

Alexander Totzauer

**Kalibrierung und Wahrnehmung
von blendfreiem LED-Fernlicht**



Herbert Utz Verlag · München

Darmstädter Lichttechnik

herausgegeben vom Fachgebiet Lichttechnik
der Technischen Universität Darmstadt

D17

Umschlagabbildung: Audi

Zugl.: Diss., Darmstadt, Techn. Univ., 2013

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 · 2013

ISBN 978-3-8316-4295-3

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Licht und Sicht der AUDI AG in Ingolstadt. Die wissenschaftliche Betreuung übernahm das Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein spezieller Dank gilt Prof. Dr-Ing. habil. Tran Quoc Khanh vom Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt für die intensive Betreuung der Arbeit, sowie die zahlreichen konstruktiven Anregungen, die Möglichkeiten zur freien Ausgestaltung und die Unterstützung bei allen Vorhaben. Des Weiteren danke ich Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz vom Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau für die Übernahme des Koreferats und für seine Anregungen.

Auf Seiten der AUDI AG möchte ich mich insbesondere bei Herrn Dr. Wolfgang Huhn und Herrn Stephan Berlitz bedanken. Sie haben mein Promotionsvorhaben ermöglicht und nach besten Kräften unterstützt. Vor allem die Möglichkeit zur freien Ausgestaltung des Themas sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen für die Betreuung etlicher Praktika und Diplomarbeiten haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Zudem möchte ich der gesamten Abteilung Licht und Sicht für die herzliche Aufnahme in das Team und die durchgängige Unterstützung meines Vorhabens meinen Dank aussprechen.

Kein Doktorand gelangt ohne Unterstützung an sein Ziel und so gilt mein Dank ebenfalls allen Studenten und Probanden, welche mich in den vergangenen drei Jahren unterstützt und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Fachgebiets Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt bedanken, die mir jederzeit mit ihrer Hilfsbereitschaft, ihrem Optimismus und ihrer Fachkenntnis zur Seite standen.

Meine Dankbarkeit gilt zudem meiner gesamten Familie, deren Unterstützung ich mir zu jeder Zeit sicher sein konnte und weiter sein kann. Ganz besonders dankbar bin ich auch meiner Partnerin, die mich immer wieder neu motiviert und inspiriert hat.

Gaimersheim, im Dezember 2012

Alexander Totzauer

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit diskutiert Fragestellungen zur Kalibrierung und Wahrnehmung von adaptivem blendfreiem LED-Fernlicht. Blendfreies LED-Fernlicht ermöglicht dem Fahrer die permanente Aktivierung der Fernlichtfunktion ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Ein Kamerasystem erkennt die anderen Verkehrsteilnehmer und entblendet durch die Deaktivierung einzelner LEDs einen Teilbereich des Fernlichts. Der Vorteil eines solchen Systems besteht im Wesentlichen darin, dass dem Fahrer eine große Sichtweite ermöglicht wird, die Blendung für andere Verkehrsteilnehmer aber nicht nennenswert höher ausfällt als bei einer Begegnung unter Abblendlicht. Da als Lichtquelle typischerweise LED-Arrays eingesetzt werden und diese eine Fernlicht-Verteilung in Form einer Matrix aus vielen individuell ansteuerbaren Lichtsegmenten erzeugen, werden solche Systeme häufig als MatrixBeam bezeichnet.

In einer detaillierten Gesamtsystembetrachtung werden die drei maßgeblichen Systemkomponenten beschrieben: die Fahrzeugkamera zur Objektdetektion, das Lichtsteuergerät zur Berechnung des Lichtmusters und der MatrixBeam-Scheinwerfer, welcher die Erzeugung des benötigten Lichtmusters ermöglicht. Dabei werden die Grenzen der Objekterkennung, die Herausforderung, den die Parallaxe zwischen Scheinwerfer und Kamera ins System mit einbringt, und die Einschränkungen und Freiheitsgrade im optischen System des Scheinwerfers beschrieben. Die Betrachtung der Systemtotzeit lässt eine Potential-einschätzung im Vergleich zur manuellen Fernlichtbedienung zu und zeigt, dass die Reaktion bei automa-tischer Steuerung etwa um den Faktor fünf schneller ist. Zusätzlich werden die Toleranzen des Gesamtsystems andiskutiert und deren Problematik dargelegt. Es zeigt sich, dass die Toleranzen des Gesamtsystems relativ groß sind und ohne Gegenmaßnahme ein signifikanter Nutzen für den Fahrer kaum realisiert werden kann. Die abgeschätzte Toleranzkette liegt dabei bereits deutlich über dem Abstand, der gemäß durchgeführter Untersuchungen vom Fahrer als angenehm empfunden wird.

Die Zuverlässigkeit und die Performance des Systems MatrixBeam ist elementar von der Kenntnis der Segmentausrichtung abhängig. Sind die Lagen der einzelnen Lichtsegmente nur mit einer großen Un-sicherheit bekannt, muss bei der Entblendung eines anderen Verkehrsteilnehmers der schlechteste Fall angenommen werden, wodurch die entstehende Aussparung in der Fernlichtverteilung sehr groß wird. Die notwendige Systemkalibrierung unterliegt insbesondere zwei Herausforderungen. Zum einen gestaltet sich die reproduzierbare Messung der Segmentgrenzen häufig als schwierig. Sie ist abhängig vom verwendeten optischen System und der daraus resultierenden Qualität der Hell-Dunkel-Grenzen. Zum anderen müssen die Winkelinformationen der MatrixBeam-Segmentlagen zu den Winkeln der Fahrzeugkameraobjekte passen. Um keinen ausschließlich theoretischen Bezug zwischen der Kamera und dem Scheinwerfer zu haben, wird in dieser Arbeit je ein Konzept zur statischen und zur dynami-schen Kalibrierung des Gesamtsystems unter Nutzung der Fahrzeugkamera als Messinstrument unter-sucht.

Die statische Kalibrierung versucht einzelne Segmente, welche von einer vor dem Fahrzeug befindlichen Wand reflektiert werden, direkt zu erkennen. Bei diesem Konzept ist vor allem die Fahrzeugausrichtung und das Umgebungslicht kritisch. Die Untersuchungen zu diesem Konzept haben ergeben, dass die Bestimmung des Hot-Spots und die Erkennung der Hell-Dunkel-Grenze mittels Kantenerkennung unter Nutzung eines Canny-Operators mitunter die besten Ergebnisse erzielen. Für einen praxistauglichen Ein-satz, bei dem verschieden ausgeprägte Lichtverteilungen erkannt werden sollen, bietet sich zudem ein Multiparameterverfahren an, welches mehrere Detektionsansätze fusioniert.

Das Konzept der dynamischen Kalibrierung sieht zwei Kalibriermarken vor, welche von den Scheinwerfern zusätzlich vor das Fahrzeug projiziert werden. Die Kamera erkennt diese Kalibriermarken und kann einen direkten Bezug zu den Scheinwerfern berechnen. Der größte Vorteil eines solchen Ansatzes liegt neben der Verkleinerung der Systemtoleranzkette in der Möglichkeit, die Systemkalibrierung ein Fahrzeugleben lang überwachen zu können. Empirische Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit bestätigen das Konzept und stellen daher ein großes Weiterentwicklungspotential in Aussicht.

Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen wird die Wahrnehmung und der Blendeindruck eines MatrixBeam-Systems analysiert. Dabei werden insbesondere die Fragestellungen geklärt, wie groß der zusätzlich entblendete Bereich um einen anderen Verkehrsteilnehmer sein muss, damit sich der Fahrer sowie die anderen Verkehrsteilnehmer wohl fühlen, wie der Blendeindruck von MatrixBeam relativ zu bekannten Lichtfunktionen eingestuft wird und ob das Schaltverhalten einen signifikanten Einfluss auf die Systemwahrnehmung hat. Die Versuchsergebnisse sprechen für einen Abstand von etwa 1° zwischen entblendetem Verkehrsteilnehmer und vertikaler Hell-Dunkel-Grenze des Fernlichts. Dies entspricht einer dunklen Zone links und rechts vom entblendeten Fahrzeug mit einer Breite von etwa einem Meter auf 50 m Entfernung. Unterschiedliche Dimmzeiten und -verläufe können von den Versuchsteilnehmern kaum differenziert werden. Der überwiegende Teil der Versuchsteilnehmer wünscht sich ein möglichst unauffälliges Schaltverhalten und möchte das zusätzliche Licht nur unterbewusst wahrnehmen.

Der Blendungseindruck von MatrixBeam ist mit dem des Abblendlichts vergleichbar. Dieses Ergebnis ist konsistent mit Ergebnissen von ROSLAK [1]. Die Blendungsbeurteilung der durchgeführten Begegnungsfahrt aus 800 m Entfernung wird mit bekannten Blendungstheorien verglichen. Die eher unplausiblen Ergebnisse legen nahe, dass die im Labor gewonnen Erkenntnisse aus der Vergangenheit nicht zwangsläufig mit dynamischen realen Verkehrssituationen verglichen werden können. Der bei realen Situationen entstehende Blendwinkel ist häufig wesentlich kleiner, verglichen mit Laborstudien. Zudem fehlt im Labor sehr häufig eine authentische Fahraufgabe. Weitere dynamische Untersuchungen mit bestmöglichem Realitätsbezug erscheinen an dieser Stelle sinnvoll.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Tabellenverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Die Evolution des Lichts im Fahrzeug	1
1.2 MatrixBeam - blendfreies LED-Fernlicht	2
1.3 Ziele und Aufbau dieser Arbeit	3
2 Stand der Technik	4
2.1 Scheinwerfer	4
2.1.1 Leuchtmittelentwicklung	4
2.1.2 LED-Scheinwerfer	6
2.2 Adaptive Lichtsysteme und Fernlicht-Assistenzsysteme	8
2.2.1 Historische Ansätze und Ideen zur Blendungsminimierung	8
2.2.2 Seriensysteme und aktuelle Konzepte	9
2.2.3 Förderprojekte	11
2.3 Nachtsichtsysteme	12
2.4 Markierungslicht	13
2.5 Stand der Wissenschaft	13
2.5.1 Fernlichtnutzungsverhalten und Potential automatischer Fernlichtsysteme	13
2.5.2 Erkennbarkeitsentfernung	16
2.5.3 Weitere bisherige Untersuchungen zu blendfreiem Fernlicht	18
2.6 Einstellung von Scheinwerfersystemen	18
2.7 Patentsituation	20
2.7.1 Automatische Scheinwerfer-Online-Kalibrierung	20
3 Gesamtsystem blendfreies Fernlicht	22
3.1 Kamera und Bildverarbeitung	22
3.2 Funktionssoftware	24
3.2.1 Parallaxe zwischen Fahrzeugkamera und Scheinwerfer	25
3.2.2 Ausgedehnte MatrixBeam-Optiken	27
3.2.3 Bedienkonzept	27
3.2.4 Totzeit des Gesamtsystems	28
3.3 MatrixBeam-Scheinwerfer	30
3.3.1 Anforderungen an das einzelne MatrixBeam-Segment	31
3.3.2 Auslegungsvarianten des optischen Systems	32
3.3.3 Ausleuchtungskonzept	33
3.4 Toleranzkette für MatrixBeam	35
3.4.1 Beitragsleister der MatrixBeam-Systemtoleranz	35
3.4.2 Situations- und Potentialanalyse	38

4	Statische Messung und Kalibrierung von blendfreiem LED-Fernlicht	39
4.1	Statische Messung	40
4.1.1	Lichtsammelkasten	40
4.1.2	Goniophotometer	41
4.1.3	Referenzmessplatz	41
4.1.4	Prüfplatz	44
4.1.5	Messung mittels Fahrzeugkamera	46
5	Dynamische MatrixBeam-Online-Kalibrierung	51
5.1	Theoretische Systemauslegung	52
5.1.1	Systemanforderungen	52
5.1.2	Auslegung der Kalibriermarke	53
5.1.3	Lage der Kalibriermarke auf der Fahrbahn	56
5.1.4	Kontrast der Kalibriermarke	57
5.1.5	Detektion der Kalibriermarke	60
5.2	Dynamische Freifelduntersuchungen	61
5.2.1	Versuchsscheinwerfer	62
5.2.2	Einfluss der Fahrzeugdynamik	63
5.2.3	Einfluss von Umweltbedingungen	64
5.2.4	Einfluss des Fahrverhaltens	66
5.2.5	Detektionstoleranz der Online-Kalibrierung	66
5.2.6	Strategie zur Datenvalidierung	67
5.3	Zusammenfassung und Diskussion der Online-Kalibrierung	69
6	Experimentelle Untersuchungen zur Wahrnehmung und Blendung	70
6.1	Untersuchung zur Wahl der optimalen Lückenbreite	70
6.1.1	Versuchsaufbau	70
6.1.2	Versuchsdurchführung	72
6.1.3	Analyse der Versuchsergebnisse	74
6.1.4	Zusammenfassende Auswertung	78
6.2	MatrixBeam Begegnungsfahrt	78
6.2.1	Versuchsaufbau	79
6.2.2	Fragebogen	80
6.2.3	Versuchsdurchführung	81
6.2.4	Analyse der Versuchsergebnisse	83
6.2.5	Diskussion	96
6.3	Mindestabstand zu einer vertikalen Hell-Dunkel-Grenze	97
6.3.1	Versuchsaufbau	97
6.3.2	Versuchsdurchführung	98
6.3.3	Analyse der Versuchsergebnisse	99
6.3.4	Diskussion	103
6.4	Wahrnehmung des Schaltverhaltens	106
6.4.1	Versuchsaufbau	107
6.4.2	Versuchsdurchführung	109
6.4.3	Analyse der Versuchsergebnisse	109
6.4.4	Diskussion	114
6.5	Diskussion der experimentellen Untersuchungsergebnisse	115
7	Kritik und Ausblick	116
7.1	Ergebnisse der Arbeit	116



7.2 Anregungen für weitere Forschungsschwerpunkte	118
Abkürzungsverzeichnis	119
Literaturverzeichnis	120
Veröffentlichungen und betreute Arbeiten	127
Lebenslauf	129

Tabellenverzeichnis

2.1	Kennwerte von Halogen-, Xenon- und LED-Leuchtmitteln [2]	4
2.2	Häufigkeit der Fehlertypen mit Fehlerzustand größer 2 s [3]	15
2.3	Theoretischer Nutzungsgrad verschiedener Fernlicht-Assistenzsysteme	16
2.4	Erkennbarkeitsentfernung für Abblendlicht und für eine adaptive Hell-Dunkel-Grenze . . .	17
2.5	TÜV Report Mängelquoten der Lichteinstellung	19
2.6	Licht-Test Mängelquote für zu hoch eingestellte Scheinwerfer	20
5.1	Streubreiten der verschiedenen Gruppierungslängen	68
6.1	Mittelwerte der angenehmsten Lückenbreiten	78
6.2	Statistische Maßzahlen für die Messreihe der kritischen Abblendentfernung	89
6.3	Vergleich der eigenen Abblendentfernung mit denen von JOBSTVOGT und SPRUTE	89
6.4	Korrelationskoeffizienten für die Annäherungen von links und rechts	101
6.5	Korrelationskoeffizienten für 'unmerklich' zu 'gerade noch annehmbar'	101
6.6	Korrelationskoeffizienten für 'gerade noch annehmbar' zu 'unerträglich'	102
6.7	Kennzahlen für den Mindestabstand zu einer vertikalen MatrixBeam-Segmentgrenze . . .	105
6.8	Verwendete Parametervarianten	109

Abbildungsverzeichnis

1.1	MatrixBeam-Prinzip, Quelle: Audi	2
2.1	R8-Voll-LED-Scheinwerfer und A8-Voll-LED-Scheinwerfer	7
2.2	Explosionszeichnungen eines Glühlampen-Reflektors und des Audi A8 LED-Scheinwerfers	7
2.3	Kurvenlicht und adaptive Frontbeleuchtung, Quelle: Audi	10
2.4	Vergleich des Fernlichtassistenten, der adaptiven Hell-Dunkel-Grenze, des adaptiven Teilfernlichts und MatrixBeam	11
2.5	Fernlichtnutzung in den USA aufgeteilt nach Straßenkategorie und Altersgruppe	14
2.6	Unbewusste und bewusste Fernlichtnutzung auf der Landstraße	15
2.7	Automatische Steuerung einer adaptiven Hell-Dunkel-Grenze im Vergleich zur manuellen Fernlichtbedienung	16
2.8	Produktions-Scheinwerfer-Einstellportal, Werkstatt-Lichtsammelkasten	19
3.1	Topologie des MatrixBeam Gesamtsystems	22
3.2	Beschreibungsmodell der horizontalen Parallaxe	25
3.3	Entfernungs- und winkelabhängige Auswirkungen der Parallaxe	25
3.4	Beispiel für Parallaxe zwischen Kamera und Scheinwerfer	26
3.5	Verluste durch Parallaxe in Abhängigkeit zur Güte der Entfernungsklassifizierung	26
3.6	Verluste bei der Parallaxekorrektur durch verteilte MatrixBeam Optiken	27
3.7	Schaltungsaufbau und Screenshot der Oszilloskopmessung	29
3.8	Wesentliche Beitragsleister der Systemtotzeit	29
3.9	Erlebbarer, messbarer und blendender Bereich eines MatrixBeam Segments	31
3.10	Étendue-Erhaltung	33
3.11	Verschlechterung der Lückenqualität durch die Überlagerung von Segmenten	35
3.12	Toleranzbeitrag durch Verdrehung des Scheinwerfers um die Längsachse	37
4.1	Optisches Prinzip eines Lichtsammelkastens	40
4.2	Prinzipieller Aufbau eines KFZ-Goniophotometers	41
4.3	Skizze der Messaufbaus	43
4.4	Anordnung des LED Rasters an der Leinwand	43
4.5	Skizze zur Anordnung und Ausrichtung des Fahrzeugs zum Messplatz	44
4.6	Skizze des Prüfplatzes	45
4.7	Ausschnitt des Bildes der Fahrzeugkamera mit ungefiltertem und gefiltertem Querschnitt	46
4.8	Beispielsegment und Querschnitt mit eingezeichnetem Hot-Spot	46
4.9	Beispielsegment, separiertes Segment und zugehöriger Querschnitt	47
4.10	Beispielsegment, separiertes Segment und zugehöriger Querschnitt	47
4.11	Resultate des Canny- und des Laplacian of Gaussian-Kantenerkennungsoperators	48
4.12	Darstellung verschiedener Segmente und deren Canny-Operator Analysen	48
4.13	Vergleich eines Reflektorkonzepts mit einem Linsenkonzept	48
4.14	Vergleich einer Aufnahme der Fahrzeugkamera und der Leuchtdichtekamera	49
4.15	Vergleich der realen Segmentgrenzen mit Kalibriermerkmalen	49
5.1	Grundprinzip der projizierten Kalibriermarke	51
5.2	Teilprobleme der dynamischen Online-Kalibrierung	52
5.3	Punkt als Kalibrierungsmarke und Kreuz als Kalibrierungsmarke	55

5.4	Lichtkreuz und Schattenkreuz	56
5.5	Beispiele für einfach erzeugbare Kalibriermuster	56
5.6	Sichtgrenze des Fahrers und Sichtgrenze der Fahrzeugkamera	56
5.7	Aufbau und Ergebnisse der Probandenstudie zur Ermittlung der Sichtgrenzen	57
5.8	Versuchsaufbau zur experimentellen Bestimmung des „idealen Kontrasts“	58
5.9	Leuchtdichteaufnahme bei einer Punkt-Helligkeit von 60%	59
5.10	Pixelkollektiv der direkten Nachbarpixel und der indirekten Nachbarpixel	59
5.11	Ergebnisse der Kontrastuntersuchungen	60
5.12	Zeitliche Abfolge aus Kamerabelichtung und Kalibriermarkenmodulation	61
5.13	Integration der Lasermodule im Scheinwerfer	62
5.14	Einzelnes Bild der Fahrzeugkamera mit Punktlaser-Kalibriermarke	62
5.15	Theoretischer Einfluss von Nick- und Wankwinkel	63
5.16	Kompensation des Nickwinkeleinflusses auf den Detektionswinkel	63
5.17	Qualitativer Vergleich des Detektionswinkels in Abhängigkeit zur Straßenkategorien	64
5.18	Histogramm des Detektionswinkels nach Straßenkategorien	64
5.19	Qualitativer Vergleich des Detektionswinkels in Abhängigkeit zum Fahrbahnzustand	65
5.20	Histogramm des Detektionswinkels in Abhängigkeit zum Fahrbahnzustand	65
5.21	Geschwindigkeitsprofile des Fahrverhaltens 'vorausschauend' und 'aggressiv'	66
5.22	Histogramm des Detektionswinkels in Abhängigkeit zum Fahrverhalten	66
5.23	Detektionstoleranz der Online-Kalibrierung	67
5.24	Konzept zur Datenvalidierung mittels Gruppierung	68
5.25	Histogramm des Detektionswinkels in Abhängigkeit zur Gruppierungslänge	68
5.26	Vergleich der Gesamtanzahl zur Anzahl nutzbarer Fenster	69
6.1	Übersicht der Versuchsstrecke	71
6.2	Ausleuchtung des Straßenrandes im Verhältnis zur Lückenbreite	75
6.3	Anleuchtung des Vorausfahrenden im Verhältnis zur Lückenbreite	75
6.4	Wahrnehmung des Lichtkegels im Verhältnis zur Lückenbreite	76
6.5	Wahrnehmung von Lichtblitzen im Verhältnis zur Lückenbreite	76
6.6	Ausleuchtung vs. keine Blendung aus Sicht des MatrixBeam Fahrers	76
6.7	Beste Ausleuchtung aus Sicht des MatrixBeam Fahrers	76
6.8	Angenehmste Lückenbreite aus Sicht des MatrixBeam Fahrers	76
6.9	Vorausfahrender fühlt sich durch MatrixBeam Lichtkegel gestört	77
6.10	Vorausfahrender fühlt sich durch MatrixBeam Lichtkegel sicherer	77
6.11	Angenehmste Lückenbreite aus Sicht des vorausfahrenden Fahrers	77
6.12	Übersicht der Versuchsstrecke der Begegnungsfahrt	79
6.13	Verwendete DE-BOER-Skala	81
6.14	Wahrnehmbarkeit des sukzessiven Schaltens im Verhältnis zur Lückenbreite	84
6.15	Erfassung durch MatrixBeam nach erfolgtem ersten Abblenden	84
6.16	Erkennbarkeit verschiedener Lückenbreiten	85
6.17	Blendungsauffälligkeit im Verhältnis zur Lückenbreite	85
6.18	Störung des Gegenverkehrs durch das MatrixBeam Schaltverhalten	85
6.19	Wahrgenommene Lichtfunktion bei nebliger/klarer Sicht	86
6.20	Blendeindruck von MatrixBeam und Fernlicht relativ zu Abblendlicht	87
6.21	Entfernungen zur Blendquelle in Abhängigkeit des Blendeindrucks	88
6.22	Korrelation der Entfernungswerte	88
6.23	Vergleich der DE-BOER-Entfernungen der MatrixBeam-Fahrten	90
6.24	DE-BOER-Bewertung des Abblendlichts in 50 m Entfernung	90
6.25	Beleuchtungsstärkeverläufe der einzelnen Fahrten	91
6.26	Beleuchtungsstärke am Fahrerauge in Abhängigkeit zur psychologischen Blendung	92

6.27 Beschreibungsmodell für die Annäherung der zwei Fahrzeuge	93
6.28 Vergleich von angegebenenem und nach Schmidt-Clausen berechnetem Blendendruck	93
6.29 Äquivalente Schleierleuchtdichte L_s in Abhängigkeit zur psychologischen Blendung	94
6.30 Messschirm nach ECE-R 123	97
6.31 Übersicht der Versuchsstrecke zur Kantenuntersuchung	98
6.32 Versuchsablauf zur Charakterisierung der vertikalen Hell-Dunkel-Grenze	99
6.33 Positionen der Versuchsteilnehmer bei Annäherung von links	99
6.34 Positionen der Versuchsteilnehmer bei Annäherung von rechts	100
6.35 Korrelation der Positionen der Versuchsteilnehmer bei Annäherung von rechts und links	100
6.36 Korrelation der Positionen 'unmerklich' und 'gerade noch annehmbar'	101
6.37 Korrelation der Positionen 'gerade noch annehmbar' und 'unerträglich'	102
6.38 Positionen der Versuchsteilnehmer bei Annäherung auf mehrere Segmente	103
6.39 Korrelation der Positionen bei Annäherung auf mehrere Segmente	103
6.40 Mittelwerte und 95%-Perzentile der drei Durchführungsschritte im Vergleich	104
6.41 Blendbelastigung in Abhängigkeit zum Abstand zur MatrixBeam-Segmentgrenze	104
6.42 Qualitativer Gradientenvergleich der Abblendlicht und MatrixBeam Hell-Dunkel-Grenze	106
6.43 Ablaufdiagramm einer Objektentblendung	106
6.44 Übersicht der Versuchsstrecken	108
6.45 Form der verwendeten Dimmkennlinien	108
6.46 Wahrnehmung der Abdimmzeit	110
6.47 Wahrnehmung der Aufdimzeit	110
6.48 Wahrnehmung der Aufblendverzögerung	111
6.49 Wahrnehmbarkeit des Schaltens der Lichtsegmente	112
6.50 Kundentauglichkeit der Parametervarianten	112
6.51 Störung des Vorausfahrenden durch das Licht von MatrixBeam	112
6.52 Blendungseindruck des Vorausfahrenden nach DE-BOER-Skala	113
6.53 IST- und Wunsch-Zustand der Erlebbarkeit des Schaltens einzelner Lichtsegmente	113
6.54 Potential von MatrixBeam die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen	114

1 Einleitung

Eine gute Fahrzeugbeleuchtung ist einer der Schlüssel für sicheres und komfortables Autofahren bei Dunkelheit. Das menschliche Gehirn nimmt 90% aller Informationen über den Sehapparat auf [4]. Beim Führen eines Fahrzeugs werden sogar 96% der verkehrsrelevanten Informationen visuell aufgenommen [5]. Dabei fühlen sich knapp die Hälfte aller Autofahrer durch schlechte Sichtverhältnisse gestresst [6]. Jeder zweite Unfall wird durch Mängel in der visuellen Wahrnehmung verursacht [7]. Untersuchungen des Statistischen Bundesamtes zeigen, dass 40% der Verkehrsunfälle - und damit überproportional viele - zur Nachtzeit geschehen, wobei lediglich 20% des gesamten Verkehrsaufkommens in den Dunkelstunden anfällt. 34% der Autofahrer nutzen Fahrerassistenzsysteme um mehr Sicherheit im Straßenverkehr zu erhalten [6].

Mehr als die Hälfte aller Autofahrer empfinden die Bewältigung der Blendung durch entgegenkommende Verkehrsteilnehmer bei nächtlichen Fahrten als große Herausforderung. Knapp die Hälfte aller Autofahrer haben Probleme mit der rechtzeitigen Erkennung von Fußgängern und Hindernissen [8]. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass verstellte Scheinwerfer, unabhängig ob zu hoch, was zur Blendung des Gegenverkehrs führt, oder zu niedrig, was die Verschlechterung der eigenen Reichweite zur Folge hat, die größten Beitragsleister unter den Herausforderungen bei einer nächtlichen Autofahrt sind. Gemäß einer Statistik des jährlich durchgeführten „Licht-Test“ weist jedes vierte Fahrzeug in der Frontbeleuchtung deutliche Mängel auf. Bei jedem zehnten Fahrzeug sind die Scheinwerfer zu hoch eingestellt [9]. Gleichzeitig erhöhen Technologiehübe bei den Lichtfunktionen permanent die Anforderungen an die Lichteinstellung und das Blendungsrisiko steigt unter anderem durch technologische Fortschritte bei den Leuchtmitteln, die Performancesteigerungen bei der Ausleuchtung ermöglichen. Somit ist es höchste Zeit auch die Lichteinstellung zu revolutionieren, um dem Anspruch aktueller und zukünftiger Lichtfunktionen gerecht zu werden.

1.1 Die Evolution des Lichts im Fahrzeug

Historisch betrachtet ist das Fernlicht das eigentliche Fahrlicht. Der englische Begriff für Fernlicht (engl.: „main beam“) zeigt sehr anschaulich, dass die ursprünglich primär genutzte Lichtfunktion das Fernlicht war. Das Abblendlicht hingegen sollte ausschließlich für den Begegnungsverkehr eingesetzt werden um eine Blendung des Gegenverkehrs zu verhindern [10]. Mit steigender Verkehrsdichte wird die manuelle Bedienung des Fernlichts immer aufwendiger und dem Abblendlicht kommt zunehmend mehr Bedeutung zu.

Die Entwicklung von Fahrzeugscheinwerfern und insbesondere die Abblendlichtverteilung unterliegt immer dem Konflikt zwischen Optimierung der Sichtweite durch bessere Fahrbahnausleuchtung und Blendung des Gegenverkehrs durch zu helle Scheinwerfer [11]. Für die Sicherheit bei Nachtfahrten stellt eine einzige statische Lichtverteilung, die als Kompromisslösung für alle Fahrbahn-, Witterungsbedingungen und Fahrgeschwindigkeiten dienen muss, nicht die nach dem Stand der Technik optimale Lösung dar [12]. Bereits eine geringe Erhöhung der Beleuchtungsstärke oberhalb des Abblendlichts bietet einen erheblichen Mehrnutzen [13].

Aufgrund der historischen Entwicklung, die das Abblendlicht zunehmend zur hauptsächlich genutzten Lichtfunktion werden ließ, ist in der Vergangenheit primär das Abblendlicht verbessert worden. Das Fernlicht hatte schon immer das größere Potential, wurde aber aufgrund der geringen Nutzung kaum

weiterentwickelt. Statt die Fernlichtnutzung wieder zu erhöhen entstanden vorrangig neue Funktionalitäten auf Basis des Abblendlichts.

Verschiedene Studien aus den USA und aus Deutschland ermitteln die manuelle Fernlichtnutzung zwischen 3% und 30% der Fahrzeit bei Dunkelheit [14, 3, 10, 15]. Nach SPRUTE könnte zu 60% der Fahrzeit bei Dunkelheit mit Fernlicht gefahren werden [3]. Bezieht man automatisch gesteuerte Zwischenzustände zwischen dem Abblend- und dem Fernlicht mit ein, erhöht sich laut BÖHM et al. das Potential auf rund 87% der Fahrzeit [15]. Die gesunkene Fernlichtnutzung beruht nicht ausschließlich auf der größeren Verkehrsdichte, sondern entsteht teilweise auch durch die Bequemlichkeit der Fahrzeugführer. Viele vergessen das Aufblenden oder haben die Befürchtung zu spät abzublenden und dadurch andere Verkehrsteilnehmer zu blenden [1].

Neuartige adaptive Scheinwerfersysteme verbessern die Straßenausleuchtung, wodurch die Erkennbarkeitsentfernung gesteigert wird, was wiederum das Unfallrisiko reduziert. Objekte wie Menschen und Tiere sowie Hindernisse können früher wahrgenommen werden und es bleibt mehr Zeit um kontrolliert zu reagieren [16]. Eine zusätzliche Ausleuchtung birgt aber gleichzeitig immer das Risiko andere Verkehrsteilnehmer zu blenden und damit das Unfallrisiko wieder zu erhöhen.

Die Fahrzeugbeleuchtung profitiert seit einigen Jahren von etlichen Innovationssprüngen, insbesondere im Bereich der Leuchtmittel, welche einen ständigen Performance- und Funktionszuwachs ermöglichen. Speziell die Einführung von Voll-LED-Scheinwerfern, welche 2008 mit dem Audi R8 begann und sich inzwischen zum Standard in Oberklassefahrzeugen entwickelt hat, bietet neben großartigen Designmöglichkeiten und einer sehr angenehmen Lichtfarbe ein großes Potential, die Frontbeleuchtung mit komplett neuen Lichtfunktionen zu revolutionieren. Der Trend geht weg vom klassischen Fern- und Abblendlicht hin zu situativ gesteuertem Fahrlicht. Der nächste große Schritt in der LED Frontbeleuchtung besteht in der Einführung des blendfreien LED-Fernlichts MatrixBeam.

1.2 MatrixBeam - blendfreies LED-Fernlicht

MatrixBeam-Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass der Fahrer bei Dunkelheit dauerhaft mit Fernlicht fahren kann und nur die Bereiche, in denen sich andere Verkehrsteilnehmer befinden, abgeblendet werden. Dabei wird das Abblenden mechanikfrei über eine frei programmierbare LED-Matrix realisiert. Abbildung 1.1 stellt das MatrixBeam-Prinzip dar.



Abbildung 1.1: MatrixBeam-Prinzip, Quelle: Audi

Ein solches blendfreies Fernlicht eignet sich sehr gut um die teilweise kontroversen Anforderungen zu erfüllen. Es ermöglicht dem Fahrer jederzeit unabhängig von der Verkehrssituation eine bestmögliche Sicht auf Fernlichtniveau. Gleichzeitig vermeidet es die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer durch die automatische individuelle Entblendung.

Technisch ist die Umsetzung eines blendfreien Fernlichts auch ohne LED-Technik möglich. Die LED-Technologie ermöglicht jedoch eine sinnvollere Umsetzung eines blendfreien Fernlichts ohne mechanische Blenden oder andere Licht subtrahierende Methoden. Um dem Fahrer bei Systemen wie MatrixBeam eine bestmögliche Leistung zu ermöglichen ist es notwendig, das komplexe Lichtsystem, welches inzwischen weit über eine normale Frontbeleuchtung hinaus geht, im Gesamtfahrzeug optimal abzustimmen. Mittelfristig wäre ein Lösungsansatz zweckmäßig, bei dem die Scheinwerfer sich autonom kalibrieren. Dazu könnte der Scheinwerfer zusätzlich zu den normalen Lichtfunktionen Kalibriermarken projizieren, die es der Fahrzeugkamera ermöglicht Lage-Informationen über die Scheinwerfereinstellung zu generieren. Ein solcher Ansatz soll innerhalb dieser Arbeit diskutiert werden.

1.3 Ziele und Aufbau dieser Arbeit

In vielen Teilbereichen von MatrixBeam wird bereits seit geraumer Zeit geforscht und entwickelt. Insbesondere für die Ansteuerung und das optische System steht unterdessen ein breites Wissensspektrum zur Verfügung. Eine ausgereifte Objektdetektion besteht für bereits erhältliche Licht-Assistenzsysteme. Für MatrixBeam sind voraussichtlich lediglich kleine Anpassungen nötig. Offene Fragestellungen existieren vor allem in den folgenden Bereichen:

- Einstellung, Kalibrierung und Validierung der Systemeigenschaften über die Fahrzeuglebensdauer
- Wahrnehmung der neuen Lichtfunktion „MatrixBeam“

Die vorliegende Arbeit adressiert beide Bereiche. Der erste Teil der Arbeit diskutiert über Möglichkeiten zur statischen und zur dynamischen Kalibrierung des Systems. Die folgenden Fragestellungen stehen dabei im Vordergrund:

- Wie kann ein MatrixBeam-System kalibriert werden?
- Wie kann die Kalibrierung des Systems über die Fahrzeuglebensdauer sichergestellt werden?

Der zweite Teil der vorliegenden Arbeit klärt mit experimentellen Untersuchungen zur Wahrnehmung und Blendung die folgenden Fragestellungen:

- Wie groß muss eine Lücke sein, damit sie als angenehm empfunden wird?
- Wie nah darf das Licht an einen entblendeten Verkehrsteilnehmer heranreichen ohne dass dieser gestört und der eigene Fahrer verunsichert wird?
- Wie wird der Blendeindruck wahrgenommen verglichen mit bekannten Lichtfunktionen?
- Wie schnell und bei welcher Entfernung muss das System spätestens reagieren, damit es keine psychologische Blendung oder Irritation hervorruft?
- Fühlen sich der Fahrer oder andere Verkehrsteilnehmer durch die kontinuierliche Veränderung des Lichtbildes gestört?

Viele dieser Fragen konnten bislang aufgrund des zu wenig ausgereiften Entwicklungsstandes von Scheinwerfern und Ansteuerungen nicht sinnvoll bearbeitet und beantwortet werden. Inzwischen haben aber beide Teile eine akzeptable Reife erreicht. Die vorliegende Arbeit dokumentiert erste Forschungsergebnisse in diesen Bereichen und schafft so die Basis für ein rundum profitables Lichtsystem.

Darmstädter Lichttechnik

herausgegeben vom Fachgebiet Lichttechnik
der Technischen Universität Darmstadt

- Peter Lehnert: **Auswirkungen der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung von Scheinwerfern** · frühere Ausgabe: ISBN 978-3-89675-813-2 · 2., unveränderte Auflage
2013 · 330 Seiten · ISBN 978-3-8316-8013-9
- Alexander Totzauer: **Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht**
2013 · 148 Seiten · ISBN 978-3-8316-4295-3
- Tran Quoc Khanh: **10th International Symposium on Automotive Lighting – ISAL 2013 – Proceedings of the Conference** · Volume 15
2013 · 954 Seiten · ISBN 978-3-8316-4291-5
- Dominik Schneider: **Markierungslicht – eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern**
2011 · 170 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 Freidling: **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
- 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 Wambsgaß: **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