
Markierungslicht - Eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern

Dipl.-Ing. Titus Dominik Schneider geb. am 04.05.1980 in München

Vom Fachbereich 18 - Elektrotechnik und Informationstechnik - der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



FACHGEBIET
LICHTTECHNIK

Referent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Erwin Biebl
Tag der Einreichung:	10.10.2010
Tag der mündlichen Prüfung:	27.04.2011

D17 - Darmstädter Dissertationen

Dominik Schneider

**Markierungslicht –
eine Scheinwerferlichtverteilung zur
Aufmerksamkeitssteuerung und
Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern**



Herbert Utz Verlag · München

Darmstädter Lichttechnik

herausgegeben vom Fachgebiet Lichttechnik
der Technischen Universität Darmstadt

D 17

Zugl.: Diss., Darmstadt, Techn. Univ., 2011

Bibliografische Information der Deutschen
Nationalbibliothek: Die Deutsche
Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte
bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere
die der Übersetzung, des Nachdrucks, der
Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe
auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege
und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser
Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2011

ISBN 978-3-8316-4116-1

Printed in EC
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	7
2	Anzeigekonzepte von Fahrerassistenzsystemen	10
2.1	Head-Up-Displays	10
2.2	Displays in der Mittelkonsole	11
2.3	Vergleich der Displaykonzepte mit Markierungslicht	12
3	Lichttechnische Anforderungen an Markierungslichtsysteme	14
3.1	Ableitung der Anforderungen aus der Unfallstatistik	14
3.1.1	Unfälle mit Fußgängern	14
3.1.2	Unfälle mit Radfahrern	17
3.1.3	Wildunfälle	18
3.2	Menschliche Wahrnehmung und Reaktion	20
3.2.1	Reale Umgebungsleuchtdichten	21
3.2.2	Unterschiedsschwelle	22
3.2.3	Blendung	23
3.2.4	Adaptationszeiten	24
3.2.5	Brems- und Anhalteweg	25
3.3	Umfeldbedingungen	26
3.3.1	Umgebungshelligkeit	26
3.3.2	Reflektivität der Umgebung	26
3.4	Anforderungen an die Lichtverteilung	29
3.4.1	Lichtverteilung - streifendes Anleuchten	29
3.4.2	Lichtverteilung - direktes Anleuchten	29
3.4.3	Maximalbeleuchtungsstärke	30
3.4.4	Mindestbeleuchtungsstärke	30
3.4.5	Horizontale Winkelauflösung	32
4	Weitere technologische Anforderungen	34
4.1	Bauraum	34
4.2	Einschaltgeschwindigkeit	34
4.3	Horizontale Winkelgeschwindigkeit für Anleuchten und Nachführen	35
4.3.1	Winkelgeschwindigkeit durch eigene Fahrzeuginnenbewegung	37
4.3.2	Winkelgeschwindigkeit durch Kurvenfahrt	37
4.3.3	Winkelgeschwindigkeit durch entgegenkommendes Objekt	38
4.3.4	Sich quer zur Fahrzeuginnenachse bewegende Objekte	38
4.3.5	Resultierende Gesamtwinkelgeschwindigkeit	38
4.4	Sensorsysteme	39

4.4.1	Lidar	41
4.4.2	PMD-Kameras	42
4.4.3	Radar	42
4.4.4	Navigation	43
4.4.5	Night-Vision-Systeme	43
4.4.6	Sensorfusionssysteme	48
5	Bewertung von Technologien für adaptive Scheinwerfer	50
5.1	Xenonmodul mit adaptiven Blenden	51
5.2	Pixellicht	53
5.3	LED-Array	54
5.4	Zusätzlicher beweglicher Scheinwerfer	55
5.5	Integrierbarkeit in Fahrzeuge	55
6	LED-Technik	57
6.1	Grundlagen LED	57
6.2	Weißer LED	59
6.2.1	RGB-LED	59
6.2.2	LED mit Farbkonversionsphosphor	60
6.2.3	Elektronische Ansteuerung	68
6.3	Wärmehaushalt	71
6.3.1	Wärmeentstehung in der LED	71
6.3.2	Wärmeabfuhr	71
7	Gesetzgebung	73
7.1	R45 - Scheinwerferreinigungsanlagen	74
7.2	R48 - Leuchtweitenregelung	74
7.3	Ausfallerkennung	74
7.4	R48 - Aus- und Einschaltverhalten	74
7.5	Neue Gesetzesentwürfe für adaptive Lichtfunktionen	75
7.6	R48 - Vorschlag zur Abänderung für Teilfernlicht	75
7.7	R123 - Vorschlag zur Abänderung für Teilfernlicht	76
7.8	Zulassungsanforderungen für Markierungslicht	76
8	Auswahlkriterien und Selektion von möglichen Markierungslichtsystemen	78
8.1	Pixellicht	79
8.2	Xenonmodul mit adaptiven Blenden	79
8.3	Schwenkbares System mit 1-4 LEDs	80
8.4	LED-Array	81
9	Realisierung eines Markierungslichtsystems	83
9.1	Mechanisch bewegte Spotscheinwerfer	83
9.1.1	Xenonspot - Prototyp P1	84
9.1.2	Philips 4er Spot - Prototyp P4	85
9.2	LED-Arrays	86

9.2.1	Rebel-Array	86
9.2.2	Elcos-Array	88
9.3	Ansteuerung der Prototypensysteme	90
9.3.1	Ansteuerungselektronik	90
9.3.2	Sensorik und Anbindung	94
9.3.3	Ansteuerungssoftware	94
9.3.4	Justage	96
9.4	Lichttechnische Charakterisierung des Markierungslichts	96
10 Messtechnische Evaluierung von prototypischen Markierungslichtsystemen		98
10.1	Reaktionszeit des Markierungslichtsystems	98
10.1.1	FIR-Kamera	98
10.1.2	Datenübertragung	99
10.1.3	Aktorik	99
10.1.4	Gesamtzeit	100
10.2	Positioniergenauigkeit	101
10.3	Leistungsverbrauch	102
10.4	Umwelttest (Temperatur, Feuchtigkeit)	103
11 Probandenstudien		105
11.1	Allgemeine Erkenntnisse aus Versuchsfahrten	105
11.2	Statische Versuche	106
11.2.1	Blendungsuntersuchung - V1	106
11.2.2	Erkennbarkeitsentfernung - Reaktionszeit V2	111
11.2.3	Erkennbarkeitsentfernung - Reaktionszeit V3	118
11.3	Dynamischer Versuch	121
11.3.1	Fahrversuch - Erkennbarkeitsentfernung V4	122
11.3.2	Fahrversuch - Fahrerreaktion Ausweichreaktionen: V4a	125
12 Ergebnisse und Ausblick		128
Tabellenverzeichnis		133
Abbildungsverzeichnis		134
13A1 - Detailinformationen über Probandenversuche		138
14A2 - Allgemeine Informationen		149

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die visuelle Wahrnehmung bietet dem Fahrer eines Kraftfahrzeugs fast alle zum Führen des Fahrzeugs benötigten Informationen. Aufgrund eines erkannten Hindernisses passt der Fahrer seine Geschwindigkeit und Fahrtroute an. Wird ein Hindernis durch den Fahrer so spät wahrgenommen, dass eine adäquate Reaktion nicht mehr erfolgen kann, kommt es zu einer Kollision. Doch auch dann kann durch Abbremsen des Fahrzeuges die Kollisionsschwere verringert werden. Vor allem bei Dämmerung und Dunkelheit ist die Sichtweite des Fahrers bei Abblendlicht beschränkt und sogar im durch das Abblendlicht ausgeleuchteten Bereich können wichtige Details nicht immer sicher erkannt werden. Besonders bei Gegenverkehr werden Objekte mit geringem Reflexionsgrad auf der Straße oder am Straßenrand sehr leicht übersehen. Doch auch bei Fernlicht können dunkle Objekte schlecht wahrgenommen werden. Dies liegt zum einen daran, dass der gesamte beleuchtete Bereich kognitiv abgetastet werden muss und durch die geringen Kontraste die Wahrnehmbarkeit erschwert wird. Zum anderen besitzt auch das Fernlicht nur im Zentrum eine ausreichend hohe Intensität, damit sich ein dunkles Objekt überhaupt vom Hintergrund abheben kann. Die Erkennbarkeit von dunkel gekleideten Fußgängern wird in Kapitel 11.2.3 untersucht. Außerdem wird Fernlicht nur in 5 % der möglichen Fahrzeit verwendet. Neue Scheinwerferkonzepte mit mehreren verschiedenen Lichtverteilungen (AFS - Advanced Frontlighting Systems) je nach Fahrsituation (z. B. Landstraßen- und Autobahnlicht) gehen in die richtige Richtung, um die Sichtweite des Fahrers zu erhöhen. Diese Lichtverteilungen sind starr und werden gewöhnlich über Geschwindigkeitsschwellen geschaltet. Beim Autobahnlicht wird beispielsweise die Intensität des Lichts in der Umgebung der Hell-Dunkel-Grenze (HDG¹) erhöht sowie die gesamte Lichtverteilung um wenige zehntel Grad nach oben geschwenkt. Dadurch wird dem Fahrer auf Autobahnen eine erhöhte Sichtweite ermöglicht. Zukünftige Konzepte gehen noch weiter, indem sie das Licht der Scheinwerfer mit Hilfe von Sensorik steuern. Hierbei wird der Raum vor dem Fahrzeug kontinuierlich z.B. von einer Kamera überwacht und bei Abwesenheit von Fahrzeugen das Fernlicht ein- und auch wieder ausgeschaltet. Es sind bereits Systeme im Einsatz, die zusätzlich dazu die HDG bis an ein vorausfahrendes oder entgegenkommendes Fahrzeug anheben. Dadurch wird dem Fahrer immer die optimale Reichweite seiner Scheinwerfer eingestellt. Weiter sind Scheinwerfer in der Entwicklung, die das gesamte Vorfeld immer in Fernlicht tauchen und nur entgegenkommende und vorausfahrende Fahrzeuge ausblenden. Solche Systeme nennen sich blendfreie Fernlichtsysteme oder Systeme mit einer vertikalen HDG. Derartige Scheinwerfer können über starre oder adaptive Blenden sowie über LED-Arrays realisiert werden.

Umfangreiche Sensorsysteme erfassen heute bereits das gesamte Umfeld des Fahrzeugs. Dadurch können z. T. unabhängig von Witterungsbedingungen und Beleuchtungssituati-

¹HDG - die Hell-Dunkel-Grenze bei 1,0 % Neigungseinstellung liegt bei einer Scheinwerferanbauhöhe von 65 cm in 65 m Entfernung zum Fahrzeug



Abbildung 1.1: Straßensituation mit Fußgänger: links: mit Markierungslicht; rechts: ohne Markierungslicht

on vielfältige Informationen über die Fahrzeugumgebung gesammelt werden. Die Darbietung der z. T. hochkomplexen Informationen für den Fahrer benötigt eine einfache und von der eigentlichen Fahraufgabe wenig ablenkende Darstellung. Dahinführend bietet sich als ein weiteres zukünftiges Konzept an, schlecht sichtbare Objekte direkt mit erhöhter Leistung anzuleuchten. Dafür wird ein Lichtspot mit großer Intensität verwendet, so dass er vom Fahrer auch innerhalb einer vorhandenen Lichtverteilung wahrgenommen werden kann. Dieser Spot kann die Aufmerksamkeit des Fahrers gezielt auf eine Stelle lenken. Dadurch kann der Fahrer direkt vor Gefahren gewarnt werden, ohne dass er seinen Blick von der Straße abwenden muss. Ein derartiges System nennt sich Markierungslicht und wird auch durch den Begriff „gezieltes Anleuchten“ beschrieben. Die Funktion ist in Abb. ² 1.1 dargestellt. Dabei ist schon beim Anblick des Bildes zu erkennen, dass der Blick des Betrachters auf den beleuchteten Fußgänger auf dem linken Bild gelenkt wird, der Fußgänger auf der rechten Seite aber nicht gesehen werden kann.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine solche Lichtfunktion auszulegen. Dazu ist es notwendig, die folgenden Fragestellungen grundlegend zu betrachten:

- Welche Nachteile haben aktuell verfügbare Lichtverteilungen?
- Welchen Einfluss könnte ein Markierungslicht auf die Unfallzahlen haben?
- Auf welche Umgebungsparameter muss ein Lichtsystem ausgelegt werden?
- Welche Sensorik wird für ein Markierungslicht benötigt?
- Welche Scheinwerfertechnologien sind für ein Markierungslicht verwendbar?
- Wie sollte die Lichtverteilung eines Markierungslichtes aussehen?
- Welchen Einfluss hat ein Markierungslicht auf die Wahrnehmung eines Fahrzeugführers?
- Wie reagieren angeleuchtete Objekte auf ein Markierungslicht?
- Wie reagiert der Fahrer auf ein Markierungslicht?
- Kann eine solche Lichtfunktion in ein Fahrzeug integriert und auch zugelassen werden?

²Abbildung - im folgenden Abb. genannt

Der erste Teil der Arbeit befasst sich anhand von Unfallstatistikdaten mit dem möglichen Einfluss eines Markierungslichtes auf die Unfallvermeidung. Es werden verschiedene Sensor- und Scheinwerfertechnologien betrachtet und hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten für Markierungslichtsysteme bewertet. Der zweite Teil stellt verschiedene Scheinwerferprototypen dar und beschreibt umfangreiche Probandentests, die sich mit der Wirksamkeit von verschiedenen Ausprägungen von Markierungslichtsystemen beschäftigen. Die Tests gliedern sich in statische und dynamische Untersuchungen und berücksichtigen sowohl die Wahrnehmung des Fahrers als auch die Blendung von anderen Verkehrsteilnehmern.

Darmstädter Lichttechnik

herausgegeben vom Fachgebiet Lichttechnik
der Technischen Universität Darmstadt

- Dominik Schneider: **Markierungslicht – eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern**
2011 · 168 Seiten · ISBN 978-3-8316-4116-1
- Tran Quoc Khanh (Hrsg.): **9th International Symposium on Automotive Lighting – ISAL 2011 – Proceedings of the Conference** · Volume 14
2011 · 1088 Seiten · ISBN 978-3-8316-4093-5
- Achim Freiding: **Untersuchungen zur spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges im mesopischen Bereich**
2010 · 184 Seiten · ISBN 978-3-8316-0991-8
- Tran Quoc Khanh (Hrsg.): **8th International Symposium on Automotive Lighting – ISAL 2009 – Proceedings of the Conference** · Volume 13 · mit CD-ROM
2009 · 928 Seiten · ISBN 978-3-8316-0904-8
- Tran Quoc Khanh: **7th International Symposium on Automotive Lighting – ISAL 2007 – Proceedings of the Conference** · Volume 12 · mit CD-ROM
2007 · 1152 Seiten · ISBN 978-3-8316-0711-2
- Helmut F. Schlaak (Hrsg.): **6th International Symposium on Automotive Lighting – ISAL 2005 – Proceedings of the Conference** · Volume 11
2005 · 1156 Seiten · ISBN 978-3-8316-0499-9
- Carsten Diem: **Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr**
2005 · 200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0451-7
- H.-J. Schmidt-Clausen, Department of Lighting Technology, Darmstadt University of Technology (Hrsg.): **Progress in Automobile Lighting – PAL '03 – Proceedings of the Conference** · Volume 10
2003 · 1256 Seiten · ISBN 978-3-8316-0257-5
- Martin Grimm: **Requirements for an ambient interior lighting system for motor vehicles**
2003 · 161 Seiten · ISBN 978-3-8316-0233-9
- Martin Grimm: **Anforderungen an eine ambiente Innenraumbeleuchtung von Kraftfahrzeugen**
2003 · 166 Seiten · ISBN 978-3-8316-0232-2
- Daniel Armbruster: **Optimierung der visuellen Informationsübermittlung durch adaptive Kraftfahrzeugsignalleuchten**
2001 · 186 Seiten · ISBN 978-3-8316-0016-8
- H.-J. Schmidt-Clausen, Department of Lighting Technology, Darmstadt University of Technology (Hrsg.): **Progress in Automobile Lighting – PAL '01 – Proceedings of the Conference** · Volume 8 & Volume 9 · 2 Bände
2001 · 1156 Seiten · ISBN 978-3-89675-971-9
- H.-J. Schmidt-Clausen, Department of Lighting Technology, Darmstadt University of Technology (Hrsg.): **Retroreflective Marking of Vehicles** · Volume 7
2000 · 356 Seiten · ISBN 978-3-89675-924-5

H.-J. Schmidt-Clausen, Department of Lighting Technology, Darmstadt University of Technology (Hrsg.):
Progress in Automobile Lighting – PAL '99 – Proceedings of the Conference · Volume 5 & Volume 6 ·
2 Bände
1999 · 920 Seiten · ISBN 978-3-89675-920-7

Thomas Dahlem: **Methoden zur Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern**
2001 · 212 Seiten · ISBN 978-3-89675-898-9

Joachim Ripperger: **Lichttechnische Anforderungen an Schluß- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge**
2001 · 190 Seiten · ISBN 978-3-89675-818-7

Peter Lehnert: **The Effect of the Vehicle Dynamics on the Light Distribution of Headlamps**
2001 · 186 Seiten · ISBN 978-3-89675-814-9

Peter Lehnert: **Auswirkungen der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung von Scheinwerfern**
2001 · 193 Seiten · ISBN 978-3-89675-813-2

Ernst-Olaf Rosenhahn: **Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für
Schlechtwetterbedingungen**
2000 · 162 Seiten · ISBN 978-3-89675-760-9

Stefan Milch: **Videobasierte Fahreridentifikation in Kraftfahrzeugen**
2001 · 181 Seiten · ISBN 978-3-89675-741-8

Herbert Wambsganß: **Lichttechnische Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen bei Dunkelheit**
2000 · 121 Seiten · ISBN 978-3-89675-716-6

Wolfgang Huhn: **Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen
der ECE-Regelungen**
1999 · 152 Seiten · ISBN 978-3-89675-595-7

Erhältlich im Buchhandel oder direkt beim Verlag:
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · info@utzverlag.de

Gesamtverzeichnis mit mehr als 3000 lieferbaren Titeln: www.utzverlag.de