreicht.

EWERHARDT untersuchte den Reichweitengewinn eines dynamischen Kurvenlichtes mit prädiktiver und nicht prädiktiver Steuerung gegenüber einem traditionellen System ohne Kurvenlichtfunktion. Als Ergebnis dieser Untersuchung führte die Verwendung einer prädiktiven Ansteuerung zu einem höheren Reichweitengewinn in Kurven als das nicht prädiktive System. Im Kurvenausgang unterschieden sich die beiden Systeme kaum hinsichtlich der

Reichweite. Lediglich bei der Blendung konnte in dieser Situation ein geringfügiger Vorteil der videobasierten Ansteuerung nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse können durch eine Studie von HAMM und ROSENHAHN gestützt werden. Dieser Untersuchung nach konnte im Kurveneingang einer Linkskurve ein höherer Reichweitengewinn mit videobasierter Ansteuerung nachgewiesen werden. Im Kurvenverlauf sowie im Kurvenausgang ergab die videobasierte Ansteuerung keine wesentlichen Vorteile gegenüber der fahrdynamischen Ansteuerung. Von HOFFMANN [HOF03] bestätigt diese Ergebnisse mit Hilfe einer Simulation. Er analysierte die Fahrt durch eine Linkskurve mit einem prädiktiven und nicht prädiktiven Kurvenlicht sowie mit einem konventionellen System. Während sich die Reichweite des konventionellen Scheinwerfers vor der Kurve von 71 m auf bis zu 36 m verringerte, wurde mit Hilfe des prädiktiven Kurvenlichtes der Reichweiteverlust minimiert. In der Kurve zeigten auch die Ergebnisse dieser Studie keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Varianten der Sensorik.

Zusammenfassend konnten Studien sowohl ein erhöhtes nächtlichen Unfallrisiko in Kurven nachweisen als auch einen deutlichen Reichweitengewinn bei Verwendung des dynamischen Kurvenlichtes. Die Blendung entgegenkommender Fahrzeuge wird dabei in Rechtskurven reduziert und in Linkskurven in geringem Maß erhöht. Daraus resultiert

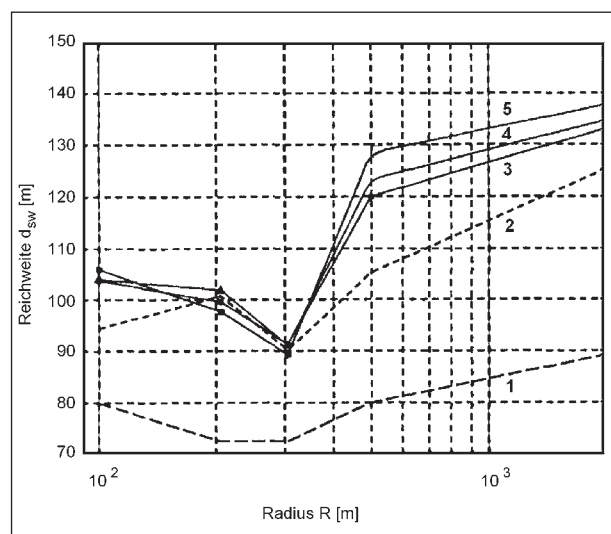


Bild 74: Reichweite entlang der rechten Fahrspurmarkierung in Linkskurven in Abhängigkeit des Kurvenradius und des Schwenkprinzips; Quelle: [SCHW03]
 1: konventioneller Glühlampenscheinwerfer, 2: konventioneller Gasentladungsscheinwerfer, 3: divergentes Schwenkprinzip, 4: einseitig divergentes Schwenkprinzip, 5: paralleles Schwenkprinzip

ein sehr hohes Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Diese Fakten sprechen für eine Implementierung des dynamischen Kurvenlichtes in jedes Serienfahrzeug.

5.2.5 Statisches Kurvenlicht/Abbiegelicht

Für besonders enge Kurven, wie Serpentinien oder Kreuzungen, kann ein statisches Kurvenlicht oder Abbiegelicht die Sicht im direkten Seitenbereich verbessern (Bild 75). Im entsprechenden Fall wird ein zusätzliches Modul additiv zur vorhandenen Lichtverteilung zugeschaltet. Im Gegensatz zum dynamischen Kurvenlicht kommt es hier zu einer Veränderung der Lichtstärke des Scheinwerfers.

Die Idee für ein zuschaltbares Lichtmodul entstand bereits Ende der 60er Jahre und wurde in den letzten Jahrzehnten häufig diskutiert. Bereits etabliert hat sich das Abbiegelicht, welches eine Ausleuchtung des Seitenbereiches von 30° bis 60° gewährleistet [IQ4]. Dadurch könnte besonders der Schutz von Fußgängern und Fahrradfahrern erhöht werden. Zurzeit kommt es in mehreren Serienfahrzeugen zur Anwendung. Hier werden verschiedene Konzepte realisiert. Der Fahrzeughersteller Audi bietet unter anderem im Oberklassemodell A8 ein gegen Aufpreis erhältliches Abbiegelicht an, welches im Hauptscheinwerfer selbst integriert ist. Hierbei kommt eine seitlich ausgerichtete Reflexionsoptik mit Glühlampe zum Einsatz. Ein anderes Konzept wird vom Fahrzeughersteller Mercedes-Benz umgesetzt. Da das statische Abbiegelicht durch die breite Lichtverteilung mit kurzer Reichweite Ähnlichkeit mit der Lichtverteilung eines Nebelscheinwerfers besitzt, wird in Kurven entsprechend der rechte oder linke Nebelscheinwerfer zugeschaltet.

Da die flache Lichtverteilung keine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer hervorruft, wäre es sogar denkbar, Nebelscheinwerfer in Verbindung mit dem Hauptscheinwerfer permanent zu aktivieren. In diesem Zusammenhang ist es zweckmäßig, den Einfluss des geänderten Signalbildes auf die Verkehrssicherheit zu untersuchen.

Aktiviert wird das Abbiegelicht über den Lenkwinkel oder den Blinklichtgeber. Für den höheren Komfort des Fahrzeugführers wird es auf- bzw. abgedimmt.

Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit

Vorwiegend kommt das statische Kurvenlicht bzw. das Abbiegelicht in engen Kurven oder Kreuzungen innerhalb geschlossener Ortschaften zum Einsatz. Die gefahrenen Geschwindigkeiten sind vergleichsweise gering. Der Sicherheitsvorteil ergibt sich folglich nicht in erster Linie für den Fahrzeugführer, sondern vor allem für nicht beleuchtete Fußgänger und Radfahrer, welche beim Abbiegen leicht übersehen werden können.

5.2.6 Pixellicht

Die wohl höchstdynamische Variante des AFS-Scheinwerfers stellt das Pixellicht dar. Bei diesem Konzept wird die Lichtverteilung aus der Summe einzeln beleuchteter Flächenelemente geringer Ausdehnung erzeugt. Somit ist sie relativ frei konfigurierbar. Ein solches System bietet weitreichende Möglichkeiten zur Modulierung der Hell-Dunkel-Grenze oder der Lichtverteilung sowie zur Realisierung eines Kurven- bzw. Abbiegelichtes. Zur technischen Umsetzung eines solchen Scheinwerfertyps sind folgende Konzepte denkbar.

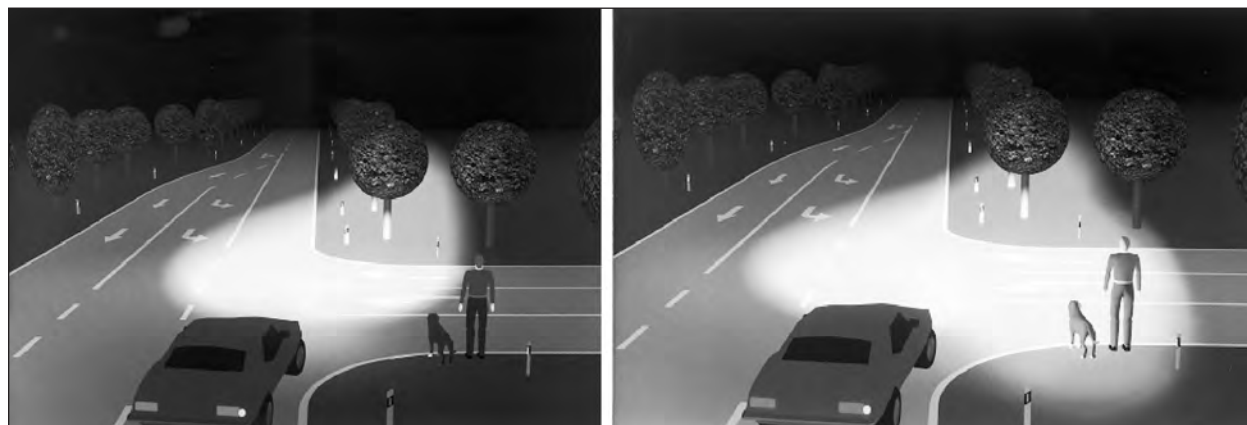


Bild 75: Anpassung des Scheinwerfers an kleine Kurvenradien mit Hilfe des statischen Kurvenlichtes, Quelle: [IQ5]

Spiegelarray-Scheinwerfer

Zum einen kann ein Array aus einer Vielzahl einzeln ansteuerbarer Spiegel genutzt werden. Ein solches DMD³¹-Array besteht aus bis zu 1.024x768 Mikrospeiegeln, die auf einer CMOS-Speicherzelle angebracht sind. Die einzeln adressierbaren Spiegel können mit Hilfe einer Kippbewegung zwei Orientierungen annehmen. Je nach Richtung des Spiegels wird das Licht einer Gasentladungslampe entweder in eine Lichtfalle oder durch eine Projektionsoptik auf die Straße gelenkt (Bild 76). Aus der Kombination aus hellen und dunklen Bildpunkten resultiert die Lichtverteilung. Die hohe Anzahl der Spiegel ermöglicht einen sehr hohen Freiheitsgrad bei der Gestaltung.

Bei einer ausreichend hoher Kippgeschwindigkeit der Spiegel lassen sich über das Verhältnis der beiden Stellungen auch Graustufen darstellen. Auf diese Weise kann das Licht in bestimmten Bereichen auch gedimmt werden. So könnte beispielsweise für eine Schlechtwetterlichtverteilung das Licht im Bereich des Vorfeldes gedimmt werden. Bei dieser Modulation der Leuchtdichte auf der Fahrbahn bleibt die Farbtemperatur der Lichtquelle konstant und es entsteht kein störender Perlschnureffekt (vgl. Kapitel 5.2.2).

Die hohe Auflösung des Spiegelarray-Scheinwerfers erlaubt ferner die Projektion von Informationen auf die Fahrbahn, wie beispielsweise die aktuell erlaubte Höchstgeschwindigkeit (Bild 77), Warnungen oder Navigationspfeile. Dadurch könnte der Fahrzeugführer seine Aufmerksamkeit stets auf die Fahrbahn richten. Fraglich ist jedoch, ob eine solche Projektion fahrzeugspezifischer Informationen in den allgemeinen Verkehrsraum zu einer Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmer führt. Des Weiteren wirkt sich die Abhängigkeit des Kontrastes der Abbildung von den auf der Fahrbahn vorhandenen und nicht vom eigenen Scheinwerfer erzeugten Leuchtdichten nachteilig aus. So wäre die Information auf einer durch die Straßenbeleuchtung oder den Gegenverkehr beleuchteten Fahrbahn schlecht zu erkennen. Die Verwendung eines Head-Up-Displays bietet hier ähnliche Vorteile und wäre mit einem konstanteren Kontrast nur für den Fahrzeugführer einsehbar.

Konzeptbedingt ist der Wirkungsgrad des Spiegelarray-Scheinwerfers relativ gering, da die Lichtverteilung durch das Ausblenden bestimmter Lichtan-

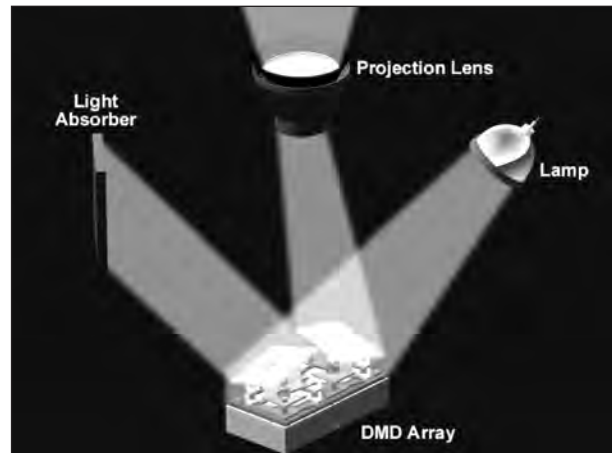


Bild 76: Prinzipdarstellung eines Digital Micromirror Device (DMD-Array); Quelle: [DUD06]



Bild 77: Pixellicht: Die Darstellung der aktuell erlaubten Höchstgeschwindigkeit ist möglich; Quelle: [KAU04]

teile erzeugt wird. Weiterhin verringern die bauartbedingten Zwischenräume des DMD den reflektierten Anteil des von der Lichtquelle emittierten Lichtes. Die Lampe muss somit einen wesentlich höheren Lichtstrom erzeugen als genutzt wird.

LED-Array-Scheinwerfer

Eine andere Realisierungsmöglichkeit bietet die Verwendung eines Arrays aus einer Vielzahl von LEDs. Entgegen dem Spiegelarray-Scheinwerfer besitzt ein solches System keine beweglichen Elemente zur Lichtumlenkung. Für jedes zu beleuchtende Flächenelement wird eine LED aktiviert. Das emittierte Licht wird im weiteren Verlauf über eine Optik auf die Straße projiziert [GRI05, MOI05] (Bild 78).

Eine Modulation des Lichtstroms einzelner LEDs bietet die Möglichkeit, die Leuchtdichte beliebiger Bereiche wahlweise zu verringern, um so beispielsweise ein Schlechtwetterlicht zu erzeugen. Der Vorteil dieses Systems ist neben der hohen Flexibilität der Lichtverteilung die Langlebigkeit der Leuchtdioden und der geringe Bauraumanspruch gegenüber einem DMD-Array. Darüber hinaus ergibt sich aus dem additiven Funktionsprinzip ein hoher Wirkungsgrad, der durch die Verwen-

³¹ Digital Micromirror Device

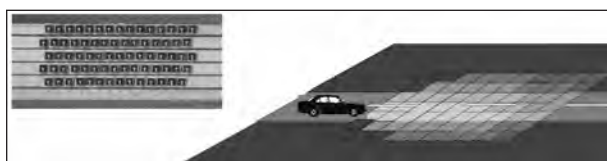


Bild 78: Links: LED-Array als Lichtquelle, rechts: Projektion des Arrays auf die Straße (Prinzipdarstellung); Quelle: [GRI05]

dung einer Optik pro LED weiterhin begünstigt wird.

Nachteilig wirkt sich jedoch die geringere Auflösung des projizierten Bildes aus. Eine Informationsdarstellung ist aufgrund dessen nicht möglich. Ferner muss die Abfuhr der durch die LEDs erzeugten Wärme gewährleistet werden, da sowohl der Lichtstrom als auch die Lebensdauer mit steigender Temperatur sinken. Je nach Leistung der LEDs kann eine Aktivkühlung in Betracht gezogen werden. Ebenfalls nachteilig ist der durch die zu erwartende Ansteuerung der LED mittels Pulsweitenmodulation bedingte Perlschnureffekt.

Leuchtdiodenhersteller befürchten außerdem Probleme bei der Ersatzteilversorgung für die Lichtquellen von LED-Scheinwerfern. Bei der Entwicklung der Lichtausbeute von Leuchtdioden werden ähnliche Fortschritte wie in der Computerhalbleiter-Industrie erwartet. Insofern ist es fraglich, inwieweit ein Produkt zehn Jahre nach seiner Herstellung reproduziert werden kann.

Markierungslicht/Blendfreies Fernlicht

Durch das Pixellicht wird eine optimale Anpassung des Scheinwerfers an wechselnde Bedingungen ermöglicht. Annähernd jede denkbare Funktion kann realisiert werden. Die Besonderheit stellt hier die Verwendung eines Einzelmoduls dar, welches sämtliche Aufgaben erfüllt. Eine Kombination aus mehreren platzaufwändigen Modulen, wie beispielsweise ein Abbiegelicht oder Tagesfahrlicht, ist unnötig. Des Weiteren werden keine weiteren mechatronischen Komponenten benötigt. Somit ist ein solches Konzept gegenüber den traditionellen Systemen potenziell kostengünstiger produzierbar.

Von besonderem Interesse ist die Umsetzung einer Markierungslichtfunktion bei Verwendung des Pixellichtes [EICH05]. Diese ermöglicht eine gezielte Beleuchtung einzelner Details im Verkehrsraum, auch wenn diese noch nicht durch das Abblendlicht beleuchtet werden. So wird die Aufmerksamkeit des Fahrers gezielt auf potenzielle Gefahrenquel-

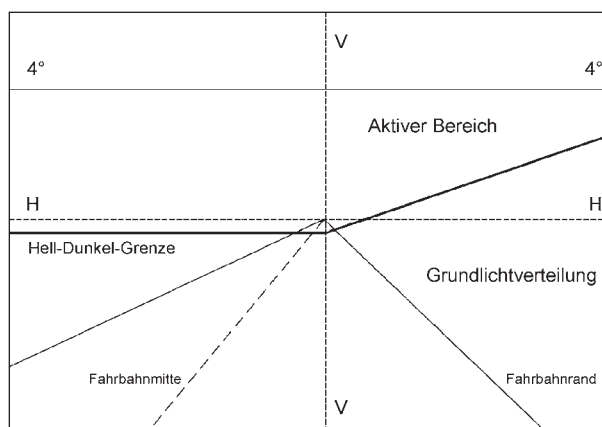


Bild 79: Schematische Darstellung des aktiven Bereiches und der Grundlichtverteilung eines blendfreien Fernlichtes auf einem Messschirm nach ECE

len gelenkt. Da der Blick des Fahrers in der Regel auf die Fahrbahnmitte gerichtet ist, könnten besonders Objekte im peripheren Gesichtsfeld eher erkannt werden. Eine weitere Funktion des Markierungslichtes ist die Verfolgung bewegter Objekte. Erste Versuche mit Prototypen haben bereits einen Zugewinn der für den Fahrer bereitgestellten Informationen bestätigt.

Das blendfreie Fernlicht lenkt das Licht lediglich in die Bereiche des Verkehrsraumes, in denen sich keine anderen Verkehrsteilnehmer befinden. Auf diese Weise kann eine Blendung weitestgehend vermindert werden. So kann zum Beispiel der Bereich des Gegenverkehrs oder des vorausfahrenden Fahrzeuges bei Bedarf ausgeblendet werden. Denkbar wäre ein aktiver Bereich oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze, während eine Grundlichtverteilung ähnlich dem Abblendlicht unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze generiert wird. Untersuchungen zufolge kann der aktive Bereich oberhalb der Horizontalen auf einen Winkel von 4° begrenzt werden. Ein System dieser Art wurde bereits unter realen Bedingungen mit guten Ergebnissen getestet. Untersucht wurde die am Auge des Fahrers gemessene Beleuchtungsstärke. Beim blendfreien Fernlicht lagen die Beleuchtungsstärken unterhalb der für die Abblendlichtverteilung zulässigen Werte. Die guten subjektiven Beurteilungen bestätigen weiterhin die Vorteile dieses Konzeptes [EICH05].

Da der Grundgedanke des Fernlichtes die Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung darstellt, wurde auch dieser Punkt untersucht. Es hat sich gezeigt, dass auch in dieser Hinsicht eine wesentliche Verbesserung erreicht werden kann.

Sensorik

Für die Umsetzung eines Markierungslichtes oder eines blendfreien Fernlichtes ist eine Sensorik notwendig, welche die Daten des Verkehrsraumes aufnehmen und verarbeiten kann. Da ein Sicherheitsgewinn nur erreicht werden kann, wenn Objekte bereits in einer großen Entfernung detektiert werden können, muss die Sensorik ebenfalls eine große Reichweite haben. Hier bietet sich die Verwendung eines Kamera- oder Lidarsystems an.

Neben der reinen Detektion ist eine schnelle Datenverarbeitung notwendig, um dem Fahrzeugführer die Information möglichst schnell bereitzustellen. Je nach Konzept muss das System bei der Datenverarbeitung erkennen, welche Objekte gezielt angestrahlt bzw. ausgeblendet werden sollen.

Potenzial für die Steigerung der Sicherheit

Die Funktionen des Pixellichtes sind weitreichend. Durch die Möglichkeit zur optimalen Anpassung des Scheinwerfers an viele denkbare Einflüsse ist in der Summe das Potenzial zur Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr sehr hoch. Besonders das Markierungslicht und das blendfreie Fernlicht sind hier als sehr sinnvoll einzuschätzen.

Beide Konzepte sind in der Lage, Gefahrenquellen eher zu beleuchten als traditionelle Systeme, während eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer vermieden wird. Nach EICHHORN [EIC05] ist es bei einer durchschnittlichen Reaktionszeit und einer mittleren Verzögerung des Fahrzeuges von $5,8 \text{ m/s}^2$ ab einer Geschwindigkeit von 90 km/h nicht mehr möglich, innerhalb der Reichweite des Abblendlichtes zum Stillstand zu kommen. Ein Markierungslicht mit einer Sensorreichweite von 180 m und einer Datenverarbeitungszeit von 400 ms könnte Objekte bereits in einer Entfernung von 170 m vor dem Fahrzeug ausleuchten. Daraus ergibt sich eine um $3,4 \text{ s}$ verlängerte Zeitspanne für die Reaktion. Aufgrund dieses wesentlichen Zeitgewinns könnte ein Großteil der durch unzureichende Beleuchtung verursachten Unfälle vermieden werden. Durch die Markierungsfunktion könnte besonders der Schutz von Fußgängern erhöht werden. Statistiken zufolge ereignen sich 60% aller tödlich verlaufenden Unfälle

mit Fußgängern bei Nacht, da die Erkennbarkeitsentfernung in diesem Fall je nach Scheinwerfer nur etwa 30 bis 58 m beträgt [DIT03].

Ein blendfreies Fernlicht könnte des Weiteren den sehr geringen Anteil der Fernlichtfahrten von derzeit nur etwa 5% erhöhen. Ein Umschalten auf eine Abblendlichtverteilung wäre nur noch in geschlossenen Ortschaften notwendig. Die Erkennbarkeitsentfernung könnte durch eine permanente Verwendung des Fernlichtes deutlich erhöht werden.

Im Vergleich des Markierungslichtes mit dem blendfreien Fernlicht werden die Vor- und Nachteile beider Konzepte deutlich. Das Markierungslicht bietet die Möglichkeit, durch die direkte Beleuchtung der Gefahrenquelle die Aufmerksamkeit des Fahrers auf dieses Objekt zu richten. Fraglich ist, ob dies zu einer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führt. Beim blendfreien Fernlicht wird die Blendung zwar weitestgehend verhindert, jedoch könnten dadurch Gefahrenquellen wie Radfahrer oder Fußgänger übersehen werden.

5.3 Nachtsichtsysteme

Aus der Notwendigkeit, trotz großer Scheinwerferreichweiten eine Blendung des Gegenverkehrs zu vermeiden, entstand die Idee, polarisiertes Licht zur Ausleuchtung des Verkehrsraumes einzusetzen. In diesem Fall generiert der Scheinwerfer linear polarisiertes Licht, während die Windschutzscheibe einen quer zur Polarisationsrichtung angeordneten Polarisationsfilter enthält. Auf diese Weise ist das direkt von den Scheinwerfern ausgestrahlte Licht nicht für die Fahrzeuginsassen sichtbar. Der reflektierte Anteil ändert seine Polarisationsrichtung und passiert den Filter, wodurch angeleuchtete Objekte sichtbar werden. In einer weiterentwickelten Form könnten sich entgegenkommende Fahrzeuge Licht unterschiedlicher Polarisationsrichtung verwenden. Zur Fahrtrichtungsbestimmung könnten GPS³²-Daten des Navigationssystems verwendet werden. Diese Konzepte wurden jedoch aufgrund des schlechten Wirkungsgrades und der schwierigen Umsetzung nie verwirklicht.

Aktuelle Überlegungen ziehen den Einsatz von Nachtsichtsystemen vor. Diese bieten bei gleichen Vorteilen einen wesentlich geringeren Aufwand zur Integration in den Straßenverkehr. Grundidee dieses Konzeptes ist die Verwendung von IR-Strahlung³³, welche vom visuellen System des Menschen praktisch nicht wahrgenommen werden kann

³² GPS: Global Positioning System

³³ IR-Strahlung: Infrarot-Strahlung, teilweise auch als Ur-Strahlung (Ultrarot-Strahlung) oder Wärmestrahlung bezeichnet, $780 \text{ nm} < \lambda < 1 \text{ mm}$

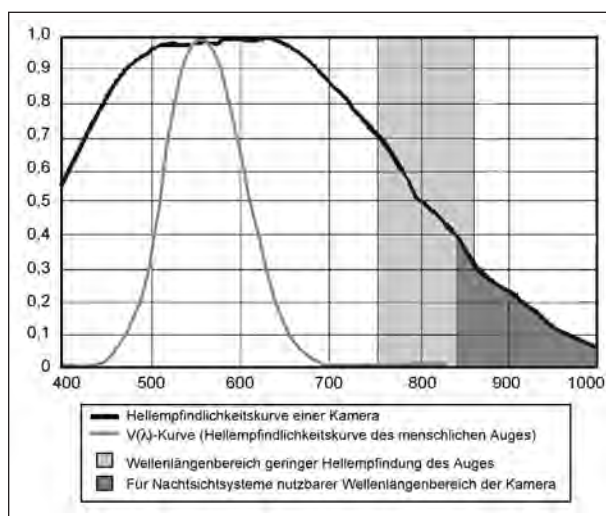


Bild 80: Spektrale Empfindlichkeit eines CCD-Bildsensors im Vergleich zur spektralen Hellempfindlichkeitskurve des visuellen Systems des Menschen; Quelle: [LAC05]

und somit keine Blendwirkung verursacht. Dadurch kann eine permanente fernlichtähnliche Lichtverteilung genutzt werden. Kameras besitzen im Gegensatz zum visuellen System eine hohe Empfindlichkeit im IR-Bereich. Der Unterschied zwischen den Empfindlichkeitsbereichen bildet die Basis für die Funktion des Nachtsichtsystems (Bild 80). Um die Informationen dem Fahrzeugführer zur Verfügung zu stellen, wird ein Wiedergabemedium, wie beispielsweise ein Head-up-Display (HUD) oder Head-down-Display (HDD), verwendet.

Die IR-Strahlung wird in mehrere Bereiche unterteilt. Man unterscheidet zwischen naher, mittlerer und ferner IR-Strahlung. Die nahe IR-Strahlung besteht aus dem IR-A-Gebiet ($0,76 \mu\text{m} < \lambda < 1,4 \mu\text{m}$), sowie dem IR-B-Gebiet ($1,4 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$). Die mittlere IR-Strahlung wird als IR-C-Gebiet ($3,0 \mu\text{m} < \lambda < 25 \mu\text{m}$) bezeichnet, an welches sich direkt die ferne Infrarotstrahlung anschließt [MUET72]. Je nachdem, ob es sich um ein passives oder aktives Nachtsichtsystem handelt, wird Strahlung sowohl im nahen als auch im fernen IR-Bereich verwendet. Beide Systeme bieten Vor- und Nachteile und werden im Folgenden erläutert.

Aktives Nachtsichtsystem

Beim aktiven Nachtsichtsystem emittiert ein Scheinwerfer IR-Strahlung, welche von Objekten im Verkehrsraum reflektiert und von einem Bildsensor detektiert wird. Erzeugt wird ein Bild auf einem Wiedergabemedium im Fahrzeuginnenraum. Für die Ausleuchtung des Verkehrsraumes eignet sich insbesondere Strahlung im nahen IR-Bereich mit

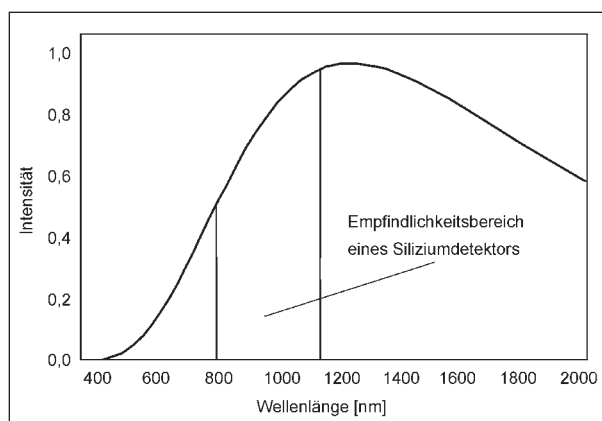


Bild 81: Beispiel eines Emissionsspektrums einer Glühlampe

einer Wellenlänge von 780 nm bis 1.000 nm. Zur Erzeugung dieser Strahlung kommen verschiedene Emitter in Frage. Genutzt werden können neben den traditionellen Lichtquellen wie Glühlampen und Gasentladungslampen auch Leuchtdioden.

Die Emissionskurve einer typischen Halogenlampe zeigt, dass etwa 1/3 der Gesamtenergie im Wellenlängenbereich von 780 nm bis 1.100 nm³⁴ abgegeben wird (Bild 81). Die Strahlungsleistung ist in etwa 1,3-mal höher als im sichtbaren Bereich [EICH01]. Bei einer Lampe vom Typ H 7 entspricht dies 20 % der Gesamtleistung. Somit ist die Glühlampe zur Erzeugung von IR-Strahlung besonders geeignet. Um den IR-Anteil der Strahlung vom sichtbaren Teil zu trennen, werden Absorptionsfilter eingesetzt.

Das Emissionsspektrum einer Gasentladungslampe besteht aus einem kontinuierlichen und diskontinuierlichen Anteil. Bei einer Wellenlänge von etwa 830 nm zeigt es eine ausgeprägte Spektrallinie. Nur 15 % der Gesamtenergie wird im IR-Bereich abgegeben. Aus diesem Grund werden höhere Anforderungen an die Empfindlichkeit des Bildsensors gestellt. Zur Trennung der IR-Strahlung vom sichtbaren Teil ist ebenfalls der Einsatz eines Filters notwendig.

IR-LEDs emittieren den gesamten Teil ihrer Strahlung im IR-Bereich. Dadurch ist ein zusätzlicher Absorptionsfilter nicht mehr nötig. Weitere Vorteile bietet der bei dieser Lichtquelle einfach zu realisierende Impulsbetrieb, mit dem die Leistung der LEDs im Vergleich zum Dauerstrichbetrieb erheblich erhöht werden kann. Dadurch lässt sich die Anzahl der

³⁴ Empfindlichkeitsbereich eines Silizium-Detektors

LEDs deutlich verringern. Ebenfalls für einen gepulsten Betrieb sprechen die Vorgaben für den Augenschutz. Da die IR-Strahlung nicht sichtbar ist, wird auch bei einer hohen ins Auge eintretenden Strahlungsleistung kein Lidschlussreflex ausgelöst. Da im Pulsbetrieb die mittlere Ausgangsleistung sinkt, können die Vorschriften zum Schutz der Augen eingehalten werden.

Der IR-Scheinwerfer sollte im Idealfall den Verkehrsraum vor dem Fahrzeug möglichst weit ausleuchten. Folglich muss die Strahlungsverteilung eine fernlichtähnliche Charakteristik besitzen. Ein Projektionsmodul kann als Basis für einen IR-Scheinwerfer genutzt werden. In diesem Fall wird die Blende, welche den Bereich oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze abschattet, durch einen Absorptionsfilter ersetzt. Dadurch wird für den sichtbaren Teil der Strahlung eine Hell-Dunkel-Grenze erzeugt, während die IR-Strahlung mit der Fernlichtverteilung abgestrahlt wird. Ein Kippen des Filters sorgt wie bei einem bi-funktionalen Gasentladungsscheinwerfer³⁵ für die Umschaltung vom Abblend- auf das Fernlicht [EICH99]. Als Lichtquelle kann in diesem Fall eine Glüh- bzw. Gasentladungslampe verwendet werden. Wie bereits beschrieben eignen sich Glühlampen aufgrund des hohen Anteils an Wärmestrahlung eher als IR-Strahlungsquelle für ein Nachtsichtsystem. Betrachtet man jedoch den sichtbaren Teil der Strahlung, ist die Gasentladungslampe zu bevorzugen (vgl. Kapitel 4.8.1). Demnach stellt die Kombination beider Funktionen in einem Modul nicht eine optimale, aber preiswerte Möglichkeit dar.

Die Verwendung eines weiteren separaten IR-Scheinwerfermoduls besitzt zwar aus wirtschaftlicher Sicht Nachteile, stellt jedoch aus lichttechni-



Bild 82: Infrarot-Zusatzscheinwerfer für ein Nachtsichtsystem; Quelle: ADILIS

schen und physiologischen Gesichtspunkten die optimale Lösung dar (Bild 82). Als Lichtquelle könnten in diesem Fall auch IR-LEDs verwendet werden.

Passives Nachtsichtsystem

Die Entwicklungsarbeiten für ein passives Nachtsichtsystem im Automobilbereich begannen in den 90er Jahren. Zu einem Serieneinsatz kam diese Technik erstmals 1999 im Modell DeVille des Fahrzeugherstellers Cadillac [DIT03]. Heute bieten viele Hersteller diese Systeme meist in Fahrzeugen der Oberklasse gegen Aufpreis an.

Das passive Nachtsichtsystem wird auch als Wärmebildkamera bezeichnet. Im Gegensatz zum aktiven System wird vom Fahrzeug keine IR-Strahlung emittiert. Genutzt wird ausschließlich die von warmen Objekten abgestrahlte FIR-Strahlung. Das Hindernis ist erkennbar, wenn sich seine Temperatur deutlich von der Umgebungstemperatur unterscheidet. Die Aufnahme wird als Thermografiebild dargestellt, d. h., warme Objekte werden hell dargestellt, während kalte Objekte nicht abgebildet werden. Dadurch können beispielsweise Personen oder Fahrzeuge im Betrieb detektiert werden. Moderne Systeme verschieben den Bildausschnitt bei Kurvenfahrten in die entsprechende Fahrtrichtung, sodass dem Fahrzeugführer auch Informationen aus den Seitenbereichen zur Verfügung gestellt werden.

Die Wärmebildkamera ist in der Lage, Strahlung im Bereich von 7,5 μm bis 14 μm aufzunehmen. Die größeren Wellenlängen ermöglichen besonders bei Dunst höhere Erkennbarkeitsentfernungen im Vergleich zum aktiven System. Ebenfalls positiv wirkt sich aus, dass die Strahlung nur die einfache Entfernung zwischen Objekt und Fahrzeug durchlaufen muss.

Aktive und passive Systeme im Vergleich

Im direkten Vergleich des aktiven mit dem passiven Nachtsichtsystem werden Vor- und Nachteile beider Konzepte deutlich. Beim aktiven System kann in erster Linie der hohe Informationsanteil für den Fahrzeugführer positiv hervorgehoben werden. Neben Fußgängern oder laufenden Fahrzeugen

³⁵ Wird auch als Bi-Xenon-Scheinwerfer bezeichnet

werden auch Objekte detektiert, deren Temperatur der des Umfeldes entspricht. Im Weiteren ermöglicht die Verwendung einer mit relativ geringen Kosten verbundenen Silizium-CMOS-Kamera durch ihre hohe Auflösung eine gute Bildqualität. Nachteilig ist jedoch der höhere Energiebedarf der Infrarotscheinwerfer, insbesondere bei Verwendung von Glühlampen zur Erzeugung der IR-Strahlung. Die durch diese zusätzliche Lichtquelle emittierte Strahlung könnte ferner zu einer potenziellen Augengefährdung führen. Die Abhängigkeit der dargestellten Information von der Ausleuchtung der Fahrbahn durch den IR-Scheinwerfer verursacht weitere Nachteile in Kurvenfahrten und bei Nebel.

Das passive Nachtsichtsystem zeichnet sich aufgrund der hohen Wellenlänge der FIR-Strahlung durch besonders hohe Reichweiten aus. Es besitzt einen geringeren Energieverbrauch und verursacht keine potenziellen Augenschäden. Nachteilig wirken sich die höheren Kosten der Kamera sowie ihre geringere Auflösung aus. Durch den ungewohnten Bildeindruck für den Fahrzeugführer und den geringeren Informationsgehalt des Bildes entstehen weitere Nachteile.

Aus den aufgeführten Vor- und Nachteilen wird deutlich, dass kein System eindeutig bevorzugt werden kann. Vielmehr scheint eine von den Umgebungsbedingungen abhängige Verwendung sinnvoll. Dies würde für eine Integration beider Varianten im Kraftfahrzeug sprechen. Durch die damit verbundenen hohen Kosten ist eine Realisierung dieser Variante jedoch vorerst nicht zu erwarten.

Sensorik

Für den Bildsensor eignen sich Siliziumdetektoren, wie sie in CCD³⁶- oder CMOS³⁷-Kameras verwendet werden. Der CCD-Sensor arbeitet ähnlich einem analogen Schieberegister. Die Ladungsinhalte werden nach dem Eimerkettensystem weitergegeben. Er besteht aus einer Matrix lichtempfindlicher Zellen. Die auf die Sensorfläche auftreffenden Lichtteilchen geben ihre Energie aufgrund des inneren photoelektrischen Effektes an die Elektronen im CCD-Halbleiter ab. Diese angeregten Elek-

tronen werden während der Belichtung im CCD-Pixel gesammelt. Es kommt zur Ansammlung elektrischer Ladung (engl.: charge). Nach der Belichtung werden die Ladungen ähnlich einer Eimerkette schrittweise zum Rand der Sensorfläche und von dort zum Ausleseverstärker verschoben, der eine der Ladungsmenge entsprechende Spannung erzeugt (Bild 83). Wenn durch Überbelichtung in einzelnen Pixeln mehr Ladung erzeugt wird als gespeichert werden kann, läuft die Ladung in benachbarte Pixel über. Dieser Effekt wird als „Blooming“ bezeichnet (Bild 84). Problematisch kann sich diese Eigenschaft bei einer Blendung durch andere Lichtquellen im Verkehrsraum auswirken.

Der CMOS-Sensor unterscheidet sich vom CCD-Sensor, indem zu jeder lichtempfindlichen Fozelle auch die Elektronik zur Verstärkung und Umwandlung der Ladung in eine Spannung integriert ist (Bild 83). Bildverarbeitende Schaltungen können mit Ladungen nicht arbeiten, da diese zu leicht verloren gehen³⁸. Deshalb stellen alle Bildaufnahme-

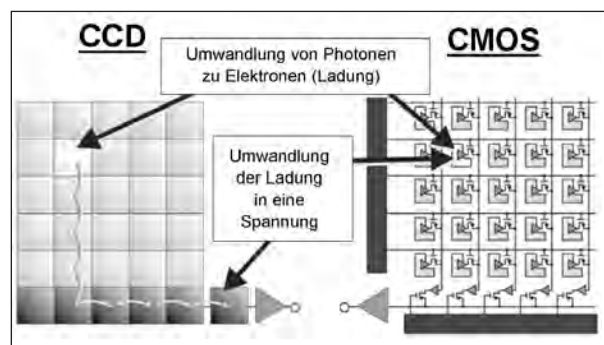


Bild 83: CCD-Sensoren schieben die in der Fozelle erzeugte Ladung zeilen- und spaltenweise von Pixel zu Pixel und wandeln diese in einem nachgeschalteten Bauteil in eine Spannung. CMOS-Sensoren wandeln die Ladung im Pixel in eine Spannung um; Quelle: [IQ6]

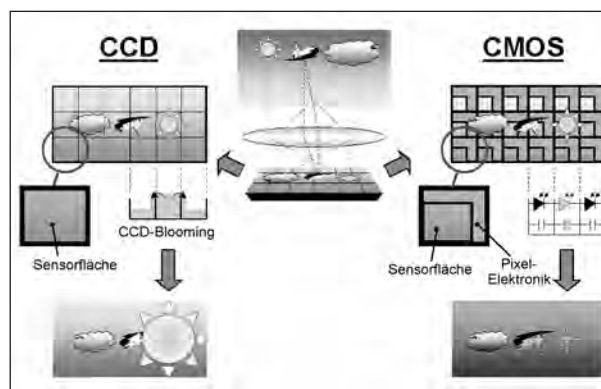


Bild 84: CCD-Sensoren besitzen eine größere lichtempfindliche Sensorfläche als CMOS-Sensoren. Die Pixel-Elektronik eines CMOS-Sensors verhindert das Überlaufen von Ladung von einem zum benachbarten Pixel (Blooming); Quelle: [LAC05]

³⁶ CCD: Charge-coupled Device

³⁷ CMOS: Complementary Metall Oxide Semi Conductor

³⁸ Ursache hierfür sind so genannte Leck- oder Kriechströme, d. h. Ströme, die über einen Pfad fließen, welcher nicht zur Leitung vorgesehen ist.

sensoren an ihrem Ausgang die Bilddaten in Form von Spannungsverläufen dar. Der Vorteil der CMOS-Technologie ist, dass der Blooming-Effekt vermieden werden kann, indem die Ladung jeder einzelnen Fotozelle abgenommen werden kann, sobald eine bestimmte Ladung vorhanden ist. Dadurch können sehr dunkle Objekte neben hellen Objekten aufgenommen werden, ohne dass die Kamera geblendet wird. Dies ist besonders bei Vorhandensein von Fremdlichtquellen im Straßenverkehr von Vorteil. Nachteil dieser Technologie ist jedoch, dass die lichtempfindliche Sensorfläche kleiner ist als beim CCD-Sensor, da die Elektronik auch auf dem Sensor-Chip untergebracht werden muss. Die Empfindlichkeit des CMOS-Sensors ist daher etwa um den Faktor 10 geringer.

Als Anbauort für eine CCD- oder CMOS-Kamera ist der Fahrzeuginnenraum ungeeignet. Grund hierfür ist die in vielen Fahrzeugmodellen eingesetzte Wärmeschutzverglasung, welche einen geringeren Transmissionsgrad für IR-Strahlung aufweist. Empfehlenswert ist eine Installation im Frontbereich des Fahrzeuges.

Display

Den Ergebnissen einer Studie zufolge wird das Display eines Nachtsichtsystems besonders häufig fixiert (interne Mitteilung). Um große Blickbewegungen zwischen dem Verkehrsraum und dem Display zu vermeiden, ist es zweckmäßig, dem Fahrzeugführer die Informationen auf einem Head-up-Display zur Verfügung zu stellen (vgl. 4.8.2).

Ein Head-up-Display besteht im einfachsten Fall aus drei Komponenten. Eine Optik erzeugt aus dem reellen Bild eines Displays ein virtuelles Bild, welches durch einen Combiner vom Fahrer einsehbar ist. Als Erzeuger des reellen Bildes dient beispielsweise ein LCD-Display, als Combiner die Windschutzscheibe des Fahrzeugs selbst (Bild 85). Je nach der Größe des zur Verfügung stehenden Bau- raumes können zur Erzeugung des virtuellen Bildes Linsensysteme, Spiegel oder Fresnel-Linse³⁹ eingesetzt werden.

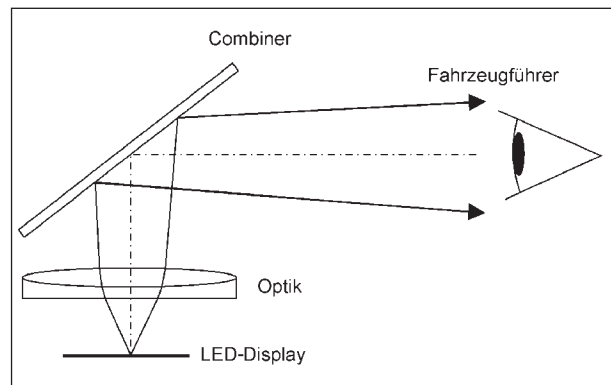


Bild 85: Prinzipieller Aufbau eines Head-up-Displays

Die Entfernung des virtuellen Bildes kann entsprechend dem Verwendungszweck angepasst werden. Aus optometrischer Sicht empfiehlt sich eine Bildlage im Unendlichen, da eine Akkommodation des Fahrzeugführers in diesem Fall nicht notwendig ist. Dieses Konzept hat sich im Flugzeug bereits seit Jahrzehnten etabliert, jedoch gilt es zu bedenken, dass der Raum vor einem Flugzeug stets leer ist. Aufgrund der insbesondere im Stadtverkehr auftretenden geringen Abstände der Kraftfahrzeuge zueinander empfiehlt sich eine virtuelle Bildlage innerhalb der Fahrzeuglänge. Auf diese Weise kommt es nicht zu scheinbaren Kollisionen des Bildes mit vorausfahrenden Fahrzeugen. So werden unnötige instinktiv ausgelöste Bremsvorgänge vermieden.

Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit

Das Nachtsichtsystem bietet die Möglichkeit, dem Fahrer trotz schwieriger Sichtverhältnisse die zum Führen des Fahrzeuges notwendigen Informationen auf einem Display bereitzustellen. Hier seien vor allem nicht beleuchtete Objekte wie beispielsweise Fußgänger genannt. Somit kann durch eine Eingliederung dieser Systeme in jedes Kraftfahrzeug die Sicherheit besonders für diese Verkehrsteilnehmer erhöht werden. Eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer tritt nicht auf.

Beachtet werden muss allerdings eine Abhängigkeit dieses Potenzials von der Art des verwendeten Displays. Aufgrund der nachgewiesenen häufigen Fixation des Displays wird der höchste Sicherheitsgewinn durch die Verwendung eines Head-up-Displays erreicht. Head-down-Displays besitzen bedingt durch die häufige Blickzuwendung ein entsprechend geringeres Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit.

³⁹ Fresnel-Linse: Linsentyp nach J. A. FRESNEL; der zentrale Teil der Optik besitzt die Form einer dünnen konventionellen sphärischen bzw. asphärischen Zone; die Randbereiche bestehen aus ringförmigen Zonen, welche den zentralen Bereich umgeben und deren Brennpunkt bei annähernd gleicher Dicke dem Brennpunkt des zentralen Teils entspricht. Vorteil dieser Optik ist der geringere Platzbedarf.

5.4 Tagesfahrlicht

Das Tagesfahrlicht dient der Erhöhung der Erkennbarkeit der Fahrzeuge am Tag. Zur technischen Realisierung dieser Lichtfunktion existieren zurzeit fünf international diskutierte technische Varianten. Man unterscheidet zwischen konventionellem Abblendlicht, gedimmtem Fernlicht, Nebelscheinwerfern, Begrenzungsleuchten⁴⁰ und Tagfahrleuchten. Neben den lichttechnischen Eigenschaften werden insbesondere hohe Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit gestellt. Hier sind die Kosten für das System selbst sowie die Betriebskosten ausschlaggebend. Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile dieser Möglichkeiten im Einzelnen diskutiert.

Abblendlicht

Die Verwendung des Abblendlichtes als Tagesfahrlicht ist in Hinsicht auf Kosten des Scheinwerfers positiv hervorzuheben, da bereits in jedem Scheinwerfer ein Abblendlichtmodul integriert ist. Ferner wird kein zusätzlicher Bauraum benötigt.

Nachteilig wirken sich jedoch die hohe Leistungsaufnahme des Scheinwerfers und der damit verbundene erhöhte Kraftstoffverbrauch aus. Die Leistung einer H4-Glühlampe beträgt für das Abblendlicht 55 W. In Verbindung mit den Rückleuchten, der Armaturenbeleuchtung sowie der Kennzeichenbeleuchtung ergibt sich für einen Pkw ein Gesamtenergiebedarf von 140 W. Der daraus resultierende Kraftstoffmehrverbrauch beträgt in etwa 0,21 l für einen Pkw mit Ottomotor und 0,14 l für einen Pkw mit Dieselmotor. Beim Lkw beträgt der zusätzliche Energiebedarf aufgrund der höheren Anzahl der Leuchten bereits 210 W. Der zusätzliche Kraftstoffverbrauch wird mit ca. 0,21 l Diesel beziffert.

Der konventionelle Abblendlichtscheinwerfer generiert hohe Lichtstärken und dient in erster Linie zur Ausleuchtung der Fahrbahn und des Fahrbahnrandes. Aufgrund dieser Anforderung besitzt er eine asymmetrische Hell-Dunkel-Grenze, welche die Blendung des Gegenverkehrs vermindert (vgl. 5.1). Es werden somit nur geringe Lichtstärken in Richtung des entgegenkommenden Fahrzeuges abgestrahlt. Demnach wird nur ein geringer Anteil des Lichtstromes von etwa 10 % für die Erkennbarkeit des eigenen Fahrzeuges genutzt.

Aus den genannten Fakten wird deutlich, dass aus lichttechnischer und wirtschaftlicher Sicht eine Verwendung der Abblendlichtscheinwerfer für die Realisierung eines Tagesfahrlichtes lediglich als mäßig geeignet einzuschätzen ist.

Gedimmtes Fernlicht

Die Abstrahlcharakteristik des Fernlichtscheinwerfers unterscheidet sich maßgeblich von der des Abblendlichtscheinwerfers. Die Ausbreitungsrichtung der deutlich schmaleren Lichtverteilung ist horizontal, um möglichst hohe Reichweiten zu erzeugen. Somit wird ein wesentlich größerer Anteil des erzeugten Lichtstromes in Richtung des Gegenverkehrs emittiert. Somit entspricht die Lichtverteilung im Wesentlichen den Anforderungen eines Tagesfahrlichtes.

Im Normalbetrieb werden axiale Lichtstärken von etwa $1 \cdot 10^5$ cd erzeugt. Dies entspricht einer Leuchtdichte von $5 \cdot 10^6$ cd/m². Dadurch würde auch am Tag eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer verursacht werden. Ein Dimmen des Scheinwerfers ist somit zwangsläufig notwendig. Laut der BAST sind Lichtstärken von etwa $1 \cdot 10^3$ cd als sinnvoll einzuschätzen.

Ein Dimmen des Scheinwerfers kann abhängig von der Art der verwendeten Lichtquelle mit verschiedenen technischen Möglichkeiten realisiert werden (vgl. Kapitel 5.2.2). Aufgrund der starken Reduzierung des Lichtstroms kann jedoch weder durch die Verwendung eines Neutraldichtefilters noch durch die Verringerung der Betriebsspannung ein aus technischer und wirtschaftlicher Sicht zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden.

Ferner können bei einer Reduzierung des Scheinwerferlichtstroms die Mindestbeleuchtungsstärken nach der ECE-Regelung 112 nicht mehr eingehalten werden. Der Scheinwerfer wäre somit nicht mehr genehmigungskonform. Zudem funktioniert bei Verwendung von Halogenlampen aufgrund des hohen Dimmungsfaktors von ca. 100 der Halogenkreisprozess nicht mehr, d. h., die Lampe würde stark schwärzen.

Die Kosten bei Verwendung des Fernlichtscheinwerfers für ein Tagesfahrlicht entsprechen in etwa den Kosten bei Verwendung des Abblendlichtscheinwerfers. Unterschiede resultieren lediglich aus der Methode zum Dimmen des Scheinwerfers.

⁴⁰ Begrenzungsleuchten werden auch als Standlicht bezeichnet.

Die Verwendung eines gedimmten Fernlichtes für die Umsetzung eines Tagesfahrlichtes wird aus den dargestellten Fakten als ungeeignet eingeschätzt.

Nebelscheinwerfer

Nebelscheinwerfer besitzen eine relativ breite Lichtverteilung. Auf diese Weise werden insbesondere die Seitenbereiche der Fahrbahn ausgeleuchtet, um die Linienführung bei Nebel zu erleichtern. Darüber hinaus verringern die geringe Anbauhöhe und die kurze Reichweite die Reflexion des ausgestrahlten Lichtes und somit eine Blendung des Fahrzeugführers durch die eigenen Scheinwerfer. Aus diesem Grund muss zudem der direkte Lichtanteil oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze möglichst gering sein. Somit sind die in Richtung des Gegenverkehrs abgestrahlten Lichtstärken relativ niedrig. Die Charakteristik eines Nebelscheinwerfers unterscheidet sich damit essenziell von den geforderten Eigenschaften eines Tagesfahrlichtes. Die alleinige Verwendung von Nebelscheinwerfern als Tagesfahrlicht ist aufgrund der niedrigen Lichtstärken in Richtung der üblichen Beobachter nicht ziel führend.

Die Leistungsaufnahme der Nebelscheinwerfer liegt in Kombination mit den Rückleuchten, der Kennzeichenbeleuchtung, der Armaturenbeleuchtung und den Abblendlichtscheinwerfern bei 250 W. Daher entspricht die Verwendung des Nebelscheinwerfers für die Realisierung eines Tagesfahrlichtes auch aus wirtschaftlicher Sicht nicht den Anforderungen.

Auch in Bezug auf die deutsche Straßenverkehrsordnung und das Wiener Weltabkommen von 1968 sind Nebelscheinwerfer für die allgemeine Nutzung als Tagesfahrlicht ungeeignet.

Begrenzungsleuchten

Begrenzungsleuchten dienen der Sichtbarkeit des Fahrzeuges bei Dunkelheit. Ihre Leistungsaufnahme in Kombination mit den Schlussleuchten, der Armaturenbeleuchtung und der Kennzeichenbeleuchtung beträgt in der Summe 60 W. Der dafür benötigte Kraftstoffmehrverbrauch ist somit wesentlich geringer als im Fall der vorhergehend diskutierten Möglichkeiten.

Zwar ist die Verwendung einer Begrenzungsleuchte für den diskutierten Zweck aus wirtschaftlicher Sicht positiv einzuschätzen, jedoch werden aus

lichttechnischer Sicht die Anforderungen an ein Tagesfahrlicht nicht erfüllt. Der festgelegte Lichtstärkebereich liegt zwischen 4 cd und 100 cd, womit die erzeugten Leuchtdichten vergleichsweise niedrig sind. Im Fall von am Tag vorliegenden hohen Umfeldleuchtdichten ist die Signalwirkung zu gering, um eine ausreichende Sichtbarkeit des Fahrzeuges zu gewährleisten.

Des Weiteren steht die alleinige Verwendung von Begrenzungsleuchten für die Funktion des Tagesfahrlichtes im Widerspruch zur deutschen Straßenverkehrsordnung und dem Wiener Weltabkommen von 1968. Die Begrenzungsleuchten sind daher für eine Tagesfahrlichtfunktion nicht geeignet.

Die Diskussion der bisher dargestellten international diskutierten Möglichkeiten zur Umsetzung einer Tagesfahrlichtfunktion belegt, dass aufgrund der individuellen Anforderung an ein Tagesfahrlicht eine (modifizierte) Verwendung der genannten Standardsysteme im Fahrzeug nicht oder nur bedingt geeignet ist. Eine aus wirtschaftlicher und lichttechnischer Sicht zufrieden stellende Lösung kann demzufolge nur mit einer eigens für diese Funktion entwickelten Tagfahrleuchte erreicht werden.

Tagfahrleuchten

Laut ECE-Regelung 87 ist eine Tagfahrleuchte eine nach vorn gerichtete Leuchte, die dazu benutzt wird, das Fahrzeug leichter erkennbar zu machen, wenn es bei Tageslicht fährt.

Die Lichtverteilung einer Tagfahrleuchte dient in erster Linie der Erkennbarkeit des Fahrzeuges. In Bezugsachse beträgt die Lichtstärke jeder Leuchte mindestens 400 cd. Damit sind auch am Tag ein ausreichender Kontrast und somit eine gute Erkennbarkeit gewährleistet. Die Lichtstärke darf in keiner Richtung 1.200 cd überschreiten. Das Mindestmaß der leuchtenden Fläche beträgt 25 cm² und darf maximal 200 cm² erreichen.

Die Leistungsaufnahme einer Tagfahrleuchte mit Glühlampentechnik beträgt 15-21 W. Da keine weiteren Beleuchtungseinrichtungen aktiv sind, ergibt sich ein Gesamtenergieverbrauch von lediglich 30-42 W. Der aus diesem zusätzlichen Leistungsbedarf entstehende Mehrverbrauch beträgt bei einem Pkw mit Ottomotor 0,052 l und bei einem Pkw mit Dieselmotor bzw. einem Lkw 0,036 l Kraftstoff.

Die Verwendung von LEDs als Lichtquelle für eine Tagfahrleuchte lässt sich bereits heute realisieren

und bietet weitere Vorteile in Hinsicht auf die Wirtschaftlichkeit. Mit einer Leistungsaufnahme von etwa 1 W und bei einer Verwendung von 5-7 LEDs ergibt sich ein Gesamtenergieverbrauch von 10-14 W. Der erhöhte Kraftstoffverbrauch beträgt in diesem Fall für einen Pkw mit Ottomotor 0,021 l und für einen Pkw mit Dieselmotor oder Lkw 0,014 l.

Zurzeit ist der Anteil der Tagfahrleuchten im Straßenverkehr noch sehr gering. Meist sind diese Systeme in Fahrzeugen der Oberklasse integriert. Für eine Nachrüstung würden Gesamtkosten⁴¹ in Höhe von etwa 230-260 € pro Fahrzeug entstehen.

Sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus lichttechnischer Sicht können die Anforderungen an eine Tagesfahrlichtfunktion optimal mit Tagfahrleuchten erfüllt werden. Für die technische Realisierung empfiehlt sich der Einsatz von LEDs, da bereits mit einer Leistung von 5 W eine Lichtstärke von etwa 550 cd erreicht werden kann. Aufgrund der zu erwartenden Entwicklung können die Leistungsaufnahme und die damit verbundenen Kosten sowie die Schadstoffemission zukünftig weiter reduziert werden. Die lange Lebensdauer der Dioden ermöglicht ferner wartungsfreie Leuchten.

Hinsichtlich der viel diskutierten Raumnot im Frontbereich lässt sich der Platzbedarf der Tagfahrleuchte durch die Kombination oder den Zusammenbau mit anderen Funktionen optimieren. Bei Einsatz von LEDs als Lichtquellen bietet sich die Kombination mit der Begrenzungsleuchte an, bei Verwendung der neuen Zweifadenlampe H 15 kann die Tagfahrleuchte mit dem Fernlicht oder dem Nebelscheinwerfer zusammengebaut werden. Denkbar wäre auch ein Zusammenbau mit dem Fahrtrichtungsanzeiger unter der Bedingung, dass die Tagfahrleuchte für die Dauer des Betriebes des Fahrtrichtungsanzeigers abgeschaltet wird.

Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit

Vor der Verarbeitung der visuellen Information und der Reaktion durch den Fahrzeugführer muss ein Objekt zunächst entdeckt werden (Bild 86). Ein wichtiger Parameter für die Zeit bis zur Entdeckung ist der Kontrast. Die Verwendung eines geeigneten

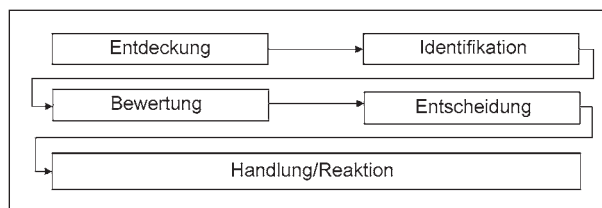


Bild 86: Stufen der Informationsverarbeitung

Tagesfahrlichtes ermöglicht eine Erhöhung des Kontrastes besonders bei geringen Umfeldleuchtdichten. Auf diese Weise kann die Entdeckungszeit verringert und die Sicherheit im Straßenverkehr erhöht werden.

Die Peripherie der Netzhaut ist aufgrund der Verteilung der Rezeptoren besonders empfindlich für Hell-Dunkel-Kontraste. Ein Tagesfahrlicht besitzt daher den größten Einfluss auf die Entdeckungszeit, wenn sich das entsprechend beleuchtete Objekt in der Peripherie des Gesichtsfeldes des Fahrzeugführers befindet. Daher ist besonders in Kreuzungsbereichen oder bei Überholvorgängen das Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit sehr hoch.

Homogene Strukturen lassen sich leichter bestimmten Klassen zuordnen als inhomogene Strukturen. Daher kann neben der Verkürzung der Entdeckungszeit eine Implementierung eines Tagesfahrlichtes in jedes Fahrzeug aufgrund des dadurch entstehenden charakteristischen Merkmals auch die Identifikationszeit verringern. Ebenfalls einfacher ist die Unterscheidung zwischen parkenden und fahrenden Fahrzeugen.

Eine Erhöhung der Unfallgefahr durch eine mögliche Blendung der Tagfahrleuchten besteht aus Sicht der BASt nicht, solange diese nur am Tage betrieben werden. Ursache hierfür ist die Adaptation des visuellen Systems auf die hohen Umfeldleuchtdichten. Bei geringen Umfeldleuchtdichten, also in der Dämmerung oder während der Nacht, ist die Blendwirkung einer identischen Lichtquelle größer als am Tag. Um dennoch bei geringen Umfeldleuchtdichten keine Blendung hervorzurufen, werden Tagfahrleuchten beim Einschalten des Abblend- bzw. Fernlichtes deaktiviert. In diesem Zusammenhang empfiehlt sich die Verwendung eines Dämmerungslichtschalters, der bei einer definierten Umfeldleuchtdichte von der Tagfahrleuchte auf den Hauptscheinwerfer umschaltet. Somit kann eine Blendung stets vermieden und ein hohes Niveau an Sicherheit gewährleistet werden.

In Hinsicht auf das Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit muss der Novelty-Effekt⁴² in Be-

⁴¹ Inklusiv Einbau durch eine Fachwerkstatt

⁴² Der Novelty-Effekt bezeichnet die Veränderung des Verhaltens einer Person, wenn diese einer veränderten Situation gegenübersteht.

tracht gezogen werden. Möglicherweise neigen Kraftfahrer zu riskanteren Fahrmanövern, wenn diese wissen, dass ihr Fahrzeug am Tag besser sichtbar ist. Eine ungarische Studie konnte jedoch diesen nachteiligen Effekt nicht nachweisen [HOL06].

In Zukunft wird der derzeit noch sehr geringe Anteil der Tagfahrleuchten im Straßenverkehr ansteigen. Mit der Durchmischung von beleuchteten und unbeleuchteten Fahrzeugen entsteht ein Problem. Je höher der Anteil an Fahrzeugen mit Tagfahrleuchten ist, desto geringer ist die Erwartung eines unbeleuchteten Fahrzeuges. Möglicherweise könnte es häufig zu einem Übersehen der unbeleuchteten Fahrzeuge kommen. Zur Vermeidung dieses Risikos ist eine Ausarbeitung entsprechende Regelwerke notwendig. Beispielsweise könnte in einer Übergangsphase für Fahrzeuge mit nicht integrierten Tagfahrleuchten eine Pflicht für das Fahren mit eingeschaltetem Abblendlicht eingeführt werden.

Weiterhin zu betrachten ist der potenziell entstehende Nachteil für motorisierte Zweiräder bei einer Integration des Tagesfahrlichtes in jedes Fahrzeug. Hier gilt es, das derzeit vorgeschriebene Fahren mit Abblendlicht am Tag durch eine andere Signalisierungsart zu ersetzen, um eine Fahrzeugidentifikation zu erleichtern. Denkbar wäre die Verwendung zweier übereinander angeordneter Leuchten.

Die Implementierung einer Tagesfahrlichtfunktion in jedes Fahrzeug kann aufgrund der genannten Vorteile empfohlen werden. Hierbei gilt es, eine mögliche Benachteiligung zweirädriger Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Quantitativ kann die Senkung der Unfallzahlen in Deutschland im Fall einer Einführung mit etwa 3 % angegeben werden.

6 ECE-Regelungen

Für die Zulassung und den Betrieb eines Kraftfahrzeugs in der Europäischen Union muss eine EU-Typgenehmigung vorliegen. Zur Erlangung dieser Genehmigung müssen alle sicherheitsrelevanten Teile des Kraftfahrzeugs, dazu gehören auch die lichttechnischen Einrichtungen, nach einer EU-Direktive oder einer ECE-Regelung genehmigt werden. Die zuständige genehmigende Behörde in Deutschland ist das Kraftfahrtbundesamt (KBA) in Flensburg, die Begutachtung wird durch die zuständigen technischen Dienste vorgenommen.

6.1 Entstehung einer ECE-Regelung

Die Weiterentwicklung bzw. der Entstehungsprozess einer ECE-Regelung bei der Einführung einer neuen Technologie in die automobile Lichttechnik kann zum Beispiel wie folgt aussehen:

- Einbringung eines Regel- bzw. Änderungsvorschlags in den Fachnormenausschuss für Kraftfahrzeugtechnik (FAKRA),
- Weiterleitung an die GTB,
- Beratung innerhalb der GTB-Sitzungen mit Anhörung der beteiligten Gruppen,
- Weiterleitung des von der GTB für gut befundenen Entwurfs an die GRE. Alternativ leitet ein Verkehrsministerium einen Entwurf an die GRE weiter,
- Zustimmung in der GRE,
- Zustimmung in der WP 29,
- nach Annahme im Verwaltungsausschuss (AC1) (Zustimmung mit Zweidrittelmehrheit) erfolgt die Übermittlung an den Generalsekretär der UN,
- der UN-Generalsekretär übermittelt den Regelungsentwurf den Vertragsparteien,
- die Regelung ist angenommen, sofern nicht innerhalb von 6 Monaten mehr als ein Drittel der Vertragsparteien dem UN-Generalsekretär mitteilen, dass sie nicht zustimmen.

Das in Kraftsetzen einer ECE-Regelung bedarf intensiver und sensibler Diskussion und Koordination aller nationalen und verbandsspezifischen Interessen. Die Durchschnittszeit zur Überarbeitung einer bestehenden Regelung beträgt drei bis sieben Jahre. Die Entwicklungszeit einer neuen Regelung beansprucht ca. zehn Jahre.

6.2 Notwendige Anpassung für neue Scheinwerfertechnologien

Einige der in diesem Projekt genannten Systeme haben zum Zeitpunkt der Drucklegung bereits Einzug in die ECE-Regelungen gefunden, andere sind momentan in der Diskussion in den entsprechenden internationalen Ausschüssen.

AFS-Scheinwerfer, welche ein Kurvenlicht, ein Stadtlicht, ein Autobahnlicht und ein Schlechtwet-

terlicht beinhalten, können bereits mit der ECE-R 123 genehmigt werden. Die Anforderungen an LED-Scheinwerfer stehen ebenfalls nahezu fest. Die Erweiterungen der ECE-Regelung 112 sind von der GRE zwischenzeitlich akzeptiert worden. Damit ist zu erwarten, dass die ECE-R 112 in naher Zukunft auch auf Scheinwerfer mit LEDs angewendet werden kann.

Es gibt jedoch unter der Vielzahl der vorgestellten Möglichkeiten einige, für die neue Anforderungen definiert oder bestehende Regelungen ergänzt werden müssen.

6.2.1 Fernlichtassistent

Ein Fernlichtassistent muss derart funktionieren, dass andere Verkehrsteilnehmer, insbesondere entgegenkommende, aber auch vorausfahrende Fahrzeugführer, nicht geblendet werden. Hierzu gibt es noch keine allgemein anerkannten Prüfkriterien. Diese sind neu zu entwickeln, obgleich sowohl die Fahrzeug- als auch die Teilehersteller hierfür derzeit keine Notwendigkeit sehen.

6.2.2 Leuchtweitenregelung

Als ersten und einfachen Beitrag zur Verkehrssicherheit sollte hier die manuelle Einstellung durch eine automatische Regelung ersetzt werden. Hierzu wäre lediglich eine Anpassung des Paragraphen 6.2.6.2 der ECE-R 48 notwendig. Erwähnenswert wäre das Verhalten im Fehlerfall, da hier durchaus eine starke Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer entstehen kann. Diese Fragestellung ist derzeit noch nicht zufrieden stellend gelöst.

Bei einer gleitenden Leuchtweitenregelung ist sicherzustellen, dass die geforderte Lichtverteilung im gesamten Regelbereich eingehalten wird. Anders als im ersten Fall hat man es hier mit einer größeren Winkeldifferenz zu tun, weshalb eine Überprüfung zumindest in den extremen Winkelpositionen angemessen erscheint.

6.2.3 Variable Lichtverteilung

Mit einer variablen Lichtverteilung, wie es mit einem Pixellicht und ähnlichen Systemen (LED-Matrix usw.) möglich wird, geht man vollkommen neue Wege. Die Definition der Lichtverteilung müsste sich dann an der „Performance“ orientieren. Das bedeutet, die Charakteristik der Lichtverteilung wird

ähnlich wie bei AFS auf der Straße definiert. Es gäbe somit keine klassisch definierte Lichtverteilung mehr. Einer anwendungsorientierten Überprüfung der Funktionsweise kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Ähnlich wie beim Fernlichtassistent muss sichergestellt sein, dass andere Verkehrsteilnehmer nicht geblendet werden. Das System muss auf verschiedene Verkehrssituationen mit geeigneter Lichtverteilung reagieren, welche trotz gewisser Einschränkungen hinsichtlich der Blendung gewisse Mindestanforderungen zu erfüllen hat. Eine Umorientierung weg von einer Beurteilung durch eine Beleuchtungsstärkeverteilung hin zu einer Erkennbarkeitsentfernung vordefinierter Objekte wäre zu erwägen. Für die Prüfung würde dies bedeuten, dass sich an die Messung einer oder mehrerer Lichtverteilungen eine Simulation der Erkennbarkeit aus den gemessenen Daten anschließen würde.

Es ist aber auf alle Fälle eine völlig neue Art der Darstellung der Anforderungen hinsichtlich solcher Scheinwerfersysteme notwendig.

6.2.4 Anforderungen an die Messtechnik

Heutige Systeme zur Überprüfung der Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften arbeiten nahezu ausschließlich mit Beleuchtungsstärkemessern aufgrund der in den Vorschriften festgelegten Beleuchtungs- oder Lichtstärken. Moderne Scheinwerfersysteme, insbesondere jene mit LEDs, erfassen aber damit nicht alle notwendigen Messgrößen. Es wird in Zukunft immer mehr Licht aus immer kleineren Bereichen emittiert. Neben der Fragestellung des eindeutigen Signalbildes ist hierbei die Größe „Leuchtdichte“ bisher nicht erfasst. Da aber die Leuchtdichte eines Objektes eine entscheidende Größe für die Blendung durch dieses Objekt ist, sollte in Zukunft auch diese in den ECE-Regelungen durch vorgegebene Maximal- und/oder Minimalwerte in einem für alle Verkehrsteilnehmer erträglichen Rahmen gehalten werden.

Hinsichtlich der Beurteilung einer „Performance-orientierten“ Lichtverteilung sollte baldmöglichst ein Messverfahren zur ganzheitlichen Beurteilung eines Frontscheinwerfersystems entwickelt werden. Dies würde bedeuten, dass die Messung der Lichtverteilung unter Umständen mit dem Fahrzeug zusammen vorgenommen wird. Die Lösung dieses Problems könnte durch eine geeignete Form der Nahfeldphotometrie erreicht werden.

7 Zusammenfassung

Die persönliche Mobilität besitzt einen größeren Stellenwert als je zuvor. Der Bestand an Kraftfahrzeugen in Deutschland wächst wie Bild 87 dargestellt zunehmend. Eine hohe Sicherheit der Verkehrsteilnehmer trotz steigender Verkehrsdichte sollte oberste Priorität besitzen. Neben den passiven Sicherheitssystemen⁴³ ist es notwendig, die aktive Sicherheit der Fahrzeuge zu verbessern. Besondere Aufmerksamkeit gilt hier der Verringerung des bislang noch verhältnismäßig hohen Anteils der Unfallzahlen bei Nacht. Der automobiler Scheinwerfer ist ein essenzieller Bestandteil der aktiven Sicherheitssysteme. Die Verkehrssicherheit bei Nacht ist daher maßgeblich von seiner Leistungsfähigkeit abhängig.

Der Straßenverkehr und das Fahrzeug selbst sind keine statischen, sondern hochdynamische komplexe Systeme. Eine optimale Ausleuchtung des Verkehrsraumes bei gleichzeitiger Minimierung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer kann mit einem statischen Scheinwerfer nicht gewährleistet werden. Lediglich ein situativ-adaptives System ist in der Lage, unabhängig von wechselnden Bedingungen ein zufrieden stellendes Ergebnis zu erreichen.

Die Faktoren, auf die sich ein automobiler Scheinwerfer einstellen muss, resultieren aus dem Umfeld, dem Fahrzeug sowie aus der Physiologie des Menschen. Umfeldfaktoren sind wechselnde Witterungsbedingungen, der Straßentyp sowie seine Geometrie. Zu den fahrzeugspezifischen Faktoren gehören neben dem Fahrzeugtyp auch die Fahrdynamik, die Beladung und die Verschmutzung. Im vorliegenden Bericht wurden die benannten Faktoren eingehend diskutiert. Sie definieren die Anforderungen an automobiler Scheinwerfer und bilden die Grundlage für neue adaptive Konzepte.

Neben der Festlegung der Anforderungen an ein optimales Scheinwerfersystem wurden potenzielle Konzepte zur technischen Umsetzung dargestellt. Dabei wurden bestehende und neue Systeme diskutiert sowie das Potenzial zur Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr erörtert. Das Pixellicht beinhaltet nahezu sämtliche adaptive Funktionen und stellt aufgrund des hohen Freiheitsgrades bei

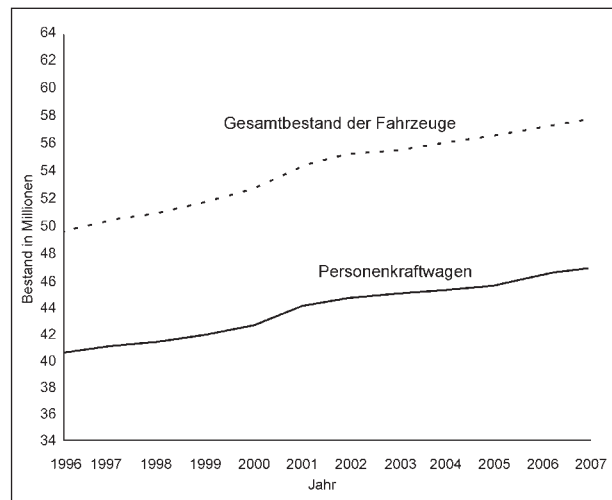


Bild 87: Bestand der Kraftfahrzeuge in Deutschland; Datenquelle: Kraftfahrtbundesamt

der Gestaltung der Lichtverteilung die optimale Lösung für die technische Realisierung dar. Eine Integration dieser Technologie im Kraftfahrzeug ist jedoch zurzeit noch nicht möglich, aber dennoch in naher Zukunft denkbar.

Andere technische Lösungsansätze bieten schon heute die Möglichkeit adaptiver Frontbeleuchtungssysteme und sind zum Teil bereits etabliert. So lässt sich ein horizontales und vertikales Schwenken der Lichtverteilung relativ einfach mit Hilfe eines Projektionsmoduls erreichen. Dies ermöglicht in Kombination mit einer entsprechenden Sensorik eine Anpassung an die horizontale und vertikale Straßengeometrie sowie an die Fahrdynamik und die Lage anderer Verkehrsteilnehmer. Eine Modifikation des Projektionsmoduls mit einer modulierbaren Blende würde darüber hinaus ein Generieren verschiedener Lichtverteilungen und somit eine Adaption an die Witterungsbedingungen und den Straßentyp ermöglichen. Auch statisches Abbiegelicht sowie Tagfahrleuchten auf der Basis von LEDs werden bereits von mehreren Fahrzeugherstellern optional angeboten.

Da die Integration dieser adaptiven Systeme jedoch meist nicht obligatorisch ist, ist der Anteil der mit dieser Technik ausgestatteten Fahrzeuge gering. In der Regel sind lediglich Fahrzeuge der Oberklasse mit Tagesfahrlicht, dynamischem und statischem Kurvenlicht, sowie einer dynamischen Leuchtweitenregelung ausgestattet.

Adaptive Scheinwerfer besitzen unumstritten ein hohes Potenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Seitens des Gesetzgebers sollten obligatorische Regelungen ausgearbeitet werden, die zur

⁴³ Passive Sicherheitssysteme minimieren im Fall eines nicht mehr vermeidbaren Unfalls die Folgen.

Implementierung adaptiver Scheinwerfer verpflichten. Nur so kann die aktive Verkehrssicherheit durch eine optimale Sicht des Fahrzeugführers bei gleichzeitiger minimaler Blendung anderer Verkehrsteilnehmer optimiert und die Verkehrssicherheit erhöht werden.

8 Literatur

- [ADL73] ADLER, B.: Three Beam Headlight Evaluation, PB-Report 221614, 1973
- [AFS96-1] Market Surveys, Phase 1, AFS Eureka Project 1403, Internal Report of the AFS Group, 1996
- [AFS96-2] The Future of Front Lights, Synthesis Report, SOFRES, Internal Document of the AFS Group, 1996
- [BOD73] BODMANN, H. W., WEIS, B.: Flux Distribution with Perfect Specular Reflectors, 1973
- [BOS02] Bosch (2002): Lichttechnik und Scheibenreinigung am Kraftfahrzeug. In: Gelbe Reihe, Ausgabe 2002, ISBN 3-7782-2039-X
- [DAM95] DAMASKY, J.: Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer, Dissertation D17, Darmstadt, 1995
- [DIT03] DITTMAR, G., NOLTING, J.: Wärmebildgeräte im Kraftfahrzeug zur verbesserten Nachtsicht, Thermografie-Kolloquium, DGZfP-Berichtsband 86-CD, Fachhochschule Aalen, 2003
- [EICH99] EICHHORN, K., LACHMEYER, R.: Scheinwerfer von morgen – multifunktional und hochintelligent, in: ATZ – Automobile Zeitschrift, Nr. 101, Jahrgang 1999
- [EICH01] EICHHORN, K., ABEL, B., BURG, M.: Verbesserte Nachtsicht mit Infrarotscheinwerfern, Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt, in: ATZ 9, 2001
- [EICH05] EICHHORN, K., GÖTZ, M., HIMMLER, A., ROSLACK, J.: Aktives Licht – Innovative Ansätze für die nächste Scheinwerfer-Generation, Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt, in: ATZ 11, 2005
- [FEE04] FEE Fahrzeugtechnik EWG, Richtlinien der Europäischen Gemeinschaft für Straßenfahrzeuge, Kirschbaum Verlag Bonn, 2004
- [FUE05] FÜRSTENBERG, K. Ch.: Fußgängerschutz mit Laserscannern, IBEO Automobile Sensor GmbH, Hamburg, VDI-Berichte Nr. 1907, S. 139, 2005
- [GOE04] GÖTZ, M., KAUSCHKE, R., HÄRMES, E., EICHHORN, K.: Scannender Scheinwerfer, Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt, L-LAB, Paderborn, DGaO-Proceedings, 2004
- [GOT04] GOTOH, S., AOKI, T.: Development of an Active Head Light, Presented at the 15th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 96S2O04, Melbourne, Australia
- [GRI05] GRIESINGER, M., Multifunktional Use of Semiconductor Based Car Lighting Systems: Potentials and Challenges, DaimlerChrysler AG, In: Proceedings ISAL 2005, ISBN: 3-8316-0499-1
- [HEL00] Hella, R&D Review, 2000
- [HIC70] HICKS, H. V.: Supplementary Headlight Improves Driver's Seeing Distance without Dazzling Oncoming Driver; in: SAE-Journal, Volume: 78, No. 3, 1970
- [HOF03] HOFFMANN von, A.: Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2003
- [HUH99] HUHN, W. (1999): Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen. Darmstädter Dissertation D17. In: Darmstädter Lichttechnik, Herbert Utz Verlag, ISBN 3-89675-595-1
- [IRL98] IRLE, H., KOST, N., STRYSCHIK, D.: Integriertes Leuchtweitenregelungssystem mit neuem Sensor, in VDI-Berichte Nr. 1415, 1998
- [ISE06] ISE, Roos, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH), Vorlesungsskriptum „Bemessungsgrundlagen im Straßenwesen – Teil: Straßenentwurf“
- [JEB06] JEBAS, C.: Untersuchung des Einflusses der Vorfeld- und Seitenausleuchtung automobillicher Scheinwerfer auf die Erkennbarkeitsentfernung von Sehobjekten, Diplomarbeit, Fachhochschule Jena, 2006
- [KAU04] KAUSCHKE, R.: "Pixellight" – DMD Active Headlamps as a Tool for Rapid Prototyping of

- LSVs, Hella KGaA Hueck & Co., Vortrag L-LAB Summerschool 2004
- [KET06] KETTWICH, C.: Subjektive Untersuchung zur Farbwahrnehmung in Abhängigkeit vom Beleuchtungsniveau, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2006
- [KNO06] KNOLL, P. M., Robert Bosch GmbH: Prädiktive Fahrerassistenz – vom Komfortsystem zur aktiven Unfallvermeidung, als Vorlesungsumdruck des IAT (Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement) der Universität Stuttgart
- [KOB91] KOBAYASHI, S., HAYAKAWA, M.: Beam Controllable Headlight System, in: Society of Automotive Engineers, SAE paper 910829, Warrendale, 1991
- [KUH04] KUHLE, P., BMW AG: Patent DE 10 2004 006 133 A1, Vorrichtung und Verfahren zur Leuchtweitenregelung eines Kraftfahrzeugs, 2004
- [KUH05] KUHLE, P.: Connected Light and Vision Systems. Improvement of Visual Recognition by Using Advanced Sensors, BMW AG, Vortrag L-LAB Summerschool 2005
- [LAC05] LACHMEYER, R.: Case Studies in Night-Vision, Hella KGaA Hueck & Co, Vortrag L-LAB Summerschool 2005
- [LAU04] LAUTERBACH, S.: Hochanregung von organischen Leuchtdioden, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 2004
- [MAN95] MANZ, K.: Entwicklungsphasen im Werdegang von Prüfrichtlinien, dargestellt an den Beispielen des Gasentladungsscheinwerfers und der Gasentladungslampe, PAL – Progress in Automotive Lighting, Symposium der TH Darmstadt FG Lichttechnik, 1995
- [MOI05] MOISEL, J.: Multifunctional Use of Semiconductor Lighting Systems, Daimler Chrysler Corporate Research, Vortrag L-LAB Summerschool 2005
- [MUET72] MÜTZE, K., FOITZIK, L., KRUG, W., SCHREIBER, G.: ABC der Optik, Verlag Werner Dausien, Hanau/Main, 1972
- [ROS99] ROSENHAHN, E.: Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen, Dissertation D17, Herbert Utz Verlag, ISBN 3-89675-760-1, 1999
- [ROT98] ROTHWELL, H., TESSNOW, T., FLANNAGAN, R.: Magnetic Control of Arc Discharges in Automotive HID Lighting, 31st ISATA Conference, 98AE027, 1998
- [SAR05] SARDI, L.: Infrared Systems for Night Vision Driver Assistance, in: ISAL Symposium, Universität Darmstadt, 2005
- [SCHO05] SCHÖNBECK, S., ELLMERS, U., GAIL, J., KRAUTSCHEID, R., TEWS, R.: Abschätzung möglicher Auswirkung von Fahren mit Licht am Tag (Tagfahrleuchten/Abblendlicht) in Deutschland, Abschlussbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2005
- [SCHM71] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J., BINDELS, J. Th. H.: Die Schwellenleuchtdichteerhöhung als Blendungsbewertungskriterium, in: Lichttechnik, 23. Jahrgang, Nr. 10, Berlin, Helios, 1971
- [SCHM78] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J., Einfluss der Verschmutzung von Scheinwerfer-Streuscheiben auf die Sehweite von Kraftfahrern, in: ATZ 80 11, 1978
- [SCHW03] SCHWAB, G.: Untersuchung zur Ansteuerung adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfer, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Der andere Verlag, 2003
- [VOE06] VÖLKER, S.: Hell- und Kontrastempfindung – ein Beitrag zur Entwicklung von Ziel-funktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-scheinwerfern, Habilitationsschrift, Universität Paderborn, Fakultät Maschinenbau, 2006
- [WAD89] WADA, K., MIYAZAWA, K., YAGI, S., TAKAHASHI, K., SHIBATA, H.: Steerable Forward Lighting System, Society of Automotive Engineers: SAE Technical Papers Series 1989-06-82, Warrendale, 1989
- [WAM96] WAMBSGANß, H.: Lichttechnische Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen bei Dunkelheit, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, 1996
- [WER06] WERNIKE, A.: Die analytische und experimentelle Untersuchung des Einflusses pulsweitenmodulierter Lichtquellen auf die visuelle Wahrnehmung, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2006

[WOL06] WOLF, S., BLANKENHAGEN, C., HAHN, W., GALL, D.: Fahrersichtweiten bei Nebelbedingungen im Feldexperiment, In: Licht, Ausgabe 03/02, S. 238-243

Internetquellen

[DUD06] DUDLEY, D.: Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications, Texas Instruments, Veröffentlicht in SPIE, www.ti.com

[HEL06] Hella KGaA Hueck & Co., Technische Information Licht – Scheinwerfer, www.hella.com

[IQ1] www.google.de

[IQ2] www.wikipedia.de

[IQ3] www.roboternetz.de

[IQ4] www.uniwuppertal.de

[IQ5] www.hella-press.de

[IQ6] www.dalsa.com

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

1994

F 5: Nutzen durch fahrzeugseitigen Fußgängerschutz
Bamberg, Zellmer € 11,00

F 6: Sicherheit von Fahrradanhängern zum Personentransport
Wobben, Zahn € 12,50

F 7: Kontrastwahrnehmung bei unterschiedlicher Lichttransmission von Pkw-Scheiben

Teil 1: Kontrastwahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr bei Fahrern mit verminderter Tagessehschärfe
P. Junge

Teil 2: Kontrastwahrnehmung in der Dämmerung bei Fahrern mit verminderter Tagessehschärfe
Chmielarz, Siegl

Teil 3: Wirkung abgedunkelter Heckscheiben - Vergleichsstudie
Derkum € 14,00

F 8: Anforderungen an den Kinnschutz von Integralhelmen
Otte, Schroeder, Eidam, Kraemer € 10,50

F 9: Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen unter Straßenbedingungen
Schmieder, Bley, Spickermann, von Zetteimann € 11,00

1995

F 10: Einsatz der Gasentladungslampe in Kfz-Scheinwerfern
Damasky € 12,50

F 11: Informationsdarstellung im Fahrzeug mit Hilfe eines Head-Up-Displays
Mutschler € 16,50

F 12: Gefährdung durch Frontschutzbügel an Geländefahrzeugen
Teil 1: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern
Zellmer, Schmid

Teil 2: Quantifizierung der Gefährdung von Fußgängern
Zellmer € 12,00

F 13: Untersuchung rollwiderstandsarmer Pkw-Reifen
Sander € 11,50

1996

F 14: Der Aufprall des Kopfes auf die Fronthaube von Pkw beim Fußgängerunfall – Entwicklung eines Prüfverfahrens
Glaeser € 15,50

F 15: Verkehrssicherheit von Fahrrädern
Teil 1: Möglichkeiten zur Verbesserung der Verkehrssicherheit von Fahrrädern
Heinrich, von der Osten-Sacken
Teil 2: Ergebnisse aus einem Expertengespräch „Verkehrssicherheit von Fahrrädern“
Nicklisch € 22,50

F 16: Messung der tatsächlichen Achslasten von Nutzfahrzeugen
Sagerer, Wartenberg, Schmidt € 12,50

F 17: Sicherheitsbewertung von Personenkraftwagen – Problemanalyse und Verfahrenskonzept
Grunow, Heuser, Krüger, Zangemeister € 17,50

F 18: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS
Präckel € 14,50

F 19: Schwingungsdämpferprüfung an Pkw im Rahmen der Hauptuntersuchung
Pullwitt € 11,50

F 20: Vergleichsmessungen des Rollwiderstands auf der Straße und im Prüfstand
Sander € 13,00

F 21: Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe
Fach € 14,00

1997

F 22: Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei kurzzeitiger Motorabschaltung
Bugsel, Albus, Sievert € 10,50

F 23: Unfalldatenschreiber als Informationsquelle für die Unfallforschung in der Pre-Crash-Phase
Berg, Mayer € 19,50

1998

F 24: Beurteilung der Sicherheitsaspekte eines neuartigen Zweiradkonzeptes
Kalliske, Albus, Faerber € 12,00

F 25: Sicherheit des Transportes von Kindern auf Fahrrädern und in Fahrradanhängern
Kalliske, Wobben, Nee € 11,50

1999

F 26: Entwicklung eines Testverfahrens für Antriebsschlupf-Regelsysteme
Schweers € 11,50

F 27: Betriebslasten an Fahrrädern
Vötter, Groß, Esser, Born, Flamm, Rieck € 10,50

F 28: Überprüfung elektronischer Systeme in Kraftfahrzeugen
Kohlstruck, Wallentowitz € 13,00

2000

F 29: Verkehrssicherheit rundeneuerter Reifen
Teil 1: Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen
Glaeser
Teil 2: Verkehrssicherheit runderneuerter Lkw-Reifen
Aubel € 13,00

F 30: Rechnerische Simulation des Fahrverhaltens von Lkw mit Breitreifen
Faber € 12,50

F 31: Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfällen
Otte € 12,50

F 32: Die Fahrzeugtechnische Versuchsanlage der BAST – Einweihung mit Verleihung des Verkehrssicherheitspreises 2000 am 4. und 5. Mai 2000 in Bergisch Gladbach € 14,00

F 33: Sicherheitsbelange aktiver Fahrdynamikregelungen
Gaupp, Wobben, Horn, Seemann € 17,00

2001

F 34: Ermittlung von Emissionen im Stationärbetrieb mit dem Emissions-Mess-Fahrzeug
Sander, Bugsel, Sievert, Albus € 11,00

F 35: Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren
Wallentowitz, Ehmanns, Neunzig, Weilkes, Steinauer, Bölling, Richter, Gaupp € 19,00

F 36: Anforderungen an Rückspiegel von Krafträdern
van de Sand, Wallentowitz, Schrüllkamp € 14,00

- F 37: Abgasuntersuchung - Erfolgskontrolle: Ottomotor – G-Kat
Afflerbach, Hassel, Schmidt, Sonnborn, Weber € 11,50
- F 38: Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes
Friesen, Wallentowitz, Philipps € 12,50

2002

- F 39: Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung von Auffahrunfällen bei Gefahrenbremsung
Gail, Lorig, Gelau, Heuzeroth, Sievert € 19,50
- F 40: Prüfverfahren für Spritzschutzsysteme an Kraftfahrzeugen
Domsch, Sandkühler, Wallentowitz € 16,50

2003

- F 41: Abgasuntersuchung: Dieselfahrzeuge
Afflerbach, Hassel, Mäurer, Schmidt, Weber € 14,00
- F 42: Schwachstellenanalyse zur Optimierung des Notausstiegssystems bei Reisebussen
Krieg, Rüter, Weißgerber € 15,00
- F 43: Testverfahren zur Bewertung und Verbesserung von Kinderschutzsystemen beim Pkw-Seitenaufprall
Nett € 16,50
- F 44: Aktive und passive Sicherheit gebrauchter Leichtkraftfahrzeuge
Gail, Pastor, Spiering, Sander, Lorig € 12,00

2004

- F 45: Untersuchungen zur Abgasemission von Motorrädern im Rahmen der WMTC-Aktivitäten
Steven € 12,50
- F 46: Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit
Funke, Winner € 12,00
- F 47: Kompetenzerwerb im Umgang mit Fahrerinformationssystemen
Jahn, Oehme, Rösler, Krens € 13,50
- F 48: Standgeräuschmessung an Motorrädern im Verkehr und bei der Hauptuntersuchung nach § 29 STVZO
Pullwitt, Redmann € 13,50
- F 49: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder
Berg, Rücker, Mattern, Kallieris € 18,00
- F 50: Seitenairbag und Kinderrückhaltesysteme
Gehre, Kramer, Schindler € 14,50
- F 51: Brandverhalten der Innenausstattung von Reisebussen
Egelhaaf, Berg, Staubach, Lange € 16,50
- F 52: Intelligente Rückhaltesysteme
Schindler, Kühn, Siegler € 16,00
- F 53: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag
Klanner, Ambios, Paulus, Hummel, Langwieder, Köster € 15,00
- F 54: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen durch rechts abbiegende Lkw
Niewöhner, Berg € 16,50

2005

- F 55: 1st International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 3rd/4th September 2004 at Hannover Medical School € 29,00

2006

- F 56: Untersuchung von Verkehrssicherheitsaspekten durch die Verwendung asphärischer Außenspiegel
Bach, Rüter, Carstengerdes, Wender, Otte € 17,00
- F 57: Untersuchung von Reifen mit Notlauf Eigenschaften
Gail, Pullwitt, Sander, Lorig, Bartels € 15,00
- F 58: Bestimmung von Nutzfahrzeugemissionsfaktoren
Steven, Kleinebrahm € 15,50
- F 59: Hochrechnung von Daten aus Erhebungen am Unfallort
Hautzinger, Pfeiffer, Schmidt € 15,50
- F 60: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit
Vollrath, Briest, Schießl, Drewes, Becker € 16,50

2007

- F 61: 2nd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 1st/2nd September 2006 at Hannover Medical School € 30,00
- F 62: Einfluss des Versicherungs-Einstufungstests auf die Belange der passiven Sicherheit
Rüter, Zoppke, Bach, Carstengerdes € 16,50
- F 63: Nutzerseitiger Fehlgebrauch von Fahrerassistenzsystemen
Marberger € 14,50
- F 64: Anforderungen an Helme für Motorradfahrer zur Motorradsicherheit
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Schüler, Adolph, Steinmann, Ionescu € 22,00
- F 65: Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit
Manz, Kooß, Klinger, Schellinger € 17,50

2008

- F 66: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen
Jebas, Schellinger, Klinger, Manz, Kooß € 15,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Komplettverzeichnis erhältlich.