

---

# 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](http://www.utzverlag.de)

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Aufgabenstellung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Anzeigekonzepte von Fahrerassistenzsystemen</b>	<b>10</b>
2.1	Head-Up-Displays . . . . .	10
2.2	Displays in der Mittelkonsole . . . . .	11
2.3	Vergleich der Displaykonzepte mit Markierungslicht . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Lichttechnische Anforderungen an Markierungslichtsysteme</b>	<b>14</b>
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
<b>4</b>	<b>Weitere technologische Anforderungen</b>	<b>34</b>
4.1	Bauraum . . . . .	34
4.2	Einschaltgeschwindigkeit . . . . .	34
4.3	Horizontale Winkelgeschwindigkeit für Anleuchten und Nachführen . . . . .	35
4.3.1	Winkelgeschwindigkeit durch eigene Fahrzeuglängsbewegung . . . . .	37
4.3.2	Winkelgeschwindigkeit durch Kurvenfahrt . . . . .	37
4.3.3	Winkelgeschwindigkeit durch entgegenkommendes Objekt . . . . .	38
4.3.4	Sich quer zur Fahrzeuglängsachse 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
<b>5</b>	<b>Bewertung von Technologien für adaptive Scheinwerfer</b>	<b>50</b>
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
<b>6</b>	<b>LED-Technik</b>	<b>57</b>
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
<b>7</b>	<b>Gesetzgebung</b>	<b>73</b>
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
<b>8</b>	<b>Auswahlkriterien und Selektion von möglichen Markierungslichtsystemen</b>	<b>78</b>
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
<b>9</b>	<b>Realisierung eines Markierungslichtsystems</b>	<b>83</b>
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
<b>10 Messtechnische Evaluierung von prototypischen Markierungslichtsystemen</b>		<b>98</b>
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
<b>11 Probandenstudien</b>		<b>105</b>
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
<b>12 Ergebnisse und Ausblick</b>		<b>128</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>133</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>134</b>
<b>13A1 - Detailinformationen über Probandenversuche</b>		<b>138</b>
<b>14A2 - Allgemeine Informationen</b>		<b>149</b>

---

# 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 (HDG<sup>1</sup>) 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-

---

<sup>1</sup>HDG - 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. <sup>2</sup> 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?

<sup>2</sup>Abbildung - 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](http://www.utzverlag.de)