

BAND 9 | SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

STEFFEN MICHENFELDER

KONZEPTION, REALISIERUNG UND VERIFIKATION
EINES AUTOMOBILEN FORSCHUNGSSCHEINWERFERS
AUF BASIS VON DIGITALPROJEKTOREN



Steffen Michenfelder

**Konzeption, Realisierung und Verifikation
eines automobilen Forschungscheinwerfers
auf Basis von Digitalprojektoren**

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren

von
Steffen Michenfelder

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2014
Referenten: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2015

ISSN 2195-1152

ISBN 978-3-7315-0301-9

DOI: 10.5445/KSP/1000044632

**KONZEPTION, REALISIERUNG UND VERIFIKATION
EINES AUTOMOBILEN FORSCHUNGSSCHEINWER-
FERS AUF BASIS VON DIGITALPROJEKTOREN**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

des Karlsruher Instituts für Technologie

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Steffen Michenfelder

Geb. in

Bruchsal

Tag der mündlichen Prüfung: 18. November 2014

Hauptreferent:

Prof. Dr. rer. nat. Cornelius
Neumann

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

I DANKSAGUNG

Mein Dank gebührt an erster Stelle Prof. Cornelius Neumann, der mir ein verständnisvoller und umsichtiger Doktorvater war. Auf seine fachliche und moralische Unterstützung konnte ich stets bauen. Ein besonderer Dank gebührt meinen Eltern Carola und Walter, meinem Bruder Lucas, meiner Verlobten Nicole und den weiteren Angehörigen meiner Familie für die Hilfe, die sie mir während meines gesamten Studiums gewährten. Von all den großartigen Kollegen, mit denen ich während meiner Promotion arbeiten durfte, möchte ich speziell Christian Jebas herausheben, bei dem ich das Handwerk der automobilen Lichttechnik und die Durchführung von psychologischen Studien lernen durfte. Klaus Trampert danke ich für das umfangreiche, kritische Feedback (im positiven Sinne) zu meinen wissenschaftlichen Arbeiten. Mit einem tiefen Dank an meine Arbeitsgruppe, die OTIA, möchte ich meine Dankesworte beschließen.

Bad Schönborn, im November 2014

Steffen Michenfelder

II INHALTSVERZEICHNIS

I	Danksagung	I
II	Inhaltsverzeichnis.....	3
1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielstellung der Arbeit.....	6
1.3	Struktureller Aufbau	6
2	Stand der Technik.....	9
2.1	Adaptive Scheinwerfer	9
2.1.1	Sensorik.....	10
2.1.2	Verarbeitung.....	13
2.1.3	Aktorik.....	14
2.1.3.1	Mechanisch	14
2.1.3.2	Mikrospiegel-Pixellicht	15
2.1.3.3	Matrixförmige Segmentierung.....	19
2.1.3.4	Scannende Systeme	20
2.1.4	Konferenzbeiträge	21
2.2	Zusammenfassung	31

3	Entwicklung von Propix.....	33
3.1	Einleitung	33
3.2	Anforderungen an Propix	34
3.3	Technische Umsetzung.....	36
3.3.1	Lichtquellen.....	36
3.3.2	Räumliche Anordnung.....	39
3.3.3	Konstruktion des Racks.....	42
3.3.4	Energieversorgung.....	48
3.3.4.1	Leistungsaufnahme.....	48
3.3.4.2	Leistungsbereitstellung.....	49
3.3.4.3	Elektronische Komponenten.....	50
3.3.5	Sensorintegration	53
3.3.5.1	Interne Sensordaten	53
3.3.5.2	Externe Sensordaten.....	54
3.3.6	Benutzeroberfläche/Software.....	56
3.3.7	Bilderzeugung.....	59
3.3.8	Kalibrierung	62
4	Validierung des Systems.....	69
4.1	Einleitung	69
4.2	Statische Studie: Charakteristik von Ausblendungen	70

INHALTSVERZEICHNIS

4.2.1	Wissenschaftlicher Kontext	70
4.2.2	Forschungsfrage.....	71
4.2.3	Struktureller Aufbau der Studie	71
4.2.4	Durchführung	78
4.2.5	Analyse der Daten	81
4.2.6	Interpretation	95
4.2.6.1	Sichtweite.....	95
4.2.6.2	Blendung.....	96
4.2.6.3	Komfort 1	96
4.2.6.4	Komfort 2	97
4.2.7	Schlussfolgerung.....	98
4.3	Dynamische Studie: Vorfeldausleuchtung.....	101
4.3.1	Wissenschaftlicher Kontext	101
4.3.2	Forschungsfrage.....	106
4.3.3	Struktureller Aufbau der Studie	107
4.3.4	Durchführung	115
4.3.5	Analyse der Daten	123
4.3.5.1	Erkennbarkeitsentfernung.....	123
4.3.5.2	Psychologische Blendung	125
4.3.6	Interpretation	129
4.3.7	Schlussfolgerung.....	131

5	Zusammenfassung und Ausblick.....	133
5.1	Zusammenfassung.....	133
5.2	Ausblick.....	136
III	Literatur.....	139
IV	Abbildungsverzeichnis.....	151
V	Tabellenverzeichnis.....	163
VI	Anhang.....	165
Anhang A:	Abkürzungen.....	165
Anhang B:	Grundlagen.....	167
B.1	Lichttechnische Grundgrößen.....	167
B.1.1	Lichtstrom.....	167
B.1.2	Lichtstärke.....	168
B.1.3	Beleuchtungsstärke.....	168
B.1.4	Leuchtdichte.....	169
B.2	Digitale Projektoren auf DMD-Basis.....	170
B.3	Visuelle Wahrnehmung im Kraftfahrzeug.....	172
B.3.1	Flimmerverschmelzungsfrequenz ...	172
B.3.2	Regenbogeneffekt.....	172
B.3.3	Adaptation des Auges.....	173
B.3.4	Blendung.....	175

INHALTSVERZEICHNIS

Anhang C:	Projektoren	177
C.1	Lichtstärke	177
C.2	Graustufen	178
C.3	Spektrale Charakteristik	178
C.4	Datenblatt	179
C.5	Projektoreinstellungen	182
Anhang D:	Studie Ausblendung.....	185
D.1	Kommentare zu den Lichtverteilungen.....	185
D.1.1	Ausblendendes Fahrzeug (<i>Propix</i>)....	186
D.1.2	Ausgeblendetes Fahrzeug	189
D.1.3	Gesamter Versuchsaufbau (abschließender Kommentar).....	193
D.2	Statistische Auswertung	196
Anhang E:	Studie Vorfeld	200
E.1	Rohdaten.....	200
E.2	Statistische Auswertung	203
Anhang F:	Veröffentlichungen.....	206
Anhang G:	Betreute Arbeiten.....	209
Anhang H:	Verschiedenes.....	213
H.1	Datenblatt Makrolon®	213
H.2	Datenblatt Wechselrichter	214

INHALTSVERZEICHNIS

H.3	Datenblatt Monokamera Kalibrierung	215
H.4	Schaltplan Propix-Elektronik.....	216
H.4.1	Erläuterungen zum Schaltplan.....	217

Kapitel 1

EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Die vornehmliche Aufgabe der automobilen Lichttechnik liegt darin, die visuelle Leistungsfähigkeit der Teilnehmer des Straßenverkehrs auch bei geringer Umgebungshelligkeit sicherzustellen. Abbildung 1.1 veranschaulicht den Fall einer fehlenden Scheinwerferausleuchtung eines ländlichen Verkehrsraums. Wie gut zu erkennen ist, ist von der Straße nichts zu erkennen. Die nächtliche Fahrt gleicht einem Blindflug und ist mit einem enormen Sicherheitsrisiko verbunden. Für den Fahrzeugführer besteht in diesem Fall keine Möglichkeit, sich anhand bestimmter charakteristischer Merkmale wie Leitpfosten oder Markierungen im Straßenverkehr zu orientieren.

Die automobilen Lichttechnik verfolgt daher hauptsächlich das Ziel, durch eine gezielte Ausleuchtung dafür zu sorgen, dass relevante Objekte im Straßenverkehr rechtzeitig erkannt werden. Hierzu müssen durch Scheinwerfer die notwendigen Kontraste auf den Objekten erzeugt werden. Je höher diese sind, desto früher und

sicherer können die Objekte erkannt werden. Dies gibt den Fahrzeugführern die Möglichkeit, potentielle Gefahrensituation zu identifizieren und bestenfalls zu vermeiden.



Abbildung 1.1: Beispielhafte Straßenszene ohne jegliche Ausleuchtung durch Scheinwerfer; es sind keine Orientierungshilfen zu erkennen.

In Abbildung 1.2 ist dieselbe Szene wie in Abbildung 1.1 dargestellt. Der Unterschied liegt jedoch darin, dass der Fahrzeugführer das Fernlicht des Fahrzeugs aktiviert hat. Es ist offensichtlich, dass die Sichtbedingungen sich deutlich verbessert haben. Die nahende Rechtskurve wird rechtzeitig erkannt und der Fahrzeugführer kann sich problemlos im Straßenverkehr orientieren und fortbewegen.



Abbildung 1.2: Beispielhafte Straßenszene mit Ausleuchtung durch ein Fernlicht; die Orientierungshilfen wie die Leitpfosten, die Fahrbahnmarkierung oder die Verkehrszeichen sind gut zu erkennen.

Wie elementar eine gute Ausleuchtung des Verkehrsraums ist, wird deutlich, wenn die Art und Weise der Informationsaufnahme während der Fahrt betrachtet wird. Laut Eckert [1] werden 90 % der benötigten Informationen während der Fahrt visuell aufgenommen. Wie oft die visuelle Leistungsfähigkeit unzureichend ist, zeigen Untersuchungen von Funk [2]. Er gibt an, dass für etwa 50 % der Verkehrsunfälle eine mangelnde visuelle Erkennung die entscheidende Rolle spielt. Gerade nachts sind die Sichtbedingungen naturgemäß ungünstig. So ist das Risiko für einen Fußgänger, nachts zu verunglücken, nach Locher [3] um einen Faktor vier im Vergleich zu tagsüber erhöht. Gemäß Lee [4] beträgt der Faktor sogar sieben. Mit entscheidend hierfür ist die Kleidung der

Fußgänger, die in 80 % der Fälle dunkel ist und demzufolge einen geringen Kontrast zum dunklen Umfeld darstellt [3].

Der Schluss liegt nahe, für nächtliche Fahrten dauerhaft ein Fernlicht mit hoher Intensität zu verwenden, um die für die Erkennung notwendigen Kontraste auf den Objekten zu erzeugen. Diese Methode hat vor 125 Jahren auch gut funktioniert, als die Fahrzeuge nur langsam vorankamen und auf 100 Kilometer Fahrstrecke nur eine Pferdekutsche kam. Bei der heutigen Verkehrsdichte und -dynamik ist es klar ersichtlich, dass eine dauerhafte Fernlichtfahrt ausgeschlossen ist. Die Scheinwerfer des Fahrzeugs dürfen nicht derart hell sein, dass sie die visuelle Leistungsfähigkeit und den Fahrkomfort anderer Verkehrsteilnehmer reduzieren.

Die automobilen Lichttechnik verfolgt daher seit etwa 100 Jahren das Ziel, so viel Licht wie möglich auf die Straße zu bringen und gleichzeitig Blendung jeglicher Art zu vermeiden.

Um entgegenkommende sowie vorausfahrende Fahrzeuge vor einer übermäßigen Blendung zu schützen, wurde 1915 zunächst das Abblendlicht gesetzlich vorgeschrieben. Es verfügte zu Beginn über eine symmetrische „Hell-Dunkel-Grenze“ (HDG), die die Reichweite der Scheinwerfer im Vergleich zum Fernlicht deutlich beschränkte. Höhere Geschwindigkeiten der Fahrzeuge sowie eine steigende Verkehrsdichte führten 1957 zur Einführung des asymmetrischen Abblendlichts mit seinem charakteristischen Knick. Die Reichweite der Scheinwerfer auf der eigenen Fahrbahn konnte dadurch

deutlich gesteigert werden, was zu einer höheren Sicherheit sowohl für den Fahrer selbst wie auch für Radfahrer und Fußgänger führte.

Der Adaptionsgrad automobiler Scheinwerfer wurde in jüngerer Vergangenheit durch Applikationen wie die AFS-Funktionen deutlich erhöht. Die Scheinwerfer passen sich hierbei Umweltbedingungen wie Regen oder Nebel sowie wechselnden Straßengeometrien (Landstraße, Autobahn, Stadt) an.

Aktuelle Entwicklungen zielen darauf ab, mittels Kamera-, Radar- oder Lidartechnik andere Verkehrsteilnehmer und relevante Objekte im Straßenraum zu erkennen. Die gewonnenen Sensordaten werden beispielsweise dazu verwendet, die Lichtverteilung an einer definierten Position abzdunkeln (vertikale HDG). Alternativ können hierdurch auch markierende Funktionen oder eine adaptive HDG realisiert werden. Schließlich verkörpern Matrixscheinwerfer, welche die Ausleuchtung des Straßenraums segmentiert durchführen können, die derzeit fortschrittlichste Technologie.

Funktionen der automobilen Lichttechnik müssen genauso wie die anderen Bereiche des Fahrzeugs hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Physiologie des Fahrzeugführers wissenschaftlich untersucht werden. Speziell hinsichtlich der physiologischen Interaktion zwischen Lichttechnik und Fahrzeugführer besteht ein großes Forschungspotential. Hierfür stehen im Zuge der steigenden Innovationsgeschwindigkeit allerdings immer weniger zeitliche und finanzielle Ressourcen zur Verfügung.

1.2 ZIELSTELLUNG DER ARBEIT

In Bezug auf die zuvor angesprochenen knappen Ressourcen befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Frage, wie aktuelle sowie zukünftige Technologien der automobilen Lichttechnik kosten- und zeiteffizient, dabei aber realitätsgetreu und mit hoher Validität abgebildet werden können. Hierzu soll eine multifunktionelle Plattform konzipiert und umgesetzt werden, welcher die drei folgenden Aspekte zugrunde liegen:

- *Variable Intensität des Scheinwerfers*
- *Pixelgenaue Definition der räumlichen Verteilung*
- *Dynamischer Wechsel zwischen verschiedenen Lichtverteilungen*

Die entwickelte Plattform soll sich für vielfältige Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Physiologie im Kontext der automobilen Scheinwerfertechnik nutzen lassen. Um speziell eine mobile und realitätsgetreue Einsatzfähigkeit zu erzielen, ist die Integration der Plattform in ein Fahrzeug elementarer Bestandteil. Eine Validierung der geschaffenen Plattform unter Zuhilfenahme von Probandenstudien vervollständigt die vorliegende wissenschaftliche Abhandlung.

1.3 STRUKTURELLER AUFBAU

Insgesamt gliedert sich die Arbeit in drei große Abschnitte. Zunächst wird der aktuelle Stand der Technik im Hinblick auf adaptive Scheinwerfer dargestellt. Darauf aufbauend werden im nächsten Kapitel Konzeption und Konstruktion eines Forschungs-

scheinwerfers beschrieben. Abschließend werden Durchführung und Analyse zweier Probandenstudien erläutert, die zur Validierung des Scheinwerfersystems vorgenommen wurden. Die für das Verständnis notwendigen Grundlagen sind dem Anhang Grundlagen zu entnehmen.

Kapitel 2

STAND DER TECHNIK

2.1 ADAPTIVE SCHEINWERFER

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Technik im Bereich adaptiver automobiler Scheinwerfer. Als Scheinwerfer wird im Folgenden immer das Gesamtsystem, aus mindestens zwei Teilscheinwerfern bestehend, angesehen. Auf der einen Seite erstreckt sich die Literaturrecherche auf Patentschriften und auf der anderen Seite auf Veröffentlichungen in Tagungsbänden, Fachzeitschriften oder ähnlichem. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Artikel thematisch gegliedert, wobei die Quellen innerhalb der Themen chronologisch aufsteigend angeordnet sind.

Grundlegende Überlegungen, wie die Sichtweite des Fahrzeugführers erhöht werden kann, ohne dass andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden, stellte Zuse [5] bereits 1967 an. Die Verwendung von polarisiertem Licht in Kombination mit entsprechenden Polarisationsfiltern in den Fahrzeugscheiben hält er für eine effektive Lösung des Problems. Allerdings sei diese nicht praktikabel, da von heute auf morgen sämtliche Fahrzeuge umgerüstet und

somit eine hundertprozentige Akzeptanz dieser Technologie vorausgesetzt werden müssten. Stattdessen vertritt Zuse die Ansicht, eine Kombination aus Lichtsensoren, Verarbeitungslogik und einer Anzahl an lichterzeugenden Elementen stelle eine realisierbare Lösung des oben genannten Problems dar. Der technologische Fortschritt war jedoch zu der Zeit von Zuse nicht weit genug gediehen, um seine Lösungsvorschläge umsetzen zu können. Die nachfolgend beschriebenen Patente basieren auf Zuses prinzipiellem Aufbau eines idealen Scheinwerfers, der über eine Art von Sensorik, Verarbeitung und Aktorik verfügt.

2.1.1 SENSORIK

Zuse [5] schlägt eine matrixförmige Anordnung von Photodioden vor, mit deren Hilfe bestimmt werden kann, aus welcher Raumrichtung das Licht eines entgegenkommenden oder vorausfahrenden Fahrzeugs stammt.

Das darauffolgende Patent stammt von Kretschmer [6] aus dem Jahr 1987 und greift dieselbe Idee auf. Die Erfindung, in Abbildung 2.1 dargestellt, beschreibt einen Abblendlichtscheinwerfer, der über einen Sensor in Form einer Diodenmatrix verfügt. Letztere ist aus mindestens 144 und maximal 1296 Dioden aufgebaut (Verhältnis Breite zu Höhe 4:1). Parameter wie die Fahrbahnbeschaffenheit, die Verkehrsdichte und vor allem die aktuelle Fahrgeschwindigkeit werden für die weitere Verarbeitung aufgenommen.

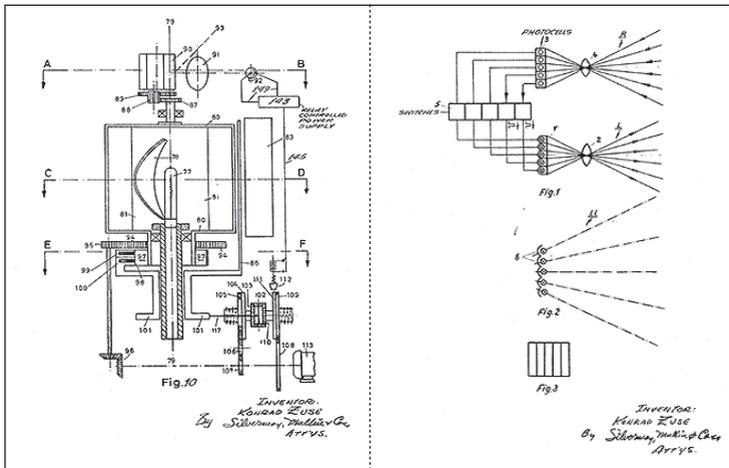


Abbildung 2.1: Links: Prinzip der lichterzeugenden Einheit bestehend aus Reflektor, Lichtquelle, dazugehöriger Mechanik und Energieversorgung
 Rechts: Anordnung von Photodioden, um das Licht anderer Verkehrsteilnehmer zu detektieren [5]

Kobayashi [7] erachtet als relevante Fahrinformationen für aktive Scheinwerfer die Form und die Struktur sowie die Spezifikation und Einstufung der Straße (Landstraße, Autobahn, Bergstraße). Weiterhin nennt er in diesem Zusammenhang das Gelände und das Gebiet um das Fahrzeug, entgegenkommende oder vorausfahrende Fahrzeuge, die Verkehrsdichte, die Umgebungsleuchtdichte sowie die Wetterbedingungen. Zusätzlich seien Vorhersagen über den Fahrvektor des Fahrzeugs (mittels Blinker, Lenkwinkel, Bremse, Beschleunigung, Geschwindigkeit) wichtig.

Stam [8] schlägt den Einsatz eines Multipixel Bildsensors vor, der die Lage des Fahrzeugs im Straßenraum bestimmt bzw. schätzt. Mit zwei vor dem Pixelsensor befindlichen Linsen, von denen je einer mit einem roten und mit einem blauen Filter bedeckt ist, gelangt nur das Signal von Heckleuchten bzw. nur von Scheinwerfern auf den Sensor, wodurch der Kontrast zwecks Objekterkennung deutlich erhöht werden kann. Garnitz [9] führt in seiner Erfindung eine videobasierte Erkennung von anderen Fahrzeugen sowie des Nick- und Gierwinkels aus. Die Videoerkennung bietet gegenüber Sensordaten von z.B. den Stoßdämpfern den Vorteil, den weiteren Verlauf der Fahrbahn vorhersagen zu können.

Die Radartechnologie der adaptiven Fahrgeschwindigkeitsregelung als Sensor zu verwenden, wird von Neumann [10] in einem Patent vorgeschlagen. Die Idee liegt hierbei darin, die HDG des Abblendlichts so nah wie möglich an ein erkanntes vorausfahrendes Fahrzeug anzunähern, um Sichtweite zu gewinnen, ohne den anderen Fahrer zu blenden. Dieser Vorgang sollte möglichst kontinuierlich erfolgen und keine wahrnehmbaren Sprünge aufweisen. Für den Fall, dass sich ein vorausfahrendes Fahrzeug in einem sehr geringen Abstand befindet, schlägt Neumann vor, das nicht benötigte Licht auf geeignete Art und Weise (ohne dies genauer zu spezifizieren) in die Nah- und Seitenbereiche des eigenen Fahrzeugs zu lenken. Ebenso ermöglicht eine Nutzung der Radardaten ein automatisch abblendendes Fernlicht, welches eventuell mit einer Kameraerkennung ergänzt werden kann.

2.1.2 VERARBEITUNG

Zuse [5] gibt nur allgemein an, dass eine elektronische Verarbeitungseinheit die Informationen der Sensorik in Steuerbefehle für die lichterzeugenden Einheiten umwandelt.

Garnitz [9] beschreibt, ohne ins Detail zu gehen, eine Bildauswerteeinheit, die Steuerbefehle an die Aktuatoren der Scheinwerfer sendet. Die Leuchtweite und die Leuchtrichtung werden entsprechend den ermittelten Werten angepasst. Bei Erkennung von Scheinwerfern anderer Fahrzeuge ist nach Garnitz automatisch von Fernlicht auf Abblendlicht umzuschalten.

Cardanha [11] verarbeitet die Zustandsdaten mittels eines Mikroprozessors, um einen weichen Übergang von einer Lichtstrahlform zur anderen bei wechselnden Zuständen zu ermöglichen. Der Prozessor arbeitet dabei sowohl mit boolescher als auch mit Fuzzy-Logik. Es erfolgen zwei Berechnungsschritte: Im ersten Schritt werden Umgebungs- und Fahrzeugzustandsdaten mit boolescher Logik und „wenn/dann“-Vorschriften verarbeitet. Der zweite Schritt bedient sich der Fuzzy-Logik und berechnet die Lichtstrahlform durch Verlaufsrechnungen. Ein Beispiel für den zweiten Verarbeitungsschritt ist das Abschätzen der Verkehrsdichte durch den Anteil der Bremszeit. Zusammen mit dem ersten Verarbeitungsschritt „Erkennen eines entgegenkommenden Fahrzeuges“ wird das Fernlicht bei entsprechender Verkehrsdichte gegebenenfalls komplett deaktiviert.

2.1.3 AKTORIK

2.1.3.1 MECHANISCH

Zuse [5] beschreibt die notwendige Aktorik als ein feldförmige Anordnung, die jeweils aus einer Lichtquelle und einem Reflektor besteht. Der Reflektor kann entsprechend mechanisch positioniert werden, um die Lichtstrahlen je nach Vorhandensein von anderen Verkehrsteilnehmern gezielt in eine Raumrichtung zu leiten.

Bei Kretschmer [6] wird die Abbildungsoptik in Form zweier Linsen mithilfe eines Stößels gemäß dem von einem verarbeitenden Prozessor ausgegebenen Signal ausgerichtet. Eine mechanisch verstellbare Blende kann die Reichweite des Abblendlichts an die Fahrsituation anpassen.

Neumann [12] nutzt mehrere Scheinwerferuntereinheiten, die jeweils aus einer Lichtquelle und einer geeigneten Lichtlenkung (Linse oder Reflektor) bestehen. Diese werden dann entsprechend zu- oder abgeschaltet, um die Ausleuchtung des Verkehrsraums dynamisch zu gestalten.

Stam [8] beschreibt mehrere Methoden, die Abstrahlrichtung von Scheinwerfern zu beeinflussen. Zum einen ist dies eine Verschiebung/Drehung des gesamten Systems, z.B. mithilfe von Schrittmotoren. Zum anderen kann auch nur die Lichtquelle bewegt oder moduliert werden, um die Richtung und Intensität der Lichtstrahlen zu ändern. Die Lage der Lichterzeugung kann beispielsweise

durch *magnetodynamisches Positionieren* (MDP), was vor allem bei HID-Lampen eingesetzt werden kann, erfolgen.

Eine einfache Anpassung der HDG wird von Gottwald [13] ausgeführt. Dabei werden entweder schwenkbare Reflektoren oder eine Verdrehung des gesamten Systems mittels Stellmotoren eingesetzt. Ebenfalls integriert ist eine einfache Umschaltung zwischen Rechts- und Linksverkehr.

2.1.3.2 MIKROSPIEGEL-PIXELLICHT

Im Jahr 1997 erwähnt die Erfindung von Hege [14] erstmals den Einsatz der DMD-Technologie der Fa. Texas Instruments, um eine lichtlenkende Optik mit hoher räumlicher Auflösung zu erhalten. Als Lichtquelle wird eine Gasentladungslampe verwendet. Der Grundgedanke der Erfindung ist in Abbildung 2.2 skizziert.

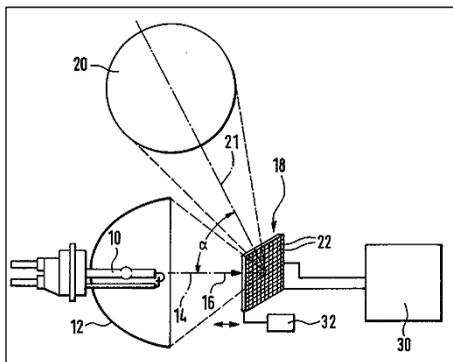


Abbildung 2.2: DMD-Technologie als lichtlenkendes Element in einem automobilen Scheinwerfer nach Hege [7]

Kobayashi [7] führt in einer Erfindung ebenso bewegliche Mikrospiegel als lichtlenkende Elemente auf. Eine Alternative dazu sei es, das gesamte (konventionelle) optische System auf einer Welle zu rotieren.

Die Erfindung von Enders [15] beschreibt gleichfalls den Einsatz von Mikrospiegeln. Ein Auszug aus der Erfindungsmeldung ist in Abbildung 2.3 skizziert. Die Einrichtung kann zwischen zwei Zuständen umschalten und Beleuchtungsfunktionen wie Abblendlicht, Fernlicht, Nebellicht etc. mit nur einer Lichtquelle erzeugen. Um die prinzipbedingte niedrige Effizienz der Mikrospiegeltechnologie (vergleiche hierzu Anhang Digitale Projektoren auf DMD-Basis) zu verbessern, schlägt der Erfinder vor, das nicht benötigte Licht statt auf einen Absorber in andere Beleuchtungsfunktionen (z.B. Schlusslicht oder Innenraumbeleuchtung) zu leiten. Eine weitere denkbare Möglichkeit sei es, den Absorber photovoltaisch arbeiten zu lassen und damit wieder elektrische Energie aus dem ungenutzten Licht zu erzeugen.

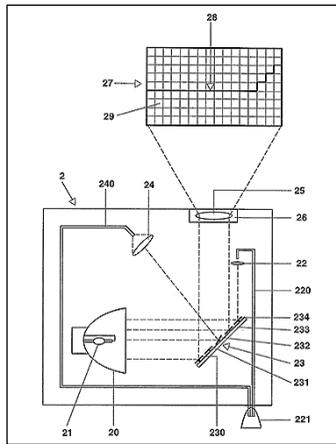


Abbildung 2.3: Die Erfindung von Enders [15] beschreibt ein Scheinwerfersystem bestehend aus einer Gasentladungslampe (21), einem Mikrospiegelarray (23) und zwei nachgeschalteten Optiken.

Eine weitere Variante der Mikrospiegeltechnologie beschreibt Lehnert [16]. Dabei handelt es sich um sogenannte Membranspiegel, mit deren Hilfe das Licht mit hoher räumlicher Auflösung und nur unter Verwendung einer einzigen optisch aktiven Fläche gelenkt werden kann.

Eichhorn führt in seiner Erfindung von 2003 [17] die Umsetzung einer Mikrospiegelanordnung zur Erzeugung von dynamischen Lichtverteilungen aus. Als Basislicht schlägt er eine Stadtlichtverteilung vor, da im Nahbereich vor dem Fahrzeug keine dynamischen, adaptiven Funktionen benötigt würden. Um seine Idee technisch umzusetzen, platziert er ein Mikrospiegelarray direkt hinter ein

konventionelles Projektionssystem oder baut alternativ den sammelnden Reflektor selbst aus Mikrospiegeln auf.

Eine Erhöhung der Effizienz von DMD-basierten Scheinwerfern wird neben der Erfindung von Enders [15] auch in zwei Patentschriften von Kauschke ([18], [19]) beschrieben. Ein Vorschlag basiert auf einer vorgelagerten Fokussierung der Lichtstrahlen der Lichtquelle auf den mittleren Bereich des DMD-Arrays. Hier wird gemäß der Erfindung am meisten Licht benötigt. In den weniger wichtigen Randbereichen lässt sich somit Lichtstrom sparen. Eine zweite Möglichkeit der Effizienzerhöhung wird durch die Verwendung von zweiachsig kippbaren Mikrospiegeln erzielt.

Reiners [20] führt in einem Patent die Laserdiode bzw. die Superlumineszenzdiode als Lichtquelle für automobiler Scheinwerfer auf. Über eine Mikrospiegelanordnung wird das Licht auf einen Leuchtstoff gelenkt, der das kurzwellige Licht zum Teil in langwelligeres Licht konvertiert und damit den Gesamtfarbeindruck von Weiß erzeugt. Durch die Mikrospiegel kann die Lichtverteilung dabei beliebig moduliert werden.

Schnerr [21] verweist in einer Erfindung ebenso auf die DMD-Technologie zur Lichtlenkung. Auch er bemängelt die geringe Energieeffizienz. Dem herkömmlichen DMD-System wird daher ein zweites optisches System hinzugefügt, welches das Licht, beispielsweise beim Abblendlicht, unscharf in den Nahbereich der Lichtverteilung lenkt und das Licht somit effektiv genutzt werden kann.

Ein großer Vorteil des Systems ist, dass neben den Mikrospiegeln keine weitere Mechanik mehr notwendig ist. Die Mikrospiegel haben dabei drei Zustände:

- *Erstes optisches Element*
- *Zweites optisches Element*
- *Absorber*

Horn [22] lagert in einer Erfindungsmeldung Mikrospiegel in einem lichtdurchlässigen Medium, welches eine höhere Dämpfung als Luft aufweist. Damit soll die Anfälligkeit der Mikrospiegel für ungewollte Vibrationen (speziell bei unebener Fahrbahnbeschaffenheit) verringert werden.

2.1.3.3 MATRIXFÖRMIGE SEGMENTIERUNG

Watanabe [23] schlägt vor, eine LED auf einer schwenkbaren Unterlage zu positionieren und somit die Richtung der Lichtstrahlen zu verändern. Sein Scheinwerfer besteht, wie aus Abbildung 2.4 ersichtlich wird, aus mehreren LED-Modulen, von denen jedes einen Teil der gesamten Lichtverteilung abdeckt.

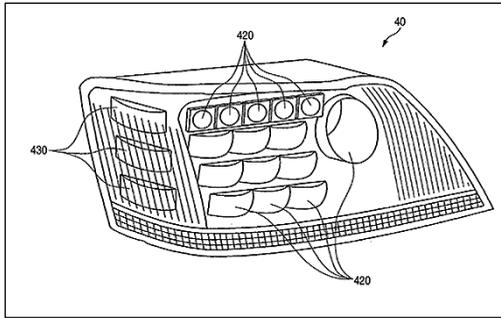


Abbildung 2.4: Einzelne Segmente mit LED als Lichtquellen werden zur Gesamtlichtverteilung auf der Straße zusammengesetzt [23].

Ackermann [24] verwendet in seiner Erfindungsmeldung ein Feld aus Leuchtdioden mit einer gemeinsamen Abbildungsoptik, welches zur Erzeugung einer matrixförmigen Ausleuchtung der Straße verwendet wird.

2.1.3.4 SCANNENDE SYSTEME

Erdl [25] setzt einen Scheinwerfer mit Reflexionssystem ein, welcher einen kippbaren Spiegel im Strahlengang aufweist. Dadurch können mit einer einzigen Lichtquelle mehrere Lichtfunktionen erzeugt werden.

Bony [26] verfolgt in einem Patent den Ansatz, drei Laserlichtquellen (RGB) mittels eines Mikrospiegelarrays und sekundärer Spiegelemente derart zu lenken, dass jede beliebige Lichtverteilung erzeugt werden kann. Dabei kann insbesondere die spektrale

Charakteristik beliebig gewählt werden. Das Patent umfasst dabei sowohl den Einsatz eines Mikrospiegelarrays als auch eines scannenden Systems.

2.1.4 KONFERENZBEITRÄGE

Die Konferenzbeiträge umfassen das *International Symposium on Automotive Lighting* (ISAL) in Darmstadt, die VDI-Tagung *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* (VDI OTIA) sowie die Konferenz *Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving* (VISION) in Versailles.

Enders [27] gibt auf der ISAL 2001 Anwendungsbeispiele für ein Pixellicht:

- *Reichweitenregulierung, Umschaltung Linksverkehr auf Rechtsverkehr*
- *Markierungslicht oder spezielle Ausblendung von Objekten*
- *Informationen auf die Straße projizieren*

Enders sieht das Pixellicht als ergänzendes Scheinwerferelement.

Auf der ISAL 2003 spricht Kauschke [28] von drei Adaptationsschritten bei aktiven Scheinwerfern :

- *Die Lichtverteilung passt sich den Gegebenheiten der Verkehrssituation und den Bedürfnissen des Fahrers an*
- *Die Lichtverteilung wird angepasst, um eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu verhindern*
- *Objekte werden markiert*

Dabei benennt er vier Arten, aktive Scheinwerfer umzusetzen:

- *Additive Erzeugung (konventionelle Scheinwerfer z.B. mit Reflektoren, LED-Matrix)*
- *Subtraktive Erzeugung (Projektionsscheinwerfer, Pixellicht)*
- *Variable optische Systeme (bewegliche Linsen, scannende Systeme)*
- *Hybridsysteme: Eine Kombination aus den zuvor beschriebenen Methoden*

Auf der ISAL 2005 vertritt Götz [29] die Meinung, dass drei mögliche optische Konzepte für aktive Scheinwerfer in Frage kommen:

- *Scannender Scheinwerfer*
- *DMD Scheinwerfer*
- *LED-Array*

Roslak [30] geht auf derselben Konferenz davon aus, dass aktive Scheinwerfer vier Hauptfunktionen (H_n) und zwei Nebenfunktionen (N_m) erfüllen sollen:

- *H1: Fernlichtnutzung abhängig von anderen Verkehrsteilnehmern (Vermeidung von Blendung)*
- *H2: Markierungslicht: Erzeugung hoher Kontraste auf potentiellen Gefahrenobjekten*
- *H3: Anpassung an die Straßentopologie (Kurvenlicht, Bergfahrt)*
- *H4: Fahrerspezifische Einstellung der Lichtcharakteristik (z.B. Schärfe der HDG, Gradienten)*

- *N1: Navigationsdarstellungen auf der Straße*
- *N2: Optische Kommunikation mit anderen Fahrzeugen – unsichtbar für die Fahrer mittels bestimmter Modulationen*

Auf der ISAL 2007 beschreibt Könning [31] die Sensorfusion als Technologie der Zukunft, um eine zuverlässige Erkennung zu gewährleisten.

2008 berichtet Yamamura auf der Konferenz VISION [32] von einem Versuchsfahrzeug, das über ein Projektorrack im Frontbereich verfügt (Abbildung 2.5). Das Fahrzeug ist mit einer Kamera zur Objektdetektion und einem Steuerrechner ausgerüstet. Yamamura macht keine Angaben zur Leistungsaufnahme, den technischen Spezifikationen, der Software oder ähnlichem.

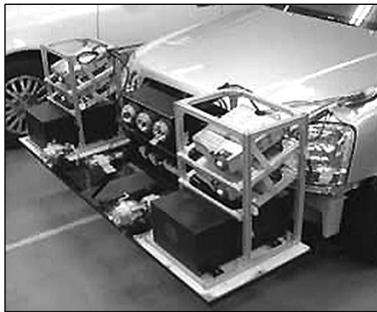


Abbildung 2.5: Versuchsfahrzeug mit Projektorrack im Frontbereich; aufgebaut und vorgestellt von Yamamura [31]

Auf der ISAL 2009 erläutert Hummel [33] die Effizienz von *Adaptive Driving Beam* (ADB) Systemen. Ein Pixellicht erreicht dabei eine Effizienz von 98,2 %, ein Matrixbeam mit 32 Segmenten 91,4 %.

Um die Pixelanzahl zu reduzieren, schlägt Hummel größere Segmente in den Randbereichen vor, wo keine scharfen Kanten benötigt werden.

Auf derselben Konferenz stellt Moisel einen LED-Matrixscheinwerfer in einem Versuchsfahrzeug mit 96 Pixeln vor [34]. Das Grundlicht wird durch ein konventionelles System erzeugt, das LED-Array steht für die ADB-Applikationen zur Verfügung. Moisel sieht die Hauptfrage von LED-Arrays darin, ob es möglich ist, keine Lücken zwischen den einzelnen Pixeln zu haben und ob gleichzeitig scharfe Kanten darstellbar sind. Generell ist ungeklärt, wie viele Pixel in welchem Bereich in welcher Größe benötigt werden. Hier besteht gemäß Moisel noch großer Forschungsbedarf.

Auf der ISAL 2011 stellt Moser [35] ein LED-Matrixsystem vor, welches aus einer gemeinsamen Projektionsoptik für mehrere LEDs besteht, die in einem Array angeordnet sind. Vorteile dieser Topologie sind einfachere Kontaktierung und Abführung der Wärme. Auch lassen sich dadurch laut Moser die Kanten der einzelnen Segmente scharf darstellen. Nachteilig sind Farbränder durch chromatische Aberration. Die Vor- und Nachteile würden sich umkehren, wenn Freiformreflektoren anstatt einer Projektionsoptik verwendet werden würden.

Schmidt erläutert, ebenso auf der ISAL 2011 [36], das Konzept eines voll-adaptiven Scheinwerfersystems. Generell sollte so viel Licht wie nötig, aber so wenig wie möglich verwendet werden, um einen

ökonomischen Scheinwerfer zu erhalten. Als Beispiel führt er Stausituationen an, in denen der Lichtstrom ohne eine signifikante Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit reduziert werden kann, um Energie zu sparen. Die Leuchtmitteltechnologie seiner Wahl ist die LED.

Lee [37] stellt weiterhin einen DMD-Scheinwerfer vor, der sich einer Xenonlampe als Lichtquelle bedient. Die Optik vor den DMD-Chips besteht aus sechs Linsen, um u.a. die chromatische Aberration zu korrigieren. Die Effizienz des Scheinwerfers ist deutlich zu gering und der DMD-Scheinwerfer insgesamt zu lichtschwach, passt aber in ein konventionelles Scheinwerfergehäuse.

Auf der VDI OTIA 2012 präsentiert Böhm [38] einen Matrixscheinwerfer bestehend aus vier Modulen mit je vier LEDs. Die einzelnen Segmente haben einen Öffnungswinkel von $1,5^\circ$ horizontal und 8° vertikal. $1,5^\circ$ wird als die optimale Segmentgröße angegeben, eine valide Begründung hierfür wird jedoch nicht angeführt. Der Lichtstrom des Matrixsystems liegt bei 800 lm und 120 lx (in 25m) im Maximum.

Das ideale Fernlicht/ADB ermöglicht es laut Albou (VISION 2012) [39], dunkle Bereiche beliebig innerhalb der Lichtverteilung zu positionieren. Albou favorisiert als kurz- und mittelfristige Lösung einen Matrixscheinwerfer. Der Pixelscheinwerfer ist seiner Meinung nach eine langfristige Lösung, die dem Matrixscheinwerfer dem Prinzip nach aber überlegen ist. Ohne dies näher zu begründen gibt er eine Mindestbeleuchtungsstärke in Höhe von 120 lx (in 25 m) für

Matrixscheinwerfer an. Problematisch sind für ihn die Übergänge zwischen den einzelnen Segmenten, da es hier zu Inhomogenitäten in der Lichtverteilung kommen kann.

Auf der ISAL 2013 stellt Hoffmann [40] den Prototypen eines Matrixscheinwerfers basierend auf 80 LED-Pixeln vor. Ein ADB-System besteht für ihn aus Sensoren, Algorithmen zur Lichtkontrolle und dem Scheinwerfer selbst. Eine Sensorfusion ist obligatorisch, damit der Algorithmus die optimale Lichtverteilung berechnen kann. Er schlägt vor, dass der Algorithmus unabhängig vom Scheinwerfertyp geometrische Daten (Breite, Länge, Höhe der Ausblendungen wie auch der Markierungen) sowie Intensitätswerte für die Lichtverteilung als Ausgabe liefert.

Hamm [41] weist auf den ersten Serieneinsatz eines Matrixscheinwerfers im Audi A8 hin. Hier werden 50 Segmente mit LEDs als Lichtquellen verwendet.

Yamamura [42] nutzt ein scannendes System mit einem rotierenden Spiegel, um das Fernlicht zu erzeugen. Die Effizienz liegt bei 35 % im Prototyp. Als Lichtquelle werden LEDs eingesetzt. Yamamura sieht solche Systeme zukünftig in Kombination mit Laserlichtquellen.

Neben den Veröffentlichungen auf Konferenzen und Tagungen sowie den Patentschriften gab es am L-Lab, ein PPP (Public Private Partnership) zwischen der Fa. Hella und der Universität Paderborn, ein Forschungsprojekt, das sich mit dem Aufbau eines automobilen Scheinwerfers auf DMD-Basis beschäftigte.

Die Entwicklung sowie der Aufbau werden vorrangig in den Schriften von Roslak, Kauschke und Günther beschrieben.

Roslak analysiert in seiner Dissertationsschrift ([43]) die konventionellen Scheinwerfersysteme (Abblend-, Fernlicht sowie das optionale Nebellicht) und kommt zu dem Schluss, dass aufgrund der begrenzten Reichweite des Abblendlichts gerade bei hohen Geschwindigkeiten ein großes Sicherheitsrisiko besteht. Die Fernlichtnutzung liegt in Europa laut Roslak bei 5 %, in Amerika bedingt durch die geringere Verkehrsdichte bei etwa 25 %. Sein Lösungsansatz basiert auf einem aktiven Scheinwerfer, der die Sehweite des Fahrzeugführers maximieren soll, ohne dabei die anderen Verkehrsteilnehmer zu blenden.

Roslak stellt folgende Anforderungen an den aktiven Scheinwerfer:

- *Widerstandsfähigkeit gegen Stöße und Vibrationen*
⇒ *dient dem Schutz vor Dejustage und Zerstörung*
- *Breiter Temperaturbereich (Automobilbereich)*
- *Lichtstärke >62500cd im Hotspot*
- *Lichtstrom > 1000 lm*
- *Abstrahlwinkel $\pm 50^\circ$ horizontal / $\pm 5^\circ$ vertikal*

Als notwendige Eingangsgrößen für eine optimale Ausleuchtung nennt Roslak die Dynamik, den Status sowie die Umgebung des Fahrzeugs. Hierzu nutzt er Fahrzeugdaten, die über den CAN-Bus übertragen werden, sowie eine Lidarsensorik. Einen Überblick über die Struktur der Scheinwerferfunktionen nach Roslak gibt Abbildung 2.6. Der Scheinwerfer selbst besteht aus einem DMD-Projektor, der über folgende Kennwerte verfügt:

- *Leistungsbedarf: 200 W*
- *Lichtstärke: >62.500 cd (im Hotspot)*
- *Lichtstrom Fernlicht: >1700 lm*
- *Kontrast: 100/1*
- *Wirkungsgrad Abblendlicht: 8,2 %*
- *Öffnungswinkel horizontal: $\pm 14,5^\circ$*

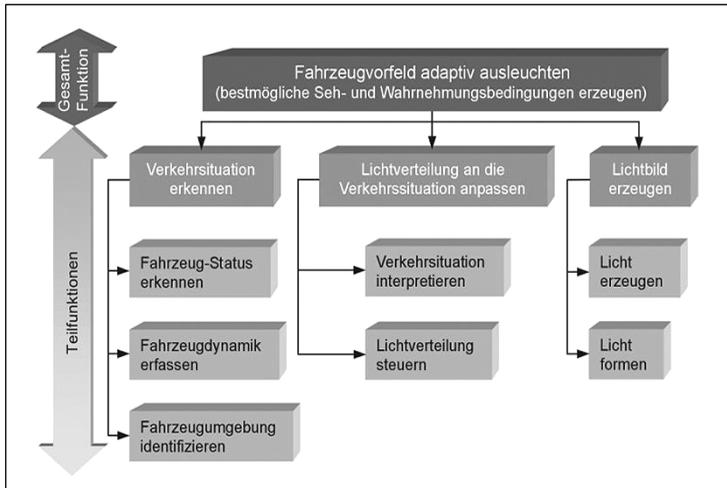


Abbildung 2.6: Funktionsstruktur eines aktiven Scheinwerfers, der sich an die aktuelle Fahrsituation anpasst und so eine optimale Ausleuchtung des Verkehrsraums gewährleisten soll (nach Roslak [44]).

Ein Mangel des Scheinwerferaufbaus ist der geringere Öffnungswinkel, der einen Vergleich mit konventionellen Scheinwerfersystemen unmöglich macht. Auch die Energieversorgung gestaltet sich problematisch. Die notwendige Leistung für den DMD-Projektor

stellt eine zusätzliche Batterie mit nachgeschaltetem 12 VDC/230 VAC Spannungswandler bereit. Demnach ist die Dauer von Versuchsfahrten durch die Batterieladung begrenzt.

Die Bildinformationen werden mittels VGA an den Projektor übergeben. Etwaige Ausblendungen von Objekten oder Fahrzeugen werden durch eine selbst entwickelte Software aus den Fahrzeugensordaten sowie dem Lidarsensor berechnet.

In einer Messreihe kam Roslak zu dem Ergebnis, dass das Blendpotential eines aktiven Scheinwerfers maßgeblich von der Erkennungsrate und der Reichweite des Sensors, in diesem Fall des Lidars, abhängt.



Abbildung 2.7: Versuchsfahrzeug mit DMD-Scheinwerfer auf einem Rack vor dem Fahrzeug montiert [43]

Kauschke analysiert in seiner Dissertation [44] die Anforderungen an aktive Scheinwerfersysteme und stellt Prototypen für vier Hauptscheinwerferkonzepte vor. Er identifiziert die folgenden zwei Hauptanforderungen:

- *Steigerung der Wahrnehmungs- und Verkehrssicherheit*
- *Erhöhung des Fahrkomforts*

Durch eine detaillierte Bewertung von insgesamt 32 verschiedenen Technologien, die für einen aktiven Scheinwerfer in Frage kommen, gelangt er zu den im Folgenden beschriebenen vier Hauptkonzepten:

- *Digitale Projektion:*
Zentrales Element ist das DMD-Array, mithilfe dessen pixelgenau zwischen den beiden Zuständen „An“ und „Aus“ unterschieden werden kann.
- *Analoge Projektion:*
Es handelt es sich hierbei um ein sogenanntes AMD-Array, dessen Mikrospiegel in beliebige Lagen bewegt werden können.
- *LCoS:*
Funktioniert wie die digitale Projektion, nur dass ein reflexives LCD anstatt dem DMD-Array verwendet wird.
- *Scannendes System:*
Ein einzelner Spiegel wird zweiachsig bewegt und erzeugt durch hohe Wiederholfrequenzen ein Bild, das vom menschlichen Auge als flackerfrei wahrgenommen wird.

Von jeder Technologie hat Kauschke einen statischen Scheinwerferdemonstrator aufgebaut und dessen Charakteristik bestimmt. Diese Demonstratoren können auf einem Rack im Frontbereich eines

Fahrzeugs positioniert und für Versuchsfahrten genutzt werden (vgl. Abbildung 2.7). Zusammenfassend kommt Kauschke zu dem Schluss, dass die DMD Technologie die beste Wahl für einen späteren aktiven Serienscheinwerfer darstellt. Er begründet dies mit einer hohen Zahl an Lichtfunktionen, einer großen Variabilität und der technologischen Reife.

Günther [45] hat den aktiven Versuchsscheinwerfer von Kauschke und Roslak weiterentwickelt. In Probandenversuchen hat er zunächst festgestellt, dass die minimal erforderliche Beleuchtungsstärke (in 25 m) 130 lx beträgt. Ein aktiver Scheinwerfer, speziell ein Forschungsscheinwerfer, muss in der Lage sein, diese Werte im Hotspot zu erzeugen. Bezüglich der Minimalwerte ist der Punkt B50L maßgeblich, d.h. die Beleuchtungsstärke muss kleiner als 0,5 lx für einen Scheinwerfer sein. Günther hat ein Scheinwerfermuster entwickelt, welches jedoch mit einer Beleuchtungsstärke von max. 13 lx und einem Minimalwert von 1,3 lx den Anforderungen nicht genügt.

2.2 ZUSAMMENFASSUNG

In der Literaturrecherche konnte festgestellt werden, dass keine praktikable Umsetzung eines universellen Forschungsscheinwerfers publiziert wurde. Die Mehrheit der Ansätze zielte sowohl in der Industrie als auch in den Forschungsinstituten auf den Einsatz von Digitalprojektoren auf Mikrospiegelbasis ab. Während die DMD-Technologie aktuell aufgrund ihrer mangelnden Effizienz nicht für

einen Serieneinsatz in Frage kommt, spielt dieser Mangel für eine Forschungsplattform nur eine untergeordnete Rolle. Für die Sensorik wird eine Fusion aus Radar/Lidar- und Kameradaten als optimal für einen adaptiven Scheinwerfer erachtet.

In Kapitel 3 wird auf die Konzeption und die praktische Umsetzung einer Scheinwerferplattform eingegangen, welche auf der DMD-Technologie und der damit verbundenen Digitalprojektion beruht. Die Plattform wird im Folgenden als *Propix* (Projektor-Pixellicht) bezeichnet.

Kapitel 3

ENTWICKLUNG VON PROPIX

3.1 EINLEITUNG

Die Entwicklung des Forschungsscheinwerfers *Propix* orientiert sich an der Arbeit von Rechentín [46], welcher am Lichttechnischen Institut der damaligen Universität Karlsruhe (TH) einen Scheinwerfer zur Erprobung automobiler Beleuchtungskonzepte namens *Voxel* aufgebaut hatte. Dieser bestand aus 128 LED-Modulen, welche jeweils einen kreisförmigen Lichtkegel mit 4° Öffnungswinkel erzeugten. Der gesamte horizontale Öffnungswinkel des Scheinwerfers betrug $\pm 25^\circ$, vertikal war das System auf $\pm 6^\circ$ beschränkt. Die Intensität der LED konnte mithilfe einer PWM-Steuerung variiert werden. Die maximal einstellbare Beleuchtungsstärke betrug 25 lx und der gesamte verfügbare Lichtstrom ca. 3.000 lm, was nicht den Anforderungen aktueller Scheinwerfertechnologien [47] entsprach.

Neben der mangelnden Beleuchtungsstärke konnten harte Gradienten wie z.B. eine HDG aufgrund der vergleichsweise geringen Pixelauflösung mit *Voxel* nur unzureichend dargestellt werden. Weiterhin war die Adaptationsfähigkeit von *Voxel* gering, da die LED-Module zur Generierung verschiedener Lichtverteilun-

gen vor einer Versuchsfahrt händisch ausgerichtet werden mussten. Aufgrund der fehlenden Aktorik wurde *Voxel* auch nicht mit einer Sensorik ausgestattet, die dem System eine automatisierte Anpassung an den Zustand des Verkehrsraums erlaubt hätte. Insgesamt war das vorangegangene System zu leistungsschwach, unflexibel und unhandlich.

Ausgehend vom grundlegenden Konzept des *Voxel* und basierend auf den Anforderungen, die sich aus dem aktuellen Stand der Technik in Kapitel 2 ergeben, wurden die im Folgenden beschriebenen Zielparameter für den *Propix*-Forschungsscheinwerfer erarbeitet.

3.2 ANFORDERUNGEN AN PROPIX

- ***Matrixförmige Gliederung:***
Der Verkehrsraum soll matrixförmig unterteilt sein, um pixelgenau jede mögliche Lichtverteilung darstellen zu können.
- ***Auflösungsvermögen:***
Die Pixelanzahl des Propix-Systems soll derzeitige Matrixbeam-Systeme als Mindestanforderung abbilden können.

- **Intensität:**
Der Lichtstrom und die maximale Beleuchtungsstärke sollen höher als bei jeder aktuell verwendeten oder entworfenen Lichtverteilung sein.

- **Interaktion:**
Sensordaten des Fahrzeuges sollen ebenso wie Informationen über andere Verkehrsteilnehmer in das System integriert werden können.

- **Variabilität/Steuerbarkeit:**
Ein Wechsel zwischen verschiedenen Lichtverteilungen soll einfach und in Echtzeit erfolgen können, ohne dass hierfür mechanische Umbauten am Propix-System erforderlich sind.

- **Mobilität:**
Der Forschungsscheinwerfer muss in einem konventionellen Fahrzeug untergebracht werden und im normalen Straßenverkehr einsetzbar sein.

- **Integrationsfähigkeit:**
Lichtverteilungen von Scheinwerfern, welche mittels CAL entworfen oder am Goniometer vermessen worden sind, sollen einfach und schnell in das Propix-System importiert werden können. Dabei muss insbesondere gelten, dass die importierte und die von Propix erzeugte Lichtverteilung übereinstimmen.

3.3 TECHNISCHE UMSETZUNG

Die Konzeption sowie erste Erprobungen des Versuchsaufbaus fanden in Zusammenarbeit mit Ernst statt [48]. Die grundlegende optische und mathematische Modellierung sowie die lichttechnische Charakterisierung der Projektoren erfolgten unter Schöne [49] und Söhner [50]. Die mechanische und elektronische Installation wurde von Lutz [51] durchgeführt. Die Steuersoftware wurde gemeinsam mit Reusch ([52], [53]) und Neumeyer [54] entwickelt. In Zusammenarbeit mit Walther [55] wurde eine Methode zur automatisierten Kalibrierung des Scheinwerfersystems erarbeitet. Die Integration von kamerabasierten Objektinformationen wurde schließlich von Hollmig behandelt [56].

3.3.1 LICHTQUELLEN

In vorangegangenen Arbeiten hat sich herausgestellt, dass für ein voll-adaptives, aktives Scheinwerfersystem prinzipiell zwei Technologien am besten geeignet sind (vgl. hierzu [43], [44], [57], [45, 48]). Zum einen der LCD-Projektor, der sich Flüssigkristallen alslichtschaltende Elemente bedient und zum anderen der DMD-Projektor, welcher die Lichtlenkung über Mikrospiegel realisiert. Vorteilhaft bei der LCD-Technologie ist der relativ geringe Preis. Die Anfälligkeit für Schmutz und Staub sowie die unzureichenden Kontrastwerte sind für die vorliegende Anwendung negativ zu bewerten. Der größte Nachteil besteht jedoch im Memory-Effekt,

womit das Einbrennen der Flüssigkristalle bei statischen Bildern bezeichnet wird. Da Scheinwerferlichtverteilungen quasistatisch sind, stellt der Memory-Effekt das Ausschlusskriterium dar.

Für das *Propix*-Projekt wurde daher die alternative Technologie DMD eingesetzt. Einen Überblick über deren Funktionsweise gibt Anhang B.2. Die DMD-Technologie weist eine mangelnde Farbdarstellung auf, welche aber bei den hier verwendeten Graustufenbildern nicht von Relevanz ist. Ein weiteres Problem entsteht durch die Verwendung des Farbfilterrades, welches zur Erzeugung von farbigen Bildern benötigt wird. Hier kann der sogenannte Regenbogeneffekt auftreten, welcher in Anhang B.3.2 erläutert wird. Die Farbfilterräder der Projektoren wurden aus diesem Grund demontiert, wodurch die Fähigkeit, verschiedene spektrale Charakteristiken von Lichtverteilungen zu untersuchen, dem *Propix*-System nicht zur Verfügung steht.

Aufgrund der hohen Pixelanzahl und der damit verbundenen Freiheitsgrade wurden für das *Propix*-System DMD-Projektoren mit FullHD Auflösung, d.h. 1920*1080 Pixeln, verwendet. Damit liegt die Zahl der steuerbaren Pixel bei knapp 2 Mio. pro Projektor. Durch die in Kapitel 3.3.2 erläuterte teilweise Überlappung der Abstrahlbereiche der Projektoren stehen insgesamt etwa 6 Mio. schaltbare Pixel zur Verfügung. Aktuell in der Serie eingesetzte Matrixscheinwerfer weisen maximal 50 Pixel auf (vgl. Audi A8 oder Mercedes CLS). In der Forschung wird hingegen davon ausgegangen, dass bis zu 300.000 Pixel zur Realisierung eines optimalen

aktiven Scheinwerfers vonnöten sind [58]. Somit deckt *Propix* die Anforderungen der aktuellen Serienscheinwerfer wie auch der zukünftigen Scheinwerfertechnologien hinsichtlich der räumlichen Auflösung ab.

Die lichttechnische Charakterisierung der Projektoren wird in Anhang C beschrieben. Insgesamt steht *Propix* ein Lichtstrom in Höhe von etwa 30.000 lm zur Verfügung. Als Vergleich seien Halogen- mit ca. 2.800 lm, Xenon- mit ca. 6.800 lm oder LED-Scheinwerfersysteme mit ca. 4.000 lm genannt ([59], [60] und [61]). Die maximale Beleuchtungsstärke beträgt im Bereich des Hotspots 259 lx (in 25 m Entfernung), was einer Lichtstärke von ca. 160.000 cd entspricht. Dies übertrifft die Anforderungen an aktive Scheinwerfer, welche von Huhn aus vorangegangenen Studien zusammengefasst und publiziert wurden [62]. Die Offsetbeleuchtungsstärke, d.h. der Schwarzwert, beträgt in 25 m Entfernung 0,15 lx, weshalb alle Anforderungen der ECE-Regelungen bezüglich der maximalen Blendbelastung eines Scheinwerfers durch das *Propix*-System erfüllt werden können. Das abgestrahlte Licht hat mit einer Farbtemperatur von 6.400 K eine tageslichtähnliche spektrale Charakteristik. Als Leuchtmittel werden Höchstdruckgasentladungslampen (UHP) eingesetzt. Die wichtigsten Kenndaten sind Tabelle 3.1 zu entnehmen, detailliertere Informationen sind in Anhang C.4 oder in der Studienarbeit von Schöne [49] zu finden.

Tabelle 3.1: Kenndaten der *Propix*-Projektoren

Parameter	Wert
Hersteller	Benq
Modell	SP840
Betriebstemperatur	10°C – 70°C
Spiegelgröße	10,8 µm
Kippwinkel	12° ± 1°
Optische Effizienz bei 400 nm – 700 nm	68 %
Höhe	1080 Pixel
Breite	1920 Pixel
Lichtstrom	ca. 5.000 lm
Leistungsaufnahme	370 W
Lichtstärke	ca. 26.000 cd
Horizontaler Öffnungswinkel	35°
Vertikaler Öffnungswinkel	22°

3.3.2 RÄUMLICHE ANORDNUNG

Die sechs Projektoren sind auf einem Rack vor dem *Propix*-Versuchsfahrzeug angebracht. Der Anordnung der Projektoren liegen dabei die im Folgenden beschriebenen Gesichtspunkte zugrunde.

- *Alle relevanten Objekte des Verkehrsraums müssen von den Projektoren beleuchtet werden können.*

Vertikal erstreckt sich der Bereich, den die Projektoren beleuchten müssen, vom Vorfeld des Fahrzeuges bis hin zu den Überkopfschildern auf Autobahnen. Hierdurch ergibt sich ein Winkelbereich von -14° bis 11° , den die Projektoren des *Propix*-Systems vollständig abdecken. Für weitere Details sei auf die Diplomarbeit von Söhner verwiesen [50].

Propix orientiert sich hinsichtlich des horizontalen Öffnungswinkels an den von Löbig [63] publizierten Anforderungen. Er gibt für ein Kurvenlicht mit einer Abblendlichtverteilung nach ECE R123 einen Winkel von $\pm 28,5^\circ$ an. Neuere Untersuchungen von Austerschulte [64] und Jahn [58] geben weiterhin einen Bereich von $\pm 15^\circ$ horizontal an, welchen sie als relevant für aktive Lichtfunktionen wie dem blendfreien Fernlicht identifiziert haben. Das *Propix*-System weist einen horizontalen Öffnungswinkel von $\pm 32^\circ$ auf und erfüllt damit die gestellten Anforderungen.

- *Die Beleuchtungsstärkewerte müssen ausreichend groß sein.*

Die Intensität muss in bestimmten Bereichen Mindestwerte erfüllen, damit alle gängigen Lichtverteilungen gemäß den ECE-Regelungen dargestellt werden können. Darüber hinaus ist *Propix* daraufhin entwickelt worden, die von Huhn formulierten Anforderungen an volladaptive, aktive Scheinwerfersysteme zu übertreffen [62]. Messungen ergaben, dass die mit *Propix* erzielbaren Beleuchtungsstärkewerte alle Forderungen übertreffen.

- *Die Lichtkegel der Projektoren müssen sich überlappen.*

Zu einem gewissen Anteil müssen sich die von den Projektoren erzeugten Bilder auf einer Ebene überschneiden. Dies ergibt sich zum einen aus der Forderung nach der Erfüllung der geforderten Beleuchtungsstärkewerte in bestimmten Bereichen. Zum anderen erleichtern die Überschneidungen eine Kalibrierung der Projektorbilder zueinander (vgl. Kapitel 3.3.8).

Die sechs Projektoren sind in einer 2×3 Anordnung in zwei Reihen und drei Spalten angeordnet. Die Überlagerungen der Projektorbilder sowie der räumliche Abstrahlbereich sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Während die oberen drei Projektoren hauptsächlich für Applikationen wie die vHDG oder das Markierungslicht verwendet werden, sind die unteren drei Projektoren für das Abblendlicht und die Nahfeld-Funktionen verantwortlich.

Die Positionen der Projektoren sind fest, um die Erzeugung eines einzelnen Bildes zu ermöglichen (vgl. Kapitel 3.3.8). Auf die Möglichkeit, die Projektoren mechanisch zu schwenken oder zu neigen wurde verzichtet. Dies hätte auf der einen Seite die Bilderzeugung deutlich erschwert und auf der anderen Seite die Wahrscheinlichkeit einer technischen Störung während der Versuchsfahrten erhöht.

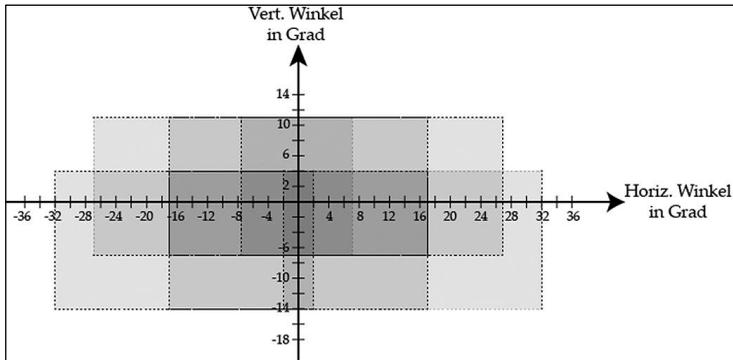


Abbildung 3.1: Räumliche Abstrahlcharakteristik der sechs *Propix*-Projektoren; die Intensität der einzelnen Überlagerungen ist analog zur Graustufe.

3.3.3 KONSTRUKTION DES RACKS

Die Konzeption der Projektorhalterung erfolgte im Rahmen der Diplomarbeit von Lutz [51]. Es mussten dabei folgende Bedingungen in Betracht gezogen werden:

- *Das Gewicht des Aufbaus soll so gering wie möglich sein.*

Die Projektoren sind vor dem Fahrzeug und damit weit vom Schwerpunkt bzw. den Achsen entfernt angebracht. Durch den daraus resultierenden langen Hebelarm entsteht bei entsprechend großem Gewicht der Halterung ein großes Moment, welches zum Bruch von tragenden Teilen führen kann. Auch wenn die Aufhängungen nicht beschädigt werden, führt die Kombination aus großem Gewicht und langem Hebelarm zu einer stärkeren Nickbewegung des Projektorracks. Dies gilt sowohl für periodisch

auftretende vertikale Beschleunigungen (z.B. auf Autobahnen mit Betonplatten) als auch für einmalige Ereignisse (z.B. bei einem Schlagloch) [65]. Die Folge daraus ist, dass die Lichtverteilung nach unten oder oben geneigt wird. Diese Bewegungen können entweder den Fahrzeugführer irritieren oder die Funktionalität der Beleuchtung, so etwa bei Ausblendungen oder Markierungen, beeinträchtigen. Als Konsequenz hieraus wurde bei der Auslegung der Halterung das Gewicht so gering wie möglich gehalten und das Rack direkt am Fahrzeug angebracht. Das Grundgerüst bilden Rahmenleichtprofile aus Aluminium, die an drei Punkten mit dem Fahrzeug verbunden sind. Die Struktur ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

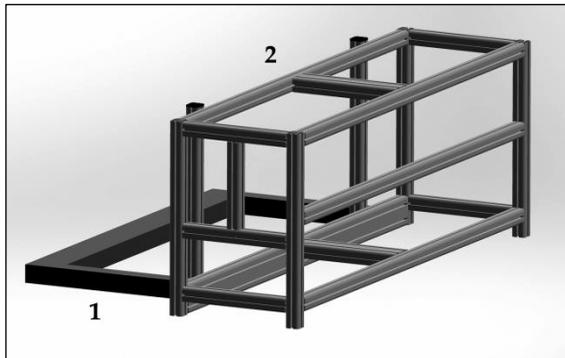


Abbildung 3.2: CAD-Modell des Grundgerüsts des *Propix*-Racks

Im unteren Bereich sind die Aluminiumprofile an zwei massiven Aluminiumträgern (1) befestigt, welche wiederum direkt mit dem

Fahrzeugchassis verbunden sind. Ein dritter Träger aus Gusseisen (2), der in der Abbildung nicht dargestellt ist, verbindet zusätzlich den oberen Teil des Racks mit dem Fahrzeug. Damit sollen potentielle Schwingungen der Konstruktion vermieden werden.

Die Vorteile der Aluminiumprofile liegen in ihrer hohen Stabilität bei gleichzeitig reduzierter Masse. Auch kann auf systematische Verbindungs- und Erweiterungselemente zurückgegriffen werden, die den Rackaufbau erleichtern. Schließlich lassen sich etwaige zusätzliche Elemente wie beispielsweise Sensoren zur Temperaturüberwachung leicht integrieren.

- *Die Projektoren sind vor Schmutz und Nässe zu schützen.*

Das *Propix*-System soll auch unter feuchten Umgebungsbedingungen wie Regen oder Nebel eingesetzt werden können. Da die Projektoren für den Betrieb innerhalb geschlossener Räumlichkeiten ausgelegt sind, sind sie nicht gegen eindringendes Wasser geschützt. Um einen Schutz gegen das im Fahrbetrieb übliche Spritzwasser zu gewährleisten, wurden mit Ausnahme der Frontseite dünne Edelstahlplatten als Außenhülle des Racks eingesetzt (Abbildung 3.3). Zwischen den Platten und den Aluminiumprofilen befinden sich Gummidichtungen, um ein Eindringen von Wasser zu verhindern. Eine vollständige Kapselung des Racks ist jedoch nicht möglich, da die in den Projektoren entstehende Wärme nach außen abgeführt werden muss. Dies erfolgt über vier Lüfter, welche an den beiden Seiten angebracht sind und eine Konvektion im Inneren des Racks erzwingen. Im Falle

einer mangelnden Wärmeabführung werden die Projektoren durch eine interne Sensorik abgeschaltet und so vor Schaden bewahrt. Die Abdeckung auf der Vorderseite des Racks hat die Aufgabe, speziell die empfindliche Optik der Projektoren vor Steinschlag und Nässe zu schützen. Gleichzeitig darf das abgestrahlte Licht so wenig wie möglich beeinflusst werden. Herkömmliches Sicherheitsglas sowie Polymethylmethacrylat (PMMA) wurden in der Praxis getestet, jedoch aufgrund der Sprödigkeit als untauglich eingestuft. Die Wahl fiel daher auf Polycarbonat (PC), welches wie PMMA in der Automobilbranche als Abschlusscheibe für Scheinwerfer Verwendung findet. Das Material hat gemäß Datenblatt (Anhang H.1) eine spektrale aselective Transmissionsrate von 89 % und weist eine hohe Steifigkeit gegenüber Verwindungen auf [66].

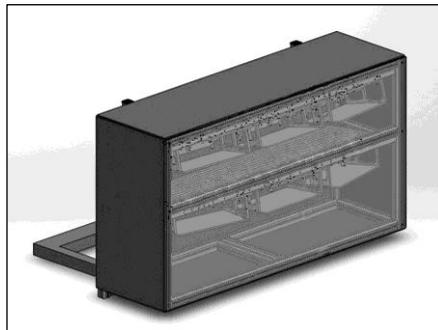


Abbildung 3.3: CAD-Modell des *Propix*-Racks mit Außenwänden, den zwei horizontalen Profilplatten sowie den sechs speziell angefertigten Projektorgehäusen

Nachteilig ist nur die erhöhte Anfälligkeit für Kratzspuren, weshalb die Frontscheibe gegebenenfalls nach einer gewissen Anzahl an Fahrkilometern erneuert werden muss. Um zu vermeiden, dass unerwünschtes Streulicht aus dem Inneren des Racks nach außen gelangt, wurde die PC-Scheibe mit Ausnahme der Lichtaustrittsflächen mattschwarz lackiert.

- *Position und Ausrichtung der Projektoren müssen stabil sein.*

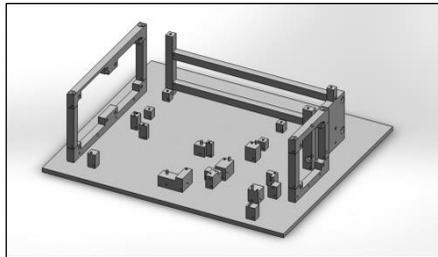


Abbildung 3.4: Modellierung des ursprünglichen Projektorgehäuses aus Aluminiumteilen

Das ursprüngliche Kunststoffgehäuse der Projektoren ist nicht für die Kräfte ausgelegt, die während einer Fahrt auftreten können. Eine minimale Änderung der räumlichen Lage sowie der Abstrahlrichtung der Projektoren hätte jedoch eine deutlich sichtbare Ungenauigkeit in der Bilddarstellung zur Folge. Um den Stabilitätsanforderungen zu genügen, wurden sowohl das ursprüngliche Gehäuse als auch die tragenden Teile der Projektoren durch Aluminiumteile neu modelliert (Abbildung 3.4).

Dabei mussten insbesondere die Betriebsbedingungen der UHP-Lampen beachtet werden, die nur einen bestimmten Bereich der Umgebungstemperatur zulassen.

Die Aluminiumgehäuse der Projektoren sind mittels vordefinierter Bohrungen mit zwei Profilplatten verbunden, die horizontal in zwei Ebenen im Rack angebracht sind (Abbildung 3.3). Dies bedeutet, dass die Position sowie die Abstrahlrichtung der Projektoren fest vorgegeben sind, wodurch deren Kalibrierung ermöglicht wird (vgl. Kapitel 3.3.8). Es ist aber denkbar, weitere Bohrlöcher oder Langlöcher in die Profilplatten zu setzen, um andere Abstrahlrichtungen der Projektoren zu realisieren. Das komplette Rack mit dem dazugehörigen Fahrzeug ist in Abbildung 3.5 dargestellt.



Abbildung 3.5: *Propix*-Versuchsfahrzeug mit montiertem Rack. Zur einfacheren Identifizierung als Forschungsfahrzeug wurde eine retroreflektierende Folie auf den Außenwänden angebracht.

3.3.4 ENERGIEVERSORGUNG

Um die mobile Einsatzfähigkeit des *Propix*-Systems zu ermöglichen, muss die benötigte Leistung komplett vom Versuchsfahrzeug bereitgestellt werden. Im ersten Schritt wurde die Leistungsaufnahme der einzelnen Komponenten von *Propix* bestimmt. Im Anschluss wurde hieraus ein Konzept zur Leistungsbereitstellung erarbeitet und schließlich praktisch im Fahrzeug umgesetzt.

3.3.4.1 LEISTUNGS-AUFNAHME

Das *Propix*-System besteht im Wesentlichen aus den drei leistungsrelevanten Komponenten „Projektoren“, „Steuerrechner/Monitor“ und „Sensorik“. Letztere besteht aus einer CAN-Bus Schnittstelle, einer Monokamera sowie dem dazugehörigen Rechner, auf dem die Algorithmen zur Objektdetektion laufen. Die Leistungsmessungen wurden mit einem LMG95 der Firma Zimmer Electronic Systems (ZES) durchgeführt [67]. Im Fall der Projektoren bzw. des Monitors ist die Leistungsaufnahme nach dem Einschaltvorgang in guter Näherung konstant. Die Messungen an den beiden Rechnern erfolgten während parallel laufenden typischen Berechnungen bzw. während die erforderliche Software aktiv war. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Es werden 10 % Wärmeverluste durch die Spannungswandlung (12 VDC -> 230 VAC) angenommen, welche zur gesamten Leistungsaufnahme addiert werden.

Tabelle 3.2: Leistungsaufnahme der Komponenten [51]

Komponente	Leistungsaufnahme
Projektoren	6*370 W
PC Kamera	55 W
PC <i>Propix</i>	213 W
Monitor	17 W
Summe	2.505 W
+10 % Verluste	+251 W
Gesamt	2.756 W

3.3.4.2 LEISTUNGSBEREITSTELLUNG

Der im Versuchsfahrzeug serienmäßig verbaute Generator hat eine Leistungsreserve von 1.220 W (bei 1.500 U/min Motordrehzahl), welche nicht für den normalen Fahrbetrieb benötigt wird. Dabei handelt es sich um den maximalen Wert, der bei deaktivierten Zusatzverbrauchern wie der Scheibenheizung, der Sitzheizung oder der Klimaanlage noch zur Verfügung steht. Die Leistungsbilanz beträgt damit im Grundzustand des Fahrzeuges -1.536 W. Eine zusätzliche Energiequelle ist somit zwingend notwendig, um das *Propix*-System während der Fahrt betreiben zu können.

Die Wahl fiel auf einen zweiten Generator, der aus Platzgründen an anstatt des Klimakompressors an dessen Position installiert wurde. Dieser erzeugt die in Tabelle 3.3 angegebenen Leistungen, welche von der Umdrehungszahl des Motors abhängen. Die Leistungsbilanz ist insgesamt positiv (+861,5 W), wenn der Motor mit

mindestens 1.500 U/min betrieben wird. Rein rechnerisch wäre auch eine niedrigere Motordrehzahl bereits ausreichend, um eine ausgeglichene Leistungsbilanz zu erhalten. Die Drehzahl wurde dennoch höher gewählt, um einerseits Reserven für zusätzliche Kleinverbraucher bereitzuhalten und um andererseits ein zeitweiliges Abfallen der Motordrehzahl überbrücken zu können. Technisch wurde die Erhöhung des Standgases durch eine Modifikation des Gaspedals dahingehend umgesetzt, dass es immer einen Mindestdruck ausübt.

Tabelle 3.3: Leistung des zusätzlichen Generators in Abhängigkeit der Drehzahl

Drehzahl	Stromstärke	Spannung	Leistung
600 U/min	140 A	11,8 V	1.652 W
1.500 U/min	175 A	13,7 V	2.397,5 W

3.3.4.3 ELEKTRONISCHE KOMPONENTEN

Die Bordnetzspannung beträgt im KFZ etwa 12-14 VDC. Die Projektoren benötigen zum Betrieb allerdings 230 VAC. Es besteht also die Notwendigkeit einer Spannungswandlung. Der Einfachheit halber werden die Netzteile der beiden Rechner sowie der Monitor ebenso mit 230 VAC betrieben, obwohl es hier Lösungen mit 12 VDC Betrieb geben würde. Um die notwendige Leistung bereitzustellen, werden im *Propix*-Fahrzeug drei Wechselrichter mit jeweils 1500 VA Ausgangsleistung eingesetzt. Diese erzeugen eine Wechselfrequenz in Form eines reinen Sinus und sind gemäß E-Mark [68] für den Einsatz im KFZ zertifiziert. Insbesondere

betrifft die Zertifizierung die elektro-magnetische Verträglichkeit (EMV), die in der Fahrzeugumgebung ein sicherheitsrelevantes Kriterium ist. Es wurde bei der Konzeption der Elektronik des Fahrzeugs daher ein besonderes Augenmerk auf die Vermeidung von Störstrahlung gelegt. Zusätzlich zu den E-Mark zertifizierten Wechselrichtern wurden Entstörfilter eingesetzt. Diese verhindern ein Übersprechen speziell der Schwingungen, die bei der Spannungswandlung entstehen, auf den CAN-Bus des Fahrzeuges oder die empfindliche Elektronik der Objektkamera. Entsprechende Testreihen haben ergeben, dass diese Maßnahmen gerechtfertigt sind, da ohne Filter und Zertifizierung ein regulärer Fahrbetrieb nicht möglich gewesen wäre (Abbildung 3.6/Abbildung 3.7). Neben den Wechselrichtern sind Fehlerstromschutzschalter (FI/LS) und Schmelzsicherungen verbaut, um auf der einen Seite den Benutzer zu schützen und auf der anderen Seite die Gefahr von Kabelbränden zu minimieren. Der komplette Schaltplan samt Erläuterungen ist in Anhang H.4 zu finden.

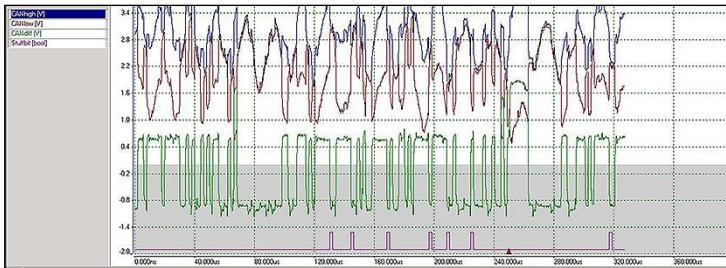


Abbildung 3.6: Zeitlicher Spannungsverlauf des fahrzeugeigenen CAN-Busses bei Verwendung von konventionellen Wechselrichtern ohne entsprechende Entstörmaßnahmen. Das Schaubild zeigt die beiden Signalpegel CANhigh (blau) und CANlow (rot) sowie die Differenz (grün).

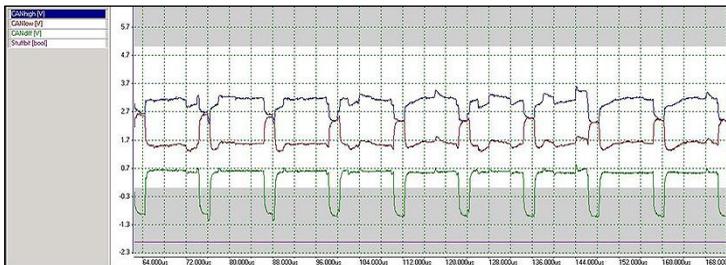


Abbildung 3.7: Zeitlicher Spannungsverlauf des fahrzeugeigenen CAN-Busses bei Verwendung von E-Mark klassifizierten Wechselrichtern in Kombination mit Entstörfiltern. Das Schaubild zeigt die beiden Signalpegel CANhigh (blau) und CANlow (rot) sowie die Differenz (grün).

3.3.5 SENSORINTEGRATION

In der Anforderungsbeschreibung in Kapitel 3.2 wird eine Integration von Sensordaten gefordert. Diese Daten beziehen sich sowohl auf fahrzeuginterne wie auch -externe Parameter, welche in den folgenden beiden Kapiteln näher erläutert werden.

3.3.5.1 INTERNE SENSORDATEN

Über eine im *Propix*-System integrierte Schnittstelle zum CAN-Bus des Fahrzeugs ist es möglich, die folgenden Sensorwerte auszulesen und somit Aussagen über den Betriebszustand des Fahrzeuges zu treffen:

- *Lenkwinkel*
- *Bremsdruck*
- *Beschleunigungen*
- *Geschwindigkeit*
- *Schalterstellungen*

Der Lenkwinkel wird beispielsweise für Kurvenlichtanwendungen benötigt. Der Bremsdruck sowie Beschleunigungswerte können für eine Anpassung der HDG oder für einen Ausgleich von Fahrbahnunebenheiten verwendet werden. Die Geschwindigkeit wird z.B. für die automatische Umschaltung zwischen Stadtlicht und Landstraßen- oder Autobahnlicht verwendet. Schalterstellungen schließlich können u.a. als Trigger zum manuellen Umschalten zwischen Ablend- und Fernlicht verwendet werden.

3.3.5.2 EXTERNE SENSORDATEN

Das *Propix*-System ist prinzipiell in der Lage, jede Art von Sensordaten zu nutzen, die die Umgebung des Fahrzeugs charakterisieren. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Abhandlung sind zwei Sensoren in die Bildgenerierung integriert. Es handelt sich dabei zum einen um einen Beleuchtungsstärkesensor, der serienmäßig im Versuchsfahrzeug installiert ist und dessen Informationen dazu genutzt werden können, z.B. automatisch zwischen Lichtverteilungen verschiedener Intensität zu wechseln. Zum anderen verfügt das *Propix*-System über eine Monokamera zur Detektion von relevanten Objekten im Straßenverkehr. Prinzipiell können die Objekte in die Klassen „Fahrzeuge“, „Personen“, „Tiere“ oder „Verkehrsschilder“ eingeteilt werden. Der derzeitige Entwicklungsstand beschränkt sich auf die Erkennung von Fahrzeugen, die entweder vorausfahren oder entgegenkommen.

Die Funktionalität der Kamera umfasst die Erkennung und Klassifizierung von Fahrzeugen sowie die Weitergabe deren Lage im Straßenraum an den *Propix*-Steuerrechner. Die Kommunikation erfolgt über einen separaten, privaten CAN-Bus. Das Kamerasystem verfügt über die Fähigkeit, die räumliche Lage von bis zu acht Fahrzeugen anzugeben. Die Objekterkennung basiert auf einer Kontrastanalyse in Kombination mit bestimmten Randbedingungen. So wird für Kraftfahrzeuge ein typischer mittlerer Abstand der beiden Scheinwerfer oder Heckleuchten angenommen und über die Anzahl der überdeckten Pixel im Kamerabild die Entfernung zwischen dem erkannten Objekt und dem eigenen Fahrzeug

näherungsweise berechnet. Die Entfernungsschätzung erfolgt, bedingt durch die Verwendung einer einzelnen Kamera, auf etwa 9 m genau [56]. Die Bildwiederholrate liegt bei 15 Hz, d.h. nach jeweils rund 67 ms wird die Position der erkannten Objekte neu an den *Propix*-Steuerrechner gesendet.

Die Kombination aus niedriger Bildwiederholrate und unsicherer Erkennung der Objekte kann zu Ungenauigkeiten bei der Umsetzung eines blendfreien Fernlichts oder einer Markierungsfunktion führen. In Zusammenarbeit mit Hollmig [56] wurden daher Lösungsstrategien für diese Problematik entwickelt und geprüft. Die grundlegende Idee besteht darin, die Objektdaten, welche vom Kamerarechner ausgegeben werden, vor der Nutzung in der *Propix*-Software einer geeigneten Filterung zu unterziehen. Eine Analyse gängiger Filtermethoden ergab, dass sich der Kalman-Filter sowie der Alpha-Beta-Filter für die vorliegende Anwendung am besten eignen. In einer Feldstudie wurden diese beiden Filterstrategien hinsichtlich ihres Blendpotentials verglichen. Als Referenz dienten dabei die ungefilterte Nutzung der Objektdaten sowie ein konventionelles Fernlicht. Beide Filter minimierten das Blendrisiko deutlich im Vergleich zu der Variante ohne Filter. Der Kalman-Filter erwies sich dabei als besonders gut geeignet, um die Unsicherheiten der Objekterkennung zu reduzieren und die Umsetzung eines blendfreien Fernlichts mit dem *Propix*-System zu ermöglichen. Für eine detaillierte Beschreibung der Filtermethoden sowie deren Umsetzung in der *Propix*-Steuersoftware sei auf die Bachelorarbeit von Hollmig verwiesen [56].

3.3.6 BENUTZEROBERFLÄCHE/SOFTWARE

Die für das *Propix*-System notwendige Hardware wird in den Kapiteln 3.3.1 - 3.3.5 beschrieben. Damit sind alle Voraussetzungen für einen pixelgenauen automobilen Forschungsscheinwerfer gegeben. Prinzipiell könnte damit jedem Projektor ein Bild zugewiesen werden, das seinem Teil der gewünschten Lichtverteilung entspricht. Ein zentrales Problem stellt die Zeit für die Berechnung dieser Bilder dar. Eine erste Softwareversion zur Generierung der benötigten Bilder wurde in Zusammenarbeit mit Neumeyer ([54], [69]) mithilfe der kommerziellen Entwicklungsumgebung Matlab erstellt. Der Funktionsumfang erstreckte sich über die statische Berechnung der sechs Bilder für jeden einzelnen Projektor. Die Übereinstimmung zwischen Soll- und Istlichtverteilung war mit dieser Software groß, der Zeitaufwand jedoch lag im Bereich von einigen Stunden für jedes der sechs Bilder.

In der Regel soll aber nicht nur eine statische Lichtverteilung dargestellt werden, sondern beliebig oft und schnell zwischen verschiedenen dynamischen Lichtverteilungen gewechselt werden. Diese müssen sich automatisch den internen und externen Fahrbedingungen anpassen. Weiterhin soll die Steuerung der Software während einer Versuchsfahrt im Fahrbetrieb möglich sein und daher nicht komplex gestaltet werden.

Die Umsetzung dieser Anforderungen in eine eigens konzipierte Software erfolgte gemeinsam mit Reusch während dessen Studien- und Diplomarbeit ([52], [53]). Der Kerngedanke der Software ist in

Abbildung 3.8 dargestellt und besteht darin, den Straßenraum dreidimensional zu modellieren und die sechs Projektoren als Kameras zu betrachten, die den Raum aus verschiedenen Perspektiven heraus betrachten. Diese Herangehensweise hat den folgenden entscheidenden Vorteil: In 3D-fähigen Computerspielen nimmt der Spieler die Rolle einer Kamera ein, die eine vorgegebene Szene betrachtet. Ändert der Spieler seine Position oder Blickrichtung im Raum, berechnet die Grafikkarte das neue Bild, welches die Kamera sieht. Da Grafikkarten für diese Art der Bildberechnung optimiert sind, geschieht dies auf heutigen Rechnern nahezu in Echtzeit. Im Fall der *Propix*-Software liegt die Bildwiederholrate bei FullHD Auflösung (1920x1080 Pixel) und sechs Projektoren bei 150 Hz. Demnach übertrifft die Leistungsfähigkeit der Software die der Projektoren, welche bei 60 Hz liegt, um einen Faktor 2,5.

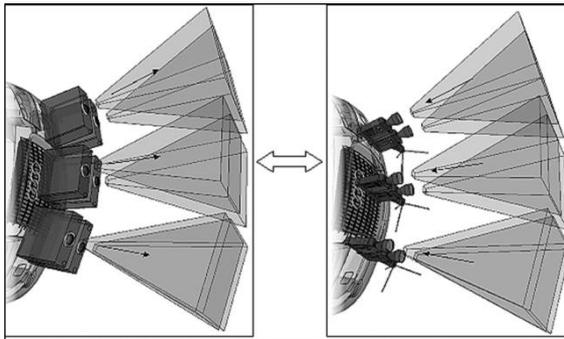


Abbildung 3.8: Der wesentliche Gedanke der *Propix*-Steuersoftware besteht darin, die Strahlfelder der Projektoren durch Kamerablickfelder zu modellieren; die Berechnung der Kamerabilder erfolgt schnell und in hoher Auflösung durch die Grafikkarte; Darstellung nach Reusch

Ausgehend von einer gewünschten Ziellichtverteilung berechnet die Software die Kamerabilder für jeden der sechs Projektoren und übergibt sie diesen. Die Benutzeroberfläche der Software ist in Abbildung 3.9 zu erkennen. Die grundlegende Funktionalität umfasst geometrische Transformationen wie Rotation, Skalierung oder Translation sowie eine Variation der Intensität. Es können beliebig viele Lichtobjekte im Straßenraum platziert werden. Dabei kann es sich bei den Objekten sowohl um z.B. eine konventionelle Abblendlichtverteilung als auch um eine Ausblendung oder Markierung eines Verkehrsteilnehmers handeln. Es ist demnach möglich, in mehreren Ebenen Lichtobjekte zu platzieren, die sich je nach vorliegender Funktion auf verschiedene Art und Weise überlagern können. Die Eigenschaften der Lichtobjekte können dabei in Abhängigkeit der internen und externen Sensordaten (vgl. Kapitel 3.3.5) dynamisch und automatisiert angepasst werden.

Die Software wurde so programmiert, dass sie einfach erweitert werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden vier Erweiterungen entwickelt und mit entsprechenden Benutzeroberflächen in die zentrale *Propix*-Software integriert. Eine besteht aus einer Umgebung, die für die Evaluierung von Filterstrategien konzipiert und von Hollmig in dessen Feldversuchen verwendet wurde [56].

Zusätzliche Erweiterungen betreffen die Kalibrierung der Projektoren (vgl. Kapitel 3.3.8) sowie die beiden Probandenstudien, welche in Kapitel 4 beschrieben sind. Die Erweiterungen stellen dabei separate Programme dar, welche über eine Schnittstelle Daten mit

dem Hauptprogramm austauschen. Dieser modulare Aufbau bringt den Vorteil mit sich, dass nicht in den Code des Hauptprogramms eingegriffen werden muss und die Software deutlich stabiler und effizienter läuft.

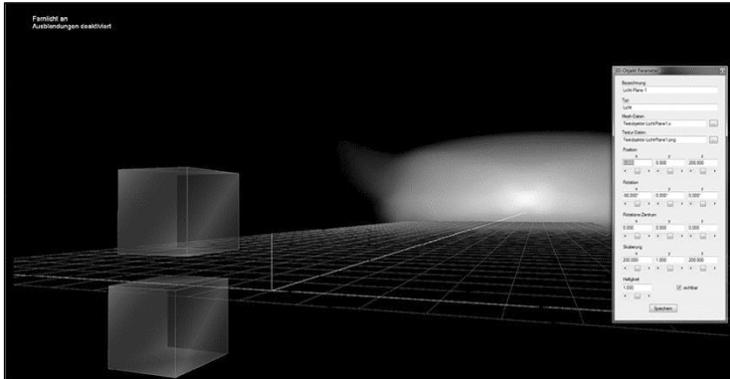


Abbildung 3.9: Zentrale Benutzeroberfläche der Software; an der Stelle der beiden Würfel befindet sich das Versuchsfahrzeug; die Straße ist mit einem Gitter symbolisiert, im Hintergrund ist eine Fernlichtverteilung aktiv; rechts: Eingabemaske für ein Lichtobjekt.

3.3.7 BILDERZEUGUNG

Die wesentliche Aufgabe des *Propix*-Versuchsfahrzeugs besteht darin, Lichtverteilungen auf der Straße darzustellen. Die Verteilungen können dabei entweder am Rechner mithilfe einer CAL Software entworfen worden sein oder von bereits angefertigten Scheinwerfern stammen, deren Abstrahlcharakteristiken z.B. mit einem Goniometer vermessen wurden. In beiden Fällen ist die im

Folgenden beschriebene Problemstellung dieselbe. Herkömmliche automobile Scheinwerfer werden immer paarweise eingesetzt. Beide Scheinwerfer haben dieselbe Abstrahlcharakteristik und unterscheiden sich nur in der Anbauposition und geringfügig in der Abstrahlrichtung. *Propix* ist hingegen aus sechs Projektoren, d.h. aus sechs Lichtquellen, aufgebaut, welche sich prinzipbedingt sowohl in ihrer Anbaulage als auch ihrer Abstrahlrichtung unterscheiden (vgl. Kapitel 3.3.2).

Es ist physikalisch nicht möglich, das Abstrahlverhalten eines Scheinwerferpaars perfekt mit einem System aus sechs Lichtquellen nachzubilden. Für die Erzeugung der Bilder für die Projektoren wird daher das im Folgenden beschriebene Prinzip und Verfahren verwendet.

In ausreichend großer Entfernung von den Lichtquellen ist in guter Näherung davon auszugehen, dass die Anbauposition der Lichtquellen vernachlässigbar ist und ein einziger Punkt als Lichtursprung definiert werden kann. Hieraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass das *Propix*-System in der Lage ist, die gewünschten Lichtverteilungen eines konventionellen Scheinwerfersystems ab einer gewissen Entfernung korrekt abzubilden.

Grundlage der Bildberechnung ist demnach die Lichtstärkeverteilung des nachzubildenden Scheinwerferpaars. Die Verteilung muss vor der Integration in die *Propix*-Steuersoftware vorverarbeitet werden. Hierzu wurde ein spezielles Programm entwickelt, welches als Add-On der kommerziell verfügbaren CAL-Software

LucidShape fungiert. Das Tool liest die Lichtstärkeverteilung ein und projiziert die Verteilung auf eine Ebene, die sich in einer beliebigen Entfernung vom Lichtursprung befindet. In der Praxis haben sich Werte ab 100 m Entfernung als praktikabel herausgestellt. Die resultierenden Beleuchtungsstärkewerte werden auf das Maximum normiert und in Graustufen mit einer Auflösung von 10 bit umgerechnet. Hieraus wird ein Bitmap erzeugt, welches schließlich der *Propix*-Software zusammen mit dem Maximum und der gewählten Entfernung übergeben wird. Dort wird die Beleuchtungsstärkeverteilung als Textur auf eine Ebene geeigneter Größe gelegt. Die Intensität der Textur und die Entfernung der Ebene zum *Propix*-Fahrzeug werden gemäß den vorgegebenen Parametern gewählt. Der prinzipielle Ablauf wird in Abbildung 3.10 verdeutlicht.

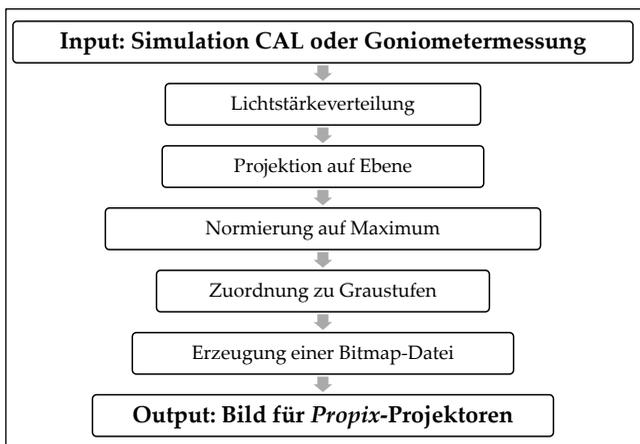


Abbildung 3.10: Prinzipieller Ablauf der Bilderzeugung für den *Propix*-Versuchsscheinwerfer

3.3.8 KALIBRIERUNG

Die Berechnung der einzelnen Bilder erfordert bei allen sechs Projektoren die genaue Kenntnis sowohl der räumlichen Position als auch der Abstrahlvektoren. Als Referenz dient die Straßenebene. Beide Parameter sind im Prinzip bekannt, da das Rack nach definierten geometrischen Vorgaben (vgl. Kapitel 3.3.2) konzipiert worden war. Kleine Unsicherheiten in der Positionierung und Drehung sowie Bauteiltoleranzen können jedoch zu Schwankungen der Parameter führen. Zur Verdeutlichung der Problematik wird mittels der *Propix*-Software mit drei Projektoren ein Rechteck auf einer Wand in einer definierten Entfernung erzeugt. Im Fall der perfekten Kenntnis aller Parameter der Projektoren wird auf der Wand nur ein einzelnes Rechteck dargestellt. Jedoch treten im realen Fall Abweichungen auf, wie im linken Teil von Abbildung 3.11 deutlich wird. Aus einem Rechteck werden drei, die sich nur teilweise und nicht vollständig überlagern. Der rechte Teil von Abbildung 3.11 zeigt die Darstellung, nachdem die im Folgenden beschriebene händische, statische Kalibrierung der Projektoren durchgeführt wurde.

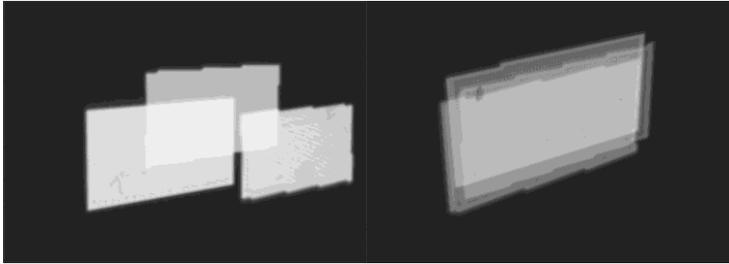


Abbildung 3.11: Vergleich eines nicht kalibrierten *Propix*-Systems mit einem kalibrierten; die Kalibrierung erfolgte dabei statisch und manuell [50].

Der erste Teil der Kalibrierung betrifft die vertikale Komponente des Abstrahlvektors, den Neigungswinkel. Weicht dieser vom Sollwert ab, so strahlen die Projektoren entweder zu hoch oder zu tief. An dieser Stelle sei angemerkt, dass mit vertretbarem Aufwand nicht unterschieden werden kann, ob die vertikale Abweichung des Projektorbilds von einem fehlerhaften Neigungswinkel oder der Anbauhöhe des Projektors stammt.

Daher wurde in der statischen Kalibrierung davon ausgegangen, dass der Fehler in der Anbauhöhe vernachlässigbar ist. Um die Abweichung im Neigungswinkel festzustellen, stellten die Projektoren Punkte auf einer Wand dar, die gemäß der in der *Propix*-Software hinterlegten Kalibrierung höhengleich mit den Projektoren sein sollten. Diese Prozedur wurde jeweils einmal für die oberen drei sowie für die unteren drei Projektoren durchgeführt. Die Höhe der Punkte wurde auf der Wand und an zwei festen Positionen zwischen Wand und Scheinwerferrack mit einem

Laserdistometer gemessen. Aus der Abweichung der drei Messwerte von den Sollwerten wurde eine entsprechende Winkelkorrektur berechnet. Die gesamte Prozedur wurde solange wiederholt, bis etwaige Abweichungen nicht mehr messtechnisch festzustellen waren. Eine skizzenhafte Darstellung des Vorgangs ist Abbildung 3.12 zu entnehmen.

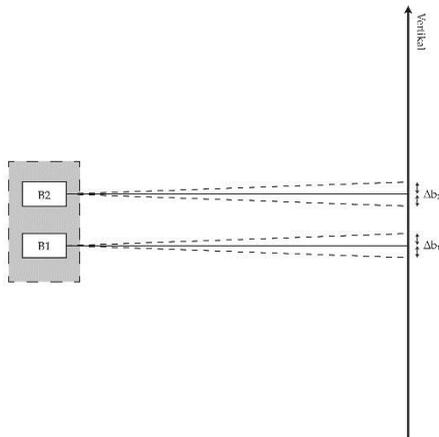


Abbildung 3.12: Zur Bestimmung der Abweichung der Neigungswinkel werden die Höhendifferenzen (exemplarisch dargestellt durch Δb_1 und Δb_2) für jede der beiden Projektorebenen B1 und B2 ermittelt.

Der zweite Teil der statischen Kalibrierung betrifft eine etwaige horizontale Abweichung der Strahlvektoren. Das Vorgehen ist prinzipiell dasselbe, nur dass nicht die Neigungswinkel, sondern die Schwenkwinkel korrigiert werden. Eine Skizze des Vorgangs ist in Abbildung 3.13 dargestellt.

Die entwickelte statische Kalibriermethode führt zu einer sehr genauen Kenntnis der Abstrahlvektoren der Projektoren und deren relativen Lage zueinander. Nachteilig gestaltet sich der damit verbundene hohe Zeitaufwand, der im Bereich einiger Stunden liegt. Ein Kalibriervorgang jeweils vor Beginn einer Versuchsfahrt ist aus Zeitgründen nicht praktikabel.

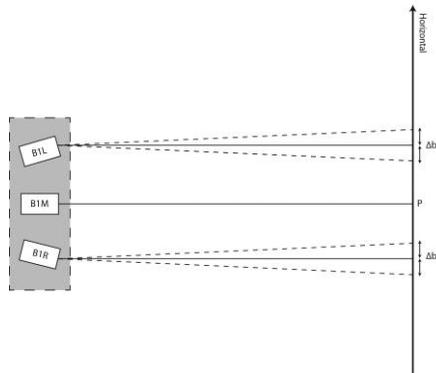


Abbildung 3.13: Zur Bestimmung der Abweichung der Schwenkwinkel werden die Seitendifferenzen (exemplarisch dargestellt durch Δb_1 und Δb_2) für alle sechs Projektoren ermittelt.

Um den großen Aufwand für die Kalibrierung zu reduzieren wurde gemeinsam mit Walther [55] eine automatisierte Methode entwickelt. Diese basiert auf der kameragestützten Erkennung von speziellen Kalibriermustern. Wie in Abbildung 3.14 zu erkennen ist, werden von den Projektoren beispielsweise Kreuze auf einer Wand dargestellt. Das Scheinwerferrack steht in einer bestimmten

Entfernung senkrecht zu der Wand. Die exakte Lage wird mittels Laserdistometern ermittelt, wodurch selbst kleine Abweichungen erfasst werden können. Mit einer hochauflösenden Monokamera (2592 x 1944 Pixel) [70] werden Aufnahmen der Kalibriermuster auf der Wand gemacht. Ein nachfolgender Algorithmus verarbeitet die Bilddaten weiter. In einem ersten Schritt werden charakteristische Merkmale der Muster erkannt und deren Eigenschaften mit denen eines Referenzmusters verglichen. Als eine solche Referenz dient zu Beginn der Kalibrierung ein fest mit dem Scheinwerferrack verbundener Laser. Dessen Optik erzeugt eine kreuzförmige Abbildung auf der Wand. Mit diesem Sollmuster wird zuerst das Kalibriermuster eines Projektors verglichen. Gegebenenfalls erfolgen mehrere Korrekturen der Abstrahlvektoren bzw. der Anbauposition bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung erzielt wird. Die anderen fünf Projektoren werden anschließend der Reihe nach auf das Muster des ersten Projektors angepasst. Die automatische Abarbeitung des Algorithmus beinhaltet dabei immer die in Abbildung 3.15 skizzierte Abfolge.

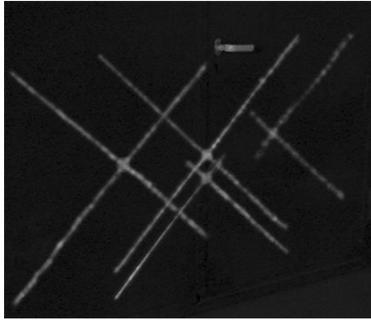


Abbildung 3.14: Kreuzmuster der automatisierten Kalibrierung [55]

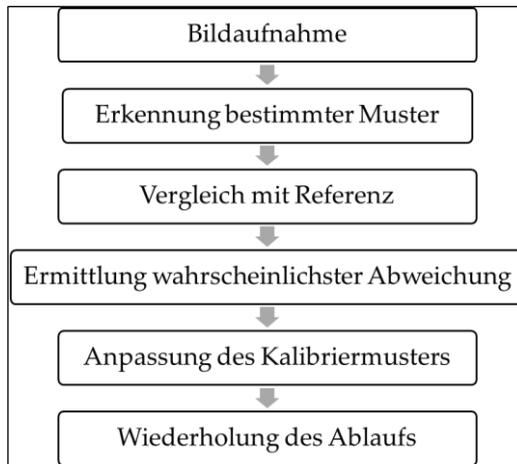


Abbildung 3.15: Schema des Algorithmus zur automatisierten Kalibrierung der *Propix*-Projektoren

Eine Erweiterung der *Propix*-Software (Abbildung 3.16) dient der Steuerung der automatischen Kalibrierung. Hier kann der Benutzer

Parameter bezüglich der Bildaufnahme und Objekterkennung vorgeben, um den Kalibriervorgang an die äußerlichen Gegebenheiten während des Vorgangs, z.B. die Umgebungshelligkeit oder die Oberflächenbeschaffenheit der Kalibrierwand, anzupassen. Dadurch erhöhen sich sowohl die Genauigkeit als auch die Geschwindigkeit des Kalibriervorgangs. Im Gegenzug wird jedoch ein manuelles Eingreifen erforderlich, sodass keine vollständige Automatisierung auf Knopfdruck erreicht wurde. Insgesamt konnte der Zeitaufwand im Vergleich zur statischen Kalibrierung deutlich verringert werden. Aussagen über die Genauigkeit in Bezug auf das statische Verfahren können zum Stand dieser Ausarbeitung noch nicht getroffen werden.

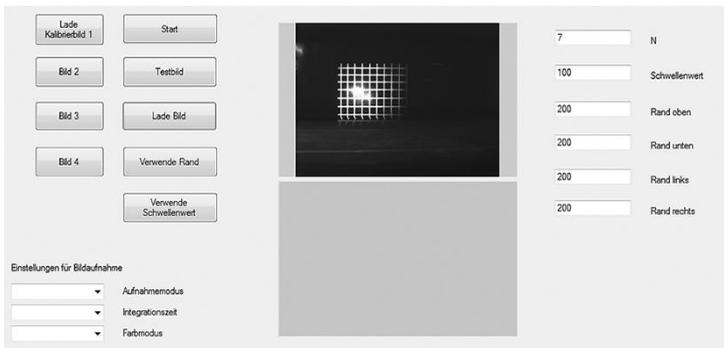


Abbildung 3.16: Benutzeroberfläche der automatisierten Kalibrierung als Erweiterung der *Propix*-Software

Kapitel 4

VALIDIERUNG DES SYSTEMS

4.1 EINLEITUNG

Im Rahmen der technischen und methodischen Validierung des *Propix*-Systems wurden zwei groß angelegte Probandenstudien zu zwei aktuellen Themen der automobilen Lichttechnik durchgeführt. Zum einen handelte es sich dabei um eine statische Studie zur Gestaltung der Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer, zum anderen um einen dynamischen Feldversuch zur Ermittlung des Einflusses der Vorfeldausleuchtung auf die visuelle Leistungsfähigkeit des Fahrzeugführers. Die Möglichkeit, beide Studien mit demselben System durchführen zu können, ist ein Alleinstellungsmerkmal des *Propix*-Forschungsscheinwerfers. Mit den bisherigen technischen Mitteln wäre eine derartige Durchführung nicht möglich gewesen, ohne einen unverhältnismäßigen Aufwand zu betreiben.

In den beiden folgenden Kapiteln werden jeweils der Bezug zur aktuellen Forschung, die sich daraus ergebenden Forschungsfragen sowie die Durchführung und die Ergebnisse beschrieben.

4.2 STATISCHE STUDIE: CHARAKTERISTIK VON AUSBLENDUNGEN

4.2.1 WISSENSCHAFTLICHER KONTEXT

In Kapitel 2 wird ersichtlich, dass die aktuelle Entwicklung in der automobilen Lichttechnik klar auf den dauerhaften Einsatz des Fernlichts abzielt. Dazu wurden auf der einen Seite Systeme wie der Fernlichtassistent serienmäßig eingeführt, welche die Dauer der Fernlichtnutzung erhöhen. Auf der anderen Seite ist man bestrebt, die Ausleuchtung bei Vorhandensein anderer Verkehrsteilnehmer nicht komplett auf das Abblendlicht reduzieren zu müssen. Hier sei die vHDG als Beispiel genannt, welche über eine variable Blende andere Fahrzeuge aus der Fernlichtverteilung ausblenden kann. Die Qualität der Ausblendung hängt bei solchen Systemen stark von der Erkennungsrate und der realisierbaren räumlichen Auflösung der Lichtverteilung ab. Die Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer war nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung und wurde daher als perfekt angenommen.

Im Zuge der aktuellen Markteinführung von Matrixscheinwerfern und der damit verbundenen Erhöhung der frei schaltbaren Segmente ergeben sich zahlreiche technische Fragestellungen. Für die Richtung, in die die Entwicklung gehen soll, ist die Frage nach der sinnvollsten bzw. optimalen Auflösung bedeutsam.

Hierzu sei beispielsweise auf die Arbeit von Jahn verwiesen [58]. Weitere Fragen betreffen die Art und Weise der Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer.

4.2.2 FORSCHUNGSFRAGE

Zwei wesentliche Merkmale von Ausblendungen sind die Dimensionen und die Charakteristika der Übergänge von Hell zu Dunkel. Es stellt sich hierbei die Frage, welche Kombination der beiden Parameter die Fahrzeugführer bevorzugen. In einer Probandenstudie sollte daher durch einen Vergleich verschiedener Ausblendungsstrategien die subjektiv beste Kombination aus Größe und Gestaltung der Kanten ermittelt werden. Die Durchführung der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit Hofner [71].

4.2.3 STRUKTURELLER AUFBAU DER STUDIE

Die Vorgänge beim Ausblenden anderer Verkehrsteilnehmer können im realen Straßenverkehr sehr komplex werden, da beliebig viele Kombinationen aus entgegenkommenden oder vorausfahrenden Fahrzeugen, Straßengeometrie und Umgebungsbedingungen auftreten können. Des Weiteren sind die Parameter in der Regel dynamisch, d.h. sie ändern sich mit der Zeit, was eine vollständige Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen ausschließt.

Aus den genannten Gründen befasste sich die beschriebene Studie mit dem Spezialfall einer statischen Verkehrssituation mit konstanten Parametern. Konkret handelte es sich dabei um die

Situation zweier Fahrzeuge, die sich hintereinander und richtungsgleich auf derselben Fahrspur befinden. In vorangegangenen Testfahrten stellte sich heraus, dass bei der nächtlichen Fahrt durch ein Waldgebiet die Wirkungsweise eines blendfreien Fernlichts am deutlichsten wahrgenommen wurde. Im Gegensatz zu einer Straßenszene ohne Bäume war das Licht hier oberhalb der Horizontalen gut zu erkennen.

Die Folgefahrt zweier Fahrzeuge wurde als bedeutsamer eingestuft, da bei annähernd konstantem Abstand die Ausblendung über lange Zeit auf den umliegenden Bäumen zu sehen war – sowohl für den ausblendenden als auch den ausgeblendeten Fahrzeugführer. Bei einer Begegnungssituation war die Dauer der sichtbaren Ausblendung hingegen deutlich geringer.

Die Funktion des hinterherfahrenden Fahrzeugs übernahm das *Propix*-Versuchsfahrzeug, die des vorausfahrenden ein Astra J in der fünftürigen Modellvariante. Die Situation sollte eine typische Fahrt auf einer ländlichen Straße bei etwa 80 km/h Fahrgeschwindigkeit nachbilden. Dabei wurde davon ausgegangen, dass das nachfolgende Fahrzeug einen konstanten Abstand von 40 m zum vorausfahrenden hält. Dieser Wert ergab sich aus der bekannten Faustformel, welche einen minimalen Sicherheitsabstand in Höhe des halben Tachowerts fordert[72]. Die Straße entsprach mit 3,12 m nach Michenfelder[73] der typischen Breite einer ländlichen Straße. Eine Skizze des Versuchsaufbaus ist Abbildung 4.1 zu entnehmen.

Die Versuche fanden bei Dunkelheit auf einer geraden Asphaltstrecke statt, die auf beiden Seiten von Bäumen umgeben war. Neben den zuvor genannten Gründen diente der beidseitig vorhandene Wald der Reduktion von Streulicht, welches durch eine Variation der Farbe oder Intensität potentiell die Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen gefährdet hätte.

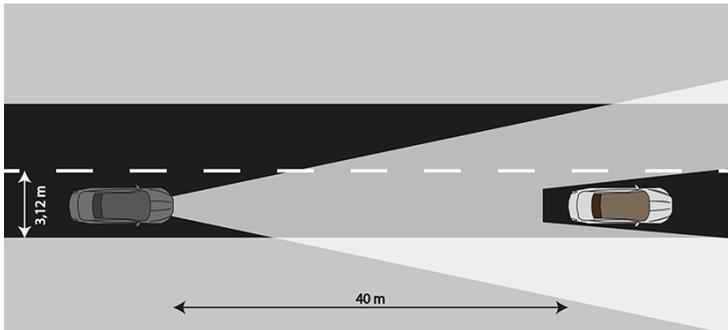


Abbildung 4.1: Skizze des Versuchsaufbaus der statischen Studie

Der Versuch sah ein sogenanntes „within subjects design“ vor, d.h. jedes Testitem wurde von jedem Probanden bearbeitet. Dies bietet generell den Vorteil, dass die Streuung der ermittelten Werte kleiner und damit die Teststärke größer ist [74]. Im vorliegenden Fall wurden vier verschiedene, fernlichtbasierte Ausblendungsstrategien von den Probanden bewertet. Als Referenz diente zusätzlich eine konventionelle Abblendlichtverteilung. Eine reale Aufnahme des Versuchsaufbaus ist Abbildung 4.2 zu entnehmen.



Abbildung 4.2: Anordnung der beiden Versuchsfahrzeuge in der statischen Probandenstudie; im Hintergrund ist der Opel Astra, im Vordergrund das *Propix*-Fahrzeug zu erkennen.

Die Charakteristik des blendfreien Fernlichts konnte über eine selbst entwickelte Software (Abbildung 4.3) gesteuert werden, welche als Erweiterung in die *Propix*-Software integriert wurde. Die Einstellungsmöglichkeiten beinhalteten die Größe und die Position der Ausblendung sowie einen fakultativen Sicherheitsbereich um die eigentliche Ausblendung herum. Schließlich konnte der Übergang zwischen der Ausblendung (dunkel) und dem Fernlichtbereich (hell) hinsichtlich Breite und Gradient definiert werden. Die Zusammenhänge zwischen den Parametern werden in Abbildung 4.4 visualisiert.

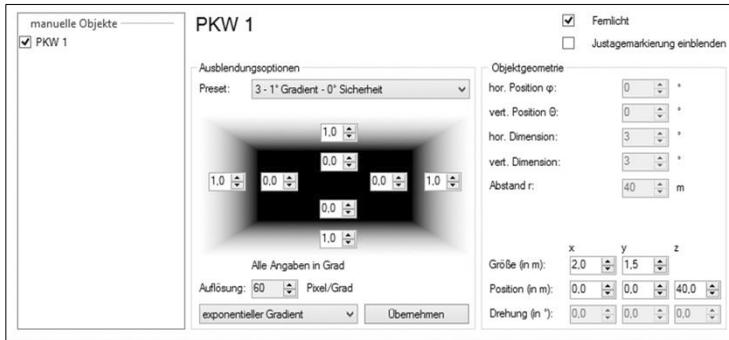


Abbildung 4.3: Benutzeroberfläche der *Propix*-Softwareerweiterung zur Einstellung der Ausblendungsparameter [70]

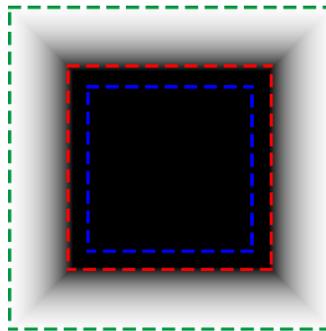


Abbildung 4.4: Zur Definition der Ausblendungsparameter: Innerhalb des blauen Rahmens befindet sich das Fahrzeug; der rote Rahmen gibt den fakultativen Sicherheitsbereich (komplett schwarz) an; der graduelle Übergang findet zwischen rotem und grünem Rahmen statt.

In Vorversuchen wurden mögliche Kombinationen aus Sicherheits- und Übergangsbereich subjektiv bewertet. Anhand dieser

Vorüberlegungen ergaben sich die in Tabelle 4.1 zusammengefassten Kombinationen, die den Probanden in der vorliegenden Studie zur Bewertung dargeboten wurden. Im Folgenden unterliegen die Kombinationen der Nomenklatur „G x _SB y “, stellvertretend für x° Gradient und y° Sicherheitsbereich.

Tabelle 4.1: Überblick über die in der statischen Studie verwendeten Kombinationen aus Sicherheitsbereich und graduellem Übergang von Hell zu Dunkel bei einer Ausblendung.

	Gradient	Sicherheitsbereich
Kombination 1	0°	1°
Kombination 2	0°	2°
Kombination 3	1°	0°
Kombination 4	2°	0°
Referenz	Abblendlichtverteilung	

Da für diesen statischen Versuchsaufbau keine aktive Objekterkennung durch die Kamera benötigt wurde, wurde die Position der Ausblendung über die Software fest vorgegeben. Die Breite betrug 2 m (2,86°), die Höhe 1,5m (2,15°). Innerhalb dieses Rechtecks war die Lichtverteilung schwarz, d.h. die Beleuchtungsstärke betrug in 40 m Entfernung gemäß Kapitel 3.3.1 ca. 0,06 lx. Es wurde ein exponentieller Gradient für den Hell-Dunkel Übergang gewählt. Die Begründung hierfür lag in der Tatsache, dass die Helligkeitsbewertung im Auge logarithmisch vonstattengeht und ein exponentieller Gradient damit einem linear empfundenen und mutmaßlich angenehmen Anstieg der Helligkeit entsprach.

Reale Aufnahmen der vier Kombinationen wurden in Abbildung 4.5 zusammengestellt.

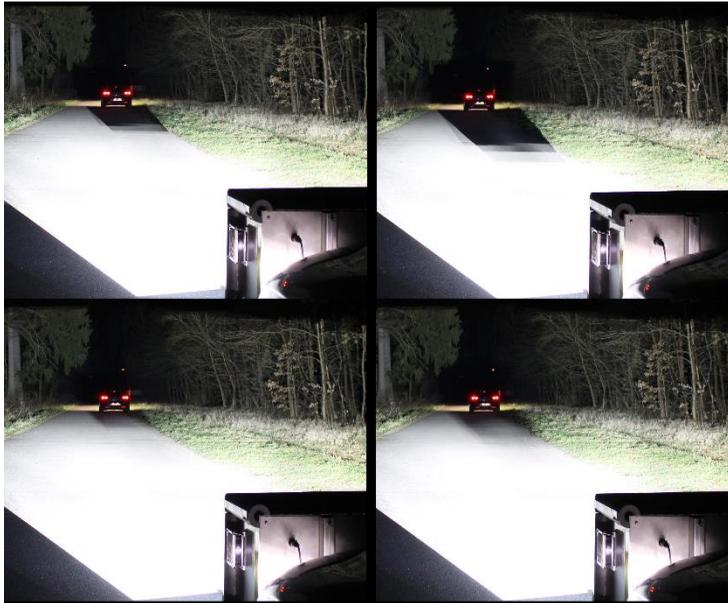


Abbildung 4.5: Reale Aufnahmen der Ausblendungen (ausgeblendetes Fahrzeug im Hintergrund); oben links: Kombination 1; oben rechts: Kombination 2 unten links: Kombination 3; unten rechts: Kombination 4

An der Studie nahmen 29 Probanden teil, die in zwei Altersklassen unterteilt waren. In Abbildung 4.6 ist eine Übersicht über die Altersstruktur des Probandenkollektivs aufgetragen. Die erste Gruppe bildeten 16, fahrtechnisch relativ unerfahrene, Probanden im Alter zwischen 20 und 30 Jahren. Die zweite Klasse bestand aus

13 erfahrenen Fahrzeugführern im Alter von 50 bis 65 Jahren. Diese Aufteilung wurde mit der Absicht durchgeführt, etwaige Einflüsse des Lebensalters auf die Bewertung der Parameterkombinationen feststellen zu können. Alle Probanden verfügten über eine gültige Fahrerlaubnis der Klasse B. In einem vorangegangenen optometrischen Screening wurde außerdem sichergestellt, dass die Probanden über die geforderte minimale Sehschärfe verfügten. Diese betrug gemäß der Fahrerlaubnis-Verordnung (FeV) 0,7 [75].

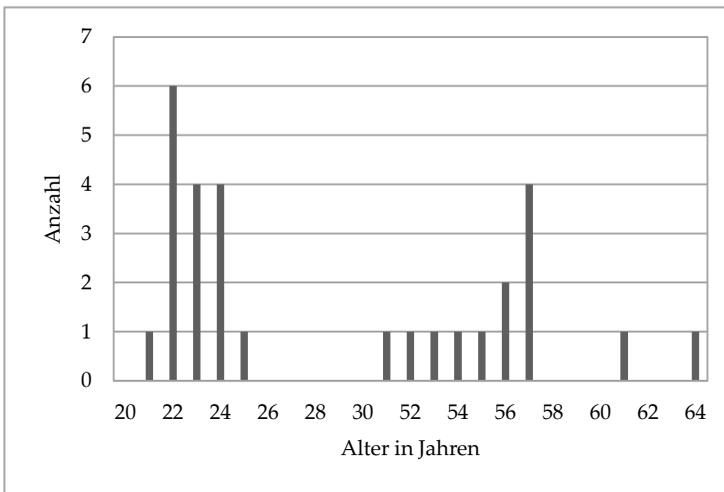


Abbildung 4.6: Altersstruktur der Probanden in der statischen Studie

4.2.4 DURCHFÜHRUNG

Es nahmen immer zwei Probanden gleichzeitig an der Studie teil. Der erste Proband befand sich auf dem Fahrersitz des nachfolgen-

den, ausblendenden Fahrzeugs (*Propix*), der zweite Proband entsprechend im vorausfahrenden, ausgeblendeten Fahrzeug (*Astra*). Die Innenspiegel des vorderen Fahrzeugs waren abgedeckt, um Irritationen durch das ungewohnte Erscheinungsbild des *Propix*-Scheinwerferracks zu vermeiden. Weiterhin waren das Radio und der Bildschirm des Infotainmentsystems deaktiviert, damit der Proband sich auf die Lichtverteilungen konzentrieren konnte. Für die Bewertung der Lichtverteilungen erhielten beide Probanden einen Fragebogen, den sie unmittelbar nach der Darbietung der jeweiligen Parameterkombination ausfüllten. Die Innenraumbeleuchtung beider Fahrzeuge wurde mit roten Filtern versehen, um den Adaptationsvorgang der Probanden so wenig wie möglich zu beeinflussen (vgl. Anhang B.3.3). Das vordere Fahrzeug befand sich während der Versuchsdurchgänge dauerhaft im Abblendlichtmodus (Xenonscheinwerfer).

Die erste Lichtverteilung stellte das Abblendlicht(ABBL) dar. Sie sollte die Probanden an das Licht des *Propix*-Scheinwerfers gewöhnen. Darauf folgten in randomisierter Abfolge die vier Parameterkombinationen (PK_x), die nach einmaliger Darbietung, wiederum randomisiert, wiederholt wurden. Beendet wurde ein Durchgang erneut mit der Abblendlichtverteilung. Zwischen den einzelnen Lichtverteilungen wurde ein Gitter (#) auf der Straße gezeigt, um den Probanden den unerwünschten direkten Vergleich aufeinander-folgender Lichtverteilungen zu erschweren. Eine beispielhafte Abfolge ist in Abbildung 4.7 zu sehen.

ABBL # PK₁ # PK₃ # PK₄ # PK₂ # PK₄ # PK₃ # PK₁ # PK₂ # ABBL

Abbildung 4.7: Beispielhafte Abfolge der Lichtverteilungen im statischen Versuch

Nach einem kompletten Durchgang tauschten die Probanden die Plätze und ein neuer Durchlauf mit variiertem Abfolge begann. Die Gesamtdauer für die Bewertungen betrug etwa 40 min.

Im nachfolgenden Fahrzeug hatten die Probanden die folgenden Aussagen hinsichtlich Sichtweite, Blendungsempfinden und visuellem Fahrkomfort zu beurteilen:

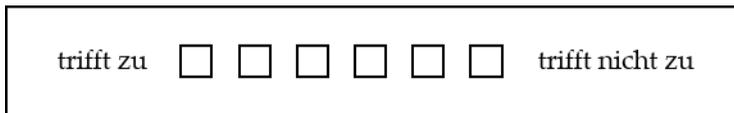
- „Ich sehe mit der gezeigten Lichtverteilung weit.“
⇒ **Aussage Sichtweite**
- „Ich habe das Gefühl, meinen Vordermann zu blenden.“
⇒ **Aussage Blendung**
- „Die Ausleuchtung des vorausfahrenden Fahrzeugs empfinde ich als angenehm.“
⇒ **Aussage Komfort 1**

Im vorausfahrenden Fahrzeug sollte nur der empfundene Komfort mit der folgenden Aussage beziffert werden:

- „Die Ausleuchtung der Straße empfinde ich als angenehm.“
⇒ **Aussage Komfort 2**

Der Ausdruck „Ausblendung“ wurde bewusst vermieden, um einer Präjudizierung, speziell bei der zweiten Aussage im nachfolgenden Fahrzeug, vorzubeugen. Jede Aussage wurde von den Probanden auf einer sechsstufigen, unipolaren Skala bewertet, welche in

Abbildung 4.8 dargestellt ist. Auf die Verwendung einer neutralen Mittelkategorie wurde verzichtet, da Probanden bei Fragebögen zu deren Wahl tendieren [76]. Zusätzlich hatten die Probanden bei jeder gezeigten Lichtverteilung die Möglichkeit, eine qualitative Bewertung hinsichtlich etwaiger Auffälligkeiten der Lichtverteilungen abzugeben. Die Ergebnisse sind in Anhang D.1 aufgelistet.



trifft zu trifft nicht zu

Abbildung 4.8: Unipolare Skala für die Stellungnahme der Probanden

4.2.5 ANALYSE DER DATEN

Die Bewertungen der Aussagen zu den fünf verschiedenen Lichtverteilungen (vgl. Abbildung 4.8) wurden für die Auswertungen mit den Werten 1-6 codiert. Diese waren den Probanden aus der Schulzeit bekannt und daher intuitiv zu verwenden. Für jede Lichtverteilung standen zwei Werte zur Verfügung, da die Darbietung einmal wiederholt worden war. Für die weitere Verarbeitung wurde das arithmetische Mittel dieser beiden Werte gebildet. Unterschied sich die Bewertung derselben Verteilung um mehr als zwei Skalenpunkte, so wurde diese aus der Auswertung ausgeschlossen. In diesem Fall wurde davon ausgegangen, dass der Proband die Lichtverteilung nicht valide bewerten konnte.

Gegenstand dieses Versuches war der Vergleich verschiedener Ausblendungsstrategien, weshalb die Bewertung der Abblendlichtverteilung nicht in die Gegenüberstellung miteinbezogen wurde. Die Vergleiche der Bewertungen der Abblendlichtverteilung vor und nach Darbietung der Ausblendungen sind in Abbildung 4.9-Abbildung 4.12 dargestellt. Es handelt sich hierbei um sogenannte Boxplots. Die Box beinhaltet dabei die Werte vom unteren 25- bis zum oberen 75-Quartil, die Antennen reichen vom 5-Perzentil bis zum 95-Perzentil. Je näher die Enden der Box bzw. der Antennen beieinander liegen, desto geringer ist die Streuung der Werte im abgebildeten Bereich. Die Kreise symbolisieren Ausreißer, deren Abstand vom 25-Quartil nach unten bzw. vom 75-Quartil nach oben zwischen dem eineinhalbfachen und dem dreifachen der Boxhöhe liegt. Beträgt der Abstand zu den Quartilen mehr als das Dreifache der Boxhöhe, so handelt es sich um mit einem Sternchen gekennzeichnete extreme Werte. Sowohl bei den Ausreißern als auch den extremen Werten wurden die entsprechenden Quelldaten hinsichtlich ihrer Plausibilität geprüft.

Die Kategorisierung erfolgt dabei anhand der zu bewertenden Aussagen. Letztere sind in Kapitel 4.2.4 nachzuschlagen.

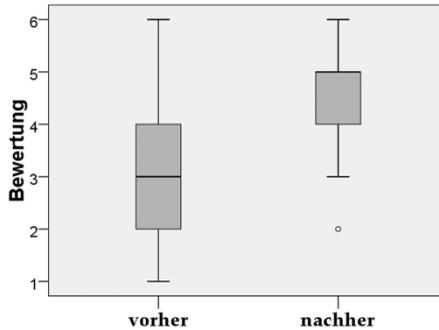


Abbildung 4.9: Boxplot der Bewertung der Abblendlichtverteilung bezüglich der Aussage *Sichtweite* (vor und nach der Darbietung der Ausblendungen); dabei bezeichnet die 1 eine große, die 6 eine geringe Sichtweite.

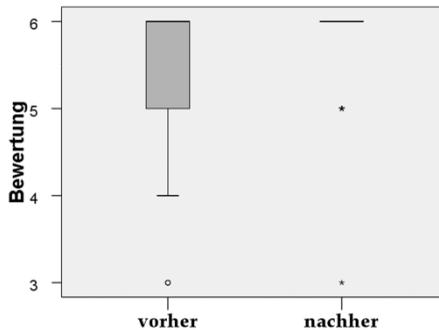


Abbildung 4.10: Boxplot der Bewertung der Abblendlichtverteilung bezüglich der Aussage *Blendgefühl* (vor und nach der Darbietung der verschiedenen Ausblendungen); dabei bezeichnet die 1 ein großes, die 6 ein geringes Blendgefühl.

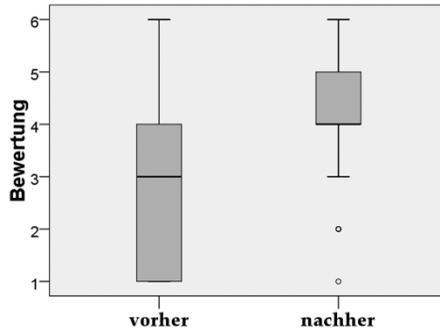


Abbildung 4.11: Boxplot der Bewertung der Abblendlichtverteilung bezüglich der Aussage Komfort 1 (vor und nach der Darbietung der *Ausblendungen*); dabei bezeichnet die 1 einen großen, die 6 einen geringen Komfort.

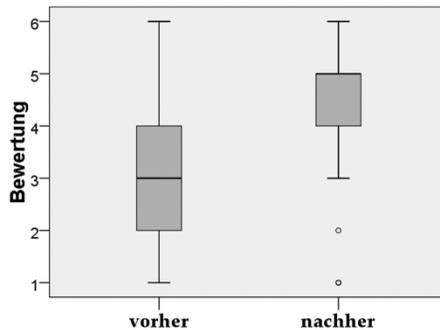


Abbildung 4.12: Boxplot der Bewertung der Abblendlichtverteilung bezüglich der Aussage Komfort 2 (vor und nach der Darbietung der *verschiedenen Ausblendungen*); dabei bezeichnet die 1 einen großen, die 6 einen geringen Komfort.

Um die Stichproben statistisch bewerten zu können, wurden zunächst die Null- und Alternativhypothese formuliert. Die Nullhypothese besagte, dass Unterschiede zwischen den Stichproben rein zufälliger Natur waren. Die Alternativhypothese lautete folglich, dass es Unterschiede zwischen den Stichproben gab, die nicht dem Zufall entsprangen. Dabei handelte es sich um eine zweiseitige Alternativhypothese, da die Stichproben sowohl nach oben als auch nach unten abweichen konnten.

Für die Anwendung von standardisierten statistischen Tests ist es von Relevanz, ob die Stichproben normalverteilt sind. Hierzu wurden die Daten einem Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest unterzogen. Dieser stellt die Nullhypothese, dass die Unterschiede zwischen den Verteilungen rein zufälliger Natur sind. Dabei handelt es sich um eine normalverteilte Stichprobe, wenn der aus dem Test resultierende p-Wert größer als 0,05 ist. Die detaillierten Ergebnisse sind in Anhang D.2 zu finden.

Es ist zu erkennen, dass nicht alle Stichproben normalverteilt sind. Zur weitergehenden Analyse sollten daher nach gängiger Lehrmeinung nichtparametrische Tests verwendet werden. In der Praxis ist es jedoch üblich, trotz der fehlenden Normalverteilung der Daten parametrische Tests zu verwenden. Ursache hierfür ist, dass die Resultate von nichtparametrischen Tests weniger aussagekräftig als die von parametrischen Tests sind. Der Fehler, der durch das Fehlen der Normalverteilung der Daten entsteht, wird als vernachlässigbar erachtet ([74], [77], [78]).

Aufgrund des gewählten „within subjects design“ handelte es sich um abhängige Stichproben. Um Aussagen darüber treffen zu können, welche Kombination am schlechtesten oder am besten bewertet wurde, wurde daher ein Spezialfall der Varianzanalyse, der t-Test für abhängige Stichproben, eingesetzt. Dieser untersucht zwei Stichproben hinsichtlich der oben beschriebenen Hypothesen. Das Ergebnis lässt unmittelbar darauf schließen, welche der Stichproben im Vergleich zu den anderen besonders gut und welche besonders schlecht bewertet wurden.

Der t-Test wurde für jede Aussage sechsmal angewandt, da es sich bei vier Stichproben um sechs mögliche Kombinationen handelt. Als Beispiel sei der Paarvergleich „G0_SB1 – G0_SB2“ in Abbildung 4.14 angeführt. Die Reihenfolge der Kombinationenpaare (in SPSS als „paarige Differenzen“ bezeichnet) spielt für das Testergebnis, den p-Wert bzw. die zweiseitige Signifikanz 0,000 in der letzten Spalte, keine direkte Rolle, fließt jedoch indirekt über das Vorzeichen des Mittelwerts der paarigen Differenz (-0,880) mit ein. Wurde die in der ersten Spalte zuerst aufgeführte Kombination besser als die zweite Kombination bewertet, so hat der Mittelwert ein positives Vorzeichen. Im umgekehrten Fall ist der Mittelwert entsprechend negativ.

Der α -Fehler oder Fehler 1. Art wurde, wie in der Praxis üblich, zu 2,5 % gewählt, da es sich wie zuvor erwähnt um eine zweiseitige Alternativhypothese handelte. Der α -Fehler bezeichnet die in Kauf genommene Wahrscheinlichkeit, sich gegen die Nullhypothese zu entscheiden, obwohl diese zutrifft. Liegt die aus einem statistischen

Test resultierende Signifikanz unterhalb des 2,5 %-Niveaus, so wird die Nullhypothese abgelehnt und die Alternativhypothese angenommen. Der Vollständigkeit halber sei noch der β -Fehler, auch als Fehler 2. Art bezeichnet, erwähnt. Dieser tritt auf, wenn die Nullhypothese angenommen wird, obwohl in Wirklichkeit die Alternativhypothese zutrifft.

Die Durchführung von sechs einzelnen t-Tests hätte zu einer Kumulierung des α -Fehlers geführt. Daher wurde die sogenannte Bonferroni-Korrektur des Signifikanzniveaus angewandt [79]. Die Korrektur besagt für den vorliegenden Fall, dass für sechs direkte Paarvergleiche das Signifikanzniveau auf den sechsten Teil, d.h. von 2,5 % auf 0,42 %, reduziert werden muss. Die Unterschiede zweier Stichproben müssen demnach größer sein, um als signifikant klassifiziert zu werden. Die Bonferroni-Korrektur gilt daher als konservative Methode zur Vermeidung der Fehlerkumulierung (vgl. [74], [77] und [78]).

Im angeführten Beispiel wurde die Signifikanz mit 0,000 beziffert. Dieser Wert ist kleiner als das Signifikanzniveau von 0,0042, weshalb der Unterschied der Parameterpaars „G0_SB1 – G0_SB2“ als statistisch signifikant klassifiziert wurde. Der Mittelwert der paarigen Differenz wurde vom t-Test zu -0,880 ermittelt. Die resultierende Aussage der statistischen Untersuchung lautete demnach, dass für die Aussage *Sichtweite* die Ausblendungskombination G0_SB2 im Mittel 0,880 Bewertungspunkte mehr erhielt als die Ausblendungskombination G0_SB1.

Der Vollständigkeit halber sind die jeweilige Teststärke und die Effektgröße nach Cohen in den Tabellen angegeben. Für die Bewertung der Parameterkombinationen bezüglich der Aussage *Sichtweite* ist der Boxplot in Abbildung 4.13 dargestellt. Die Ergebnisse der t-Tests sind in Abbildung 4.14, die Signifikanz der Ergebnisse sowie die Effektgrößen und Teststärken in Tabelle 4.2 aufgelistet.

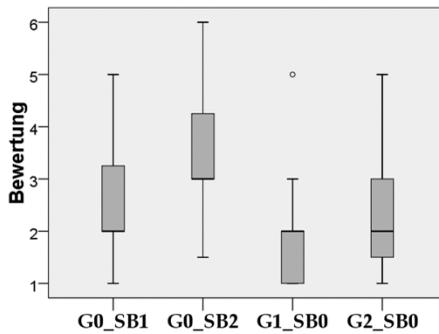


Abbildung 4.13: Boxplot der Bewertungen der Aussage *Sichtweite* (1: trifft zu, 6: trifft nicht zu)

	Paarige Differenzen					t	df	Sig. (2-seitig)
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert	95% Konfidenzintervall der Differenz				
				Unterer	Oberer			
Paar 1 G0_SB1 - G0_SB2	-,88000	,76757	,15351	-1,19684	-,56316	-5,732	24	,000
Paar 2 G0_SB1 - G1_SB0	,76786	,95725	,18090	,39667	1,13904	4,245	27	,000
Paar 3 G0_SB1 - G2_SB0	,33333	,55470	,10675	,11390	,55277	3,122	26	,004
Paar 4 G0_SB2 - G1_SB0	1,70000	1,07044	,21409	1,25815	2,14185	7,941	24	,000
Paar 5 G0_SB2 - G2_SB0	1,33333	,77553	,15830	1,00586	1,66081	8,423	23	,000
Paar 6 G1_SB0 - G2_SB0	-,44444	,91287	,17568	-,80556	-,08332	-2,530	26	,018

Abbildung 4.14: t-Test für verbundene Stichproben für die Aussage *Sichtweite*

Tabelle 4.2: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Ausblendungen für die Aussage *Sichtweite*

Vergleichspaar	Signifikante Differenz	Effektgröße	Teststärke
G0_SB1 - G0_SB2	ja	1,313	0,999
G0_SB1 - G1_SB0	ja	0,802	0,894
G0_SB1 - G2_SB0	ja	0,348	0,162
G0_SB2 - G1_SB0	ja	1,589	0,999
G0_SB2 - G2_SB0	ja	1,720	0,999
G1_SB0 - G2_SB0	nein	0,486	0,371

Für die Bewertung der Parameterkombinationen bezüglich der Aussage *Blendung* ist der Boxplot in Abbildung 4.15 dargestellt. Die Ergebnisse der t-Tests sind in Abbildung 4.16, die Signifikanz der Ergebnisse sowie die Effektgrößen und Teststärken in Tabelle 4.3 aufgelistet.

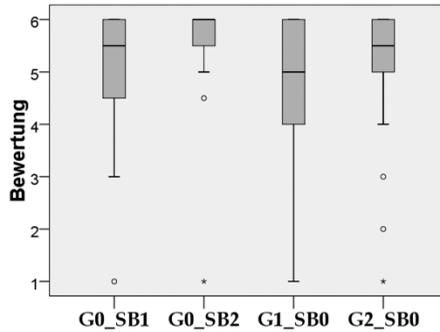


Abbildung 4.15: Boxplot der Bewertungen der Aussage *Blendung* (1: trifft zu, 6: trifft nicht zu)

	Paarige Differenzen					t	df	Sig. (2-seitig)
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert	95% Konfidenzintervall der Differenz				
				Unterer	Oberer			
Paar 1 G0_SB1 - G0_SB2	-,35185	,61730	,11880	-,59605	-,10766	-2,962	26	,006
Paar 2 G0_SB1 - G1_SB0	,71154	,98156	,19250	,31508	1,10800	3,696	25	,001
Paar 3 G0_SB1 - G2_SB0	,06522	,67931	,14165	-,22854	,35897	,460	22	,650
Paar 4 G0_SB2 - G1_SB0	1,01923	1,11786	,21923	,56772	1,47074	4,649	25	,000
Paar 5 G0_SB2 - G2_SB0	,45833	,89584	,18286	,08005	,83662	2,506	23	,020
Paar 6 G1_SB0 - G2_SB0	-,38636	,84419	,17998	-,76066	-,01207	-2,147	21	,044

Abbildung 4.16: t-Test für verbundene Stichproben für die Aussage *Blendung*

Tabelle 4.3: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Ausblendungen für die Aussage Blendung

Vergleichspaar	Signifikante Differenz	Effektgröße	Teststärke
G0_SB1 - G0_SB2	nein	0,571	0,527
G0_SB1 - G1_SB0	ja	0,725	0,765
G0_SB1 - G2_SB0	nein	0,096	0,014
G0_SB2 - G1_SB0	ja	0,911	0,943
G0_SB2 - G2_SB0	nein	0,511	0,352
G1_SB0 - G2_SB0	nein	0,457	0,235

Für die Bewertung der Parameterkombinationen bezüglich der Aussage *Komfort 1* ist der Boxplot in Abbildung 4.17 dargestellt. Die Ergebnisse der t-Tests sind in Abbildung 4.18, die Signifikanz der Ergebnisse sowie die Effektgrößen und Teststärken in Tabelle 4.4 aufgelistet.

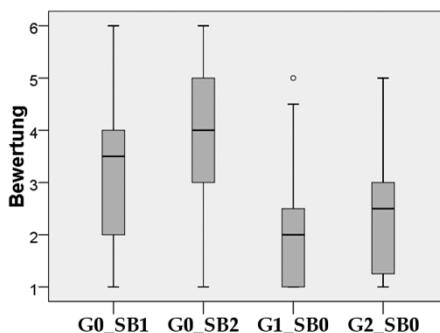


Abbildung 4.17: Boxplot der Bewertungen der Aussage *Komfort 1* (1: trifft zu, 6: trifft nicht zu)

	Paarige Differenzen					t	df	Sig. (2-seitig)
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert	95% Konfidenzintervall der Differenz				
				Unterer	Oberer			
Paar 1 G0_SB1 - G0_SB2	-,73077	,88579	,17372	-1,08855	-,37299	-4,207	25	,000
Paar 2 G0_SB1 - G1_SB0	1,09259	1,10102	,21189	,65704	1,52814	5,156	26	,000
Paar 3 G0_SB1 - G2_SB0	,92308	1,21402	,23809	,43272	1,41343	3,877	25	,001
Paar 4 G0_SB2 - G1_SB0	1,84615	1,36213	,26713	1,29598	2,39633	6,911	25	,000
Paar 5 G0_SB2 - G2_SB0	1,78000	1,17331	,23466	1,29568	2,26432	7,585	24	,000
Paar 6 G1_SB0 - G2_SB0	-,23077	1,14220	,22400	-,69211	,23057	-1,030	25	,313

Abbildung 4.18: t-Test für verbundene Stichproben für die Aussage *Komfort 1*

Tabelle 4.4: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Ausblendungen für die Aussage *Komfort 1*

Vergleichspaar	Signifikante Differenz	Effektgröße	Teststärke
G0_SB1 - G0_SB2	ja	0,825	0,882
G0_SB1 - G1_SB0	ja	0,993	0,980
G0_SB1 - G2_SB0	ja	0,760	0,811
G0_SB2 - G1_SB0	ja	1,355	0,999
G0_SB2 - G2_SB0	ja	1,517	0,999
G1_SB0 - G2_SB0	nein	0,202	0,045

Für die Bewertung der Parameterkombinationen bezüglich der Aussage *Komfort 2* ist der Boxplot in Abbildung 4.19 dargestellt. Die Ergebnisse der t-Tests sind in Abbildung 4.20, die Signifikanz der Ergebnisse sowie die Effektgrößen und Teststärken in Tabelle 4.5 aufgelistet.

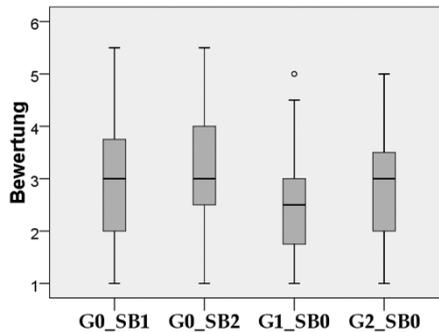


Abbildung 4.19: Boxplot der Bewertungen der Aussage *Komfort 2* (1: trifft zu, 6: trifft nicht zu)

	Paarige Differenzen					t	df	Sig. (2-seitig)
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert	95% Konfidenzintervall der Differenz				
				Unterer	Oberer			
Paar 1 G0_SB1 - G0_SB2	-,27083	,96661	,19731	-,67900	,13733	-1,373	23	,183
Paar 2 G0_SB1 - G1_SB0	,37500	1,06577	,21755	-,07504	,82504	1,724	23	,098
Paar 3 G0_SB1 - G2_SB0	,18750	,83161	,16975	-,16366	,53866	1,105	23	,281
Paar 4 G0_SB2 - G1_SB0	,55172	1,10474	,20514	,13150	,97194	2,689	28	,012
Paar 5 G0_SB2 - G2_SB0	,50000	,69437	,12894	,23588	,76412	3,878	28	,001
Paar 6 G1_SB0 - G2_SB0	-,05172	,82748	,15366	-,36648	,26303	-,337	28	,739

Abbildung 4.20: t-Test für verbundene Stichproben für die Aussage *Komfort 2*

Tabelle 4.5: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Ausblendungen für die Aussage *Komfort 2*

Vergleichspaar	Signifikante Differenz	Effektgröße	Teststärke
G0_SB1 - G0_SB2	nein	0,280	0,081
G0_SB1 - G1_SB0	nein	0,352	0,140
G0_SB1 - G2_SB0	nein	0,226	0,051
G0_SB2 - G1_SB0	nein	0,500	0,435
G0_SB2 - G2_SB0	ja	0,720	0,823
G1_SB0 - G2_SB0	nein	0,063	0,012

4.2.6 INTERPRETATION

4.2.6.1 SICHTWEITE

Der folgende Teil gibt einen Überblick über die Ergebnisse und insbesondere deren Interpretation. Die Abblendlichtverteilung wurde bei den Aussagen bezüglich der Sichtweite nach der Darbietung der Fernlichtverteilungen etwa eine Bewertungsstufe schlechter als zuvor bewertet. Dies ist nicht weiter erstaunlich, da die Probanden die Abblendlichtverteilung des *Propix*-Scheinwerfers zu Beginn des Versuchs nur in Relation zu der ihrer eigenen Scheinwerfer setzen konnten. Nach der Darbietung der Fernlichtverteilungen verglichen die Probanden unweigerlich die abschließend angezeigte Abblendlichtverteilung mit den Fernlichtverteilungen, die über eine deutlich weitere und breitere Ausleuchtung verfügten. Hierdurch wurde das Abblendlicht mutmaßlich schlechter bewertet.

Die Stichproben der Ausblendungen unterschieden sich bis auf das Paar G1_SB0 – G2_SB0 alle signifikant voneinander. Die Mediane der drei Stichproben G0_SB1, G1_SB0 und G2_SB0 lagen mit dem Wert 2 alle auf demselben, guten Niveau. Dies bedeutet, dass die Sichtweite aus der Sicht des ausblendenden Fahrzeugs bei der Verwendung eines blendfreien Fernlichts als überwiegend gut angesehen wurde. Einzige Ausnahme bildete die Ausblendung mit einem 2° breiten Sicherheitsbereich, welche die Probanden mehr als einen Bewertungspunkt schlechter erachteten.

4.2.6.2 BLENDUNG

Die Mediane aller fünf Stichproben lagen für die Aussage *Blendung* oberhalb des Werts 5 auf der Bewertungsskala. Die Frage, ob die Probanden das Gefühl hatten, mit dem Licht ihres Scheinwerfers den Fahrer des vorausfahrenden Fahrzeugs zu blenden, beantworteten die Probanden damit durchweg mit „nein“. Die Variante eines relativ schmalen, 1° breiten, graduellen Übergangs zwischen Hell und Dunkel wird tendenziell noch am schlechtesten bewertet. Dies könnte daher rühren, dass die Probanden die Ausblendung im Vergleich zu den harten Ausblendungen bzw. zum breiteren graduellen Übergang nicht so stark wahrnahmen und deshalb die Blendung des Vorausfahrenden als größer einschätzten.

4.2.6.3 KOMFORT 1

Die Bewertungen der Aussage *Fahrkomfort 1*, d.h. ob die Probanden die Ausleuchtung des vorausfahrenden Fahrzeugs als angenehm empfinden, ähnelten denen der Aussage *Sichtweite*. Das Abblendlicht wurde nach der Darbietung der Ausblendungen etwa eine Bewertungsstufe schlechter eingeschätzt. Der Grund hierfür lag mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenso darin, dass sich die Referenzen der Probanden durch die zuvor erfolgte Darbietung des blendfreien Fernlichts verschoben hatten. Bei den Ausblendungen zeigte sich eine statistisch hoch signifikante, deutliche Präferenz der graduellen Übergänge zwischen Hell und Dunkel.

Hinsichtlich des empfundenen Komforts wurde offensichtlich ein weicheres Erscheinungsbild der Lichtverteilung im Vergleich zu harten Kanten bevorzugt.

4.2.6.4 KOMFORT 2

Die Aussage *Komfort 2* bewerteten die Probanden aus Sicht des vorderen Fahrzeugs, welches das eigene Xenon-Abblendlicht angeschaltet hatte und welches aus der Fernlichtverteilung des nachfolgenden *Propix*-Fahrzeugs ausgenommen wurde. Das Abblendlicht wurde wie bei den Aussagen *Komfort 1* und *Sichtweite* nach der Darstellung des blendfreien Fernlichts schlechter bewertet. Dies deutete darauf hin, dass die Probanden selbst aus Sicht des vorausfahrenden Fahrzeugs es als angenehm empfanden, dass speziell im Seitenbereich durch das Fernlicht mehr Licht vorhanden war. Eine breitere Seitenausleuchtung wurde demnach indirekt durch die Herabwertung der Abblendlichtverteilung als bevorzugt eingestuft. Die vier Ausblendungsstrategien des blendfreien Fernlichts wurden im Mittel mit der Bewertungsstufe 3 oder besser gesehen. Die Lichtverteilungen wurden damit alle als relativ angenehm eingestuft und wiesen keine oder nur sehr schwache statistische Unterschiede auf. Speziell wurde der Effekt, bei Vorhandensein eines blendfreien Fernlichts quasi in einen Tunnel zu fahren nicht statistisch nachweisbar negativ bewertet. Dahingegen zeigten Kommentare wie „der Dunkeltunnel ist irritierend, wenn der Übergang von Licht zum Dunkeln kaum diffus ist“ oder „man fährt in ein schwarzes Loch“ jedoch, dass speziell eine harte

Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer zu Beeinträchtigungen des Fahrkomforts führen kann. Auch wenn dies in der vorliegenden statischen Studie statistisch nicht nachgewiesen werden konnte, wiesen die Aussagen der Probanden auf grundsätzliche Bedenken hinsichtlich harter Kontraste im Straßenverkehr hin. Generell ist hier jedoch zu bedenken, dass die Bewertung einer statischen Verkehrsszene immer nur eine Teilmenge der Dynamik darstellt, denen die Probanden im realen Straßenverkehr ausgesetzt sind.

4.2.7 SCHLUSSFOLGERUNG

Insgesamt ergaben die Probandenversuche, dass weichere Übergänge zwischen dem hellen Teil einer Fernlichtverteilung und dem dunklen Bereich um das ausgeblendete Fahrzeug herum hinsichtlich Fahrkomfort und subjektiver Sichtweite bevorzugt werden. Tendenziell wurde der 1° breite, graduelle Übergang dabei besser eingestuft als der 2° breite. Dies weist darauf hin, dass Übergänge über einen größeren Winkelbereich hinweg keinen Vorteil mit sich brächten. Eine mögliche Verbesserung wäre nur in der Richtung noch schmalere Übergangsbereiche zwischen Hell und Dunkel denkbar, wobei hier ein Abwägen zwischen erzieltm Gewinn und zu investierendem technischen Mehraufwand durchzuführen wäre. Für feinere Übergänge müsste die Größe der einzelnen Pixel entsprechend verringert werden.

Vorangegangene Untersuchungen warfen hier ein durchaus widersprüchliches Bild auf. Damasky [80] zitierte in seiner Dissertationsschrift eine Probandenstudie von Zechnal [81] aus dem

Jahr 1966, in der verschiedene HDG hinsichtlich der Erkennbarkeitsentfernung untersucht wurden. Zechnal betonte damals, dass eine scharfe HDG zwar eine Vermeidung von Blendung begünstige, bei den Probanden aber ein „unruhiges Fahrgefühl“ und den Eindruck eines „streng begrenzten Sichtfelds, über das hinaus keine Wahrnehmung von Objekten möglich sei“, erzeugte. Die Probanden bestätigten in der vorliegenden Studie die Resultate von Zechnal sowohl durch ihre Bewertungen als auch die Aussagen in den zusätzlichen Kommentaren (vgl. Anhang D.1). Die Probanden bestätigten Zechnals Ansicht, dass ein harter Übergang zwischen Hell und Dunkel „sehr unangenehm“ oder „zu krass“ sei. Exemplarisch sei hier der Kommentar aufgeführt, wonach der „fließende Übergang vom hellen Scheinwerferlicht zur Ausblendung des Vordermanns sehr angenehm sei“.

Demgegenüber stehen Ergebnisse von Locher [82] und Sanchez [83]. Letzterer wies darauf hin, dass viele Versuche ergeben hätten, dass für eine Ausblendung Gradienten akzeptiert werden, die die Steilheit einer HDG oder größer aufweisen. Genauere Informationen zu Umfang und Art dieser Studien gab Sanchez nicht preis. Locher machte hingegen präzisere Angaben. In einer Studie mit 28 Probanden bewertete er verschiedene Technologien zur Realisierung eines blendfreien Fernlichts (VarioX und VarioLED mit einer Walze, zwei Matrixscheinwerfer mit einer Auflösung von 25 und 100 Segmenten). Vergleichbar mit der vorliegenden Studie wurde der subjektive Fahrkomfort ermittelt. Insbesondere setzte Locher einen „sportiven“, d.h. harten sowie einen „komfortablen“, d.h.

weichen Übergang zwischen Hell und Dunkel ein. Die Ergebnisse zeigten, dass den Probanden kleine Unterschiede nicht auffielen und von daher die Bewertungen nicht differierten. Nur bei sehr deutlichen Abweichungen zwischen den beiden Modi bevorzugten die Probanden den harten Übergang. Sie führten die Begründung an, eine harte Ausblendung wies die Wirksamkeit des Systems besser nach. Locher schlussfolgerte, dass „[...] viele Probleme, die in Arbeitsgruppen der Vorentwicklung diskutiert werden, für die Probanden nicht wahrnehmbar sind [...]“ [82]. Der Studie von Locher lag ein dynamischer Versuchsablauf zugrunde, weswegen die Ergebnisse beider Studien nicht eins zu eins verglichen werden können. Die Resultate von Sanchez und Locher weisen jedoch darauf hin, dass die Ergebnisse der vorliegenden Studie nicht uneingeschränkt verallgemeinert werden können.

4.3 DYNAMISCHE STUDIE: VORFELDAUSLEUCHTUNG

4.3.1 WISSENSCHAFTLICHER KONTEXT

Der Einfluss der Vorfeldaussleuchtung eines Fahrzeugs auf den Fahrzeugführer konnte bis dato nicht abschließend wissenschaftlich geklärt werden. Die Relevanz dieses Themas wird bereits durch die große Menge an Veröffentlichungen, die in Fachzeitschriften oder wissenschaftlichen Abhandlungen erschienen sind, deutlich. Völker beispielsweise zitierte in seiner Habilitationsschrift [84] eine Studie von Locher [85], in der Probanden nach ihrer Einschätzung bezüglich der Vorfeldaussleuchtung gefragt wurden. Dabei zeigten die Ergebnisse, dass die Meinungen weit auseinander gingen. Während manche Probanden ein helles Vorfeld bevorzugten, befürworteten andere ein dunkles. Manchen Probanden wiederum war es egal, wie hell das Vorfeld ihres Fahrzeugs war.

Immer wieder wurde vermutet, dass ein helles Vorfeld die visuelle Leistungsfähigkeit negativ beeinflusst. Als Begründung wurde auf der einen Seite die klassische Streulichttheorie nach Holladay [86] angeführt, nach der eine Lichtquelle im Gesichtsfeld zu einer Erhöhung des Schwellenkontrasts und damit zu einer Verminderung der Sehleistung führt (vgl. Anhang B.3.3). Völker verfolgte diese These und untersuchte den Einfluss der Leuchtdichte des Vorfelds auf den Schwellenkontrast in einem statischen Experiment, an dem 20 Probanden teilnahmen [84]. Tendenziell erhöhte sich der

Schwellenkontrast um etwa 10 % bei Leuchtdichten, die mehr als 10 cd/m² betragen. Völker kam jedoch zu dem Ergebnis, dass die Vorfeldleuchtdichte nur einen „extrem geringen Einfluss“ im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren des Schwellenkontrasts besitzt. In einer weiteren Studie ermittelte Völker die Abhängigkeit zwischen Vorfeldausleuchtung und Erkennbarkeitsentfernung. Hierzu bewegte er Sehobjekte auf Probanden zu, welche sich fest an einem Ort befanden. Es handelte sich demnach um einen halb dynamischen Versuch. Die Probanden mussten charakteristische Merkmale der Objekte erkennen, wodurch deren Identifizierung verifiziert werden konnte. Völker verwendete Vorfeldleuchtdichten zwischen 1 und 5 cd/m² und stellte bei der höchsten Leuchtdichte einen signifikanten Rückgang der Erkennbarkeitsentfernung um bis zu 5 % im Vergleich zu den anderen Niveaus fest.

Jebas griff die These von Völker in seiner Diplomarbeit auf [87]. Unter Zuhilfenahme des Versuchsscheinwerfers von Rechentín [46] führte er eine dynamische Probandenstudie durch. Die Vorfeldleuchtdichte variierte er in einem Bereich von 2 cd/m² bis 4 cd/m². Die ermittelte Erkennbarkeitsentfernung stieg bei ihm, im Gegensatz zu den Studien von Völker, um ca. 10-15 %.

Neben der Streulichttheorie wurde beispielsweise von Jebas [88] vermutet, dass ein helles Vorfeld ein visuell attraktives Muster ist und dadurch die Fixationen verstärkt hierauf gerichtet sind. Hierdurch folgerte er, dass die visuelle Leistungsfähigkeit ebenso herabgesetzt würde. Jebas führte im Rahmen seiner Dissertation Versuche mit Vorfeldausleuchtungen verschiedener Helligkeit

durch und protokollierte dabei die Fixationen der Probanden. Er verglich die beiden Leuchtdichteniveaus 5 cd/m^2 und 10 cd/m^2 miteinander und kam zu dem Schluss, dass kein signifikanter Einfluss der Vorfelddhelligkeit auf das Blickverhalten des Fahrzeugführers besteht.

Für eine umfassende Betrachtung des Einflusses der Vorfeldausleuchtung sind den Ansätzen der Streulichttheorie die Vorgänge der Helligkeitsadaptation, die im menschlichen Auge vor sich gehen, entgegen zu setzen. Moon und Spencer haben bereits in den vierziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts gezeigt, dass ein mit 10° Öffnungswinkel vergleichsweise kleiner Bereich des Sehfelds für mehr als 95 % der Helligkeitsadaptation des Auges bestimmend ist ([89], [90]). Das Vorfeld eines Fahrzeugs befindet sich direkt in diesem Feld. Untersuchungen von Mortimer[91], Graf [92] oder Sivak [93] haben ergeben, dass sich die Fixation des Fahrzeugführers während einer nächtlichen Fahrt mit Abblendlicht hauptsächlich auf den Bereich unterhalb der HDG richtete. Auch Brückmann [94] bestätigte diese Aussage. Diem [95] und Stahl [96] gaben Entfernungen zwischen 20 m und 70 m^1 an, zwischen denen sich die Fixationen überwiegend bewegten. Dahlem [97] fand den Schwerpunkt der Fixation bei einer Entfernung von 40 m. In diesen Studien wurde auch gezeigt, dass sich die Fixationsdauer bei nächtlichen Fahrten signifikant gegenüber den Tagfahrten erhöhte. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich der Fahrer mangels alternativer visueller Reize zumeist an der eigenen Lichtverteilung orientiert.

¹ in Fahrtrichtung vom Auto aus gerechnet

Diesen Effekt machten sich u.a. Schneider [98], Jebas [88] und Hörter [99] in ihren Dissertationsschriften zum Thema Markierungslicht zu Nutze, indem sie versuchten, den Blick des Fahrzeugführers gezielt auf potentielle Gefahrenobjekte zu lenken, um hierdurch die Erkennbarkeitsentfernung der Objekte zu erhöhen.

Die lange Fixation des Vorfelds in Kombination mit den Ergebnissen von Moon und Spencer legt den Schluss nahe, dass die Vorfeldausleuchtung einen wesentlichen Anteil an der visuellen Leistungsfähigkeit des Fahrzeugführers hat. Wäre dies der Fall, so ließe sich durch gezieltes Steuern des Helligkeitsniveaus Einfluss auf den sicherheitsrelevanten Faktor der Erkennbarkeit von Objekten im Straßenverkehr nehmen. Es existieren jedoch auch Studien wie die von Carraro [100]², die besagen, dass nicht der zentrale, foveale Bereich des Gesichtsfelds maßgeblich für die Helligkeitsadaptation des Fahrerauges ist, sondern die Leuchtdichten der Peripherie.

Die Frage nach dem Adaptationsniveau des Auges ist in Bezug auf die Blendung des Fahrzeugführers durch andere Verkehrsteilnehmer von großer Relevanz. Ein Beispiel dafür, wie durch eine Beeinflussung des Adaptationsniveaus versucht wird, die Blendung durch andere Fahrzeuge zu reduzieren, ist das in Abbildung 4.21 dargestellte Antiblendlicht [101]. An der Sonnenschutzblende angebracht, stellt es eine leuchtende Fläche dar, deren Intensität gemäß einer hinterlegten Regelungskurve und mit Hilfe von

² zitiert in Völker [84]

Photodioden an die Umgebungshelligkeit bzw. an die Helligkeit z.B. entgegenkommender Scheinwerfer angepasst werden kann. In einer statischen Probandenstudie von Jebas und Michenfelder [88] wurde gezeigt, dass kein signifikanter Einfluss auf den Schwellenkontrast besteht, wenn das Antiblendlicht bei eingeschalteten Scheinwerfern des Gegenverkehrs eingesetzt wird. Eine darauffolgende dynamische Untersuchung von Michenfelder und Niedling [102] ergab keinen signifikanten Einfluss des Antiblendlichts auf die Erkennbarkeitsentfernung. Ein Erklärungsansatz für die Wirkungslosigkeit des Antiblendlichts liefern die zuvor im Text beschriebenen Ergebnisse von Moon und Spencer, gemäß denen das Antiblendlicht als stark periphere Lichtquelle nur einen unwesentlichen Anteil an den Adaptationsvorgängen des Auges hat.



Abbildung 4.21: Illustration des Antiblendlichts, welches, an der Sonnenschutzblende angebracht, die Blendung durch andere Verkehrsteilnehmer reduzieren soll [100].

Greule [103] hat in seiner Dissertation den Einfluss von Leuchtdichteänderungen auf die Schwellwerterhöhung des Kontrasts untersucht. Er fand u.a. heraus, dass kleine Adaptationsfelder ($<10^\circ$) eine deutlich größere Schwellwerterhöhung mit sich brachten als große Felder. Dies würde bedeuten, dass die Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge, deren scheinbare Fläche in der Regel vergleichsweise klein ist, zu einer hohen Schwellwerterhöhung des Kontrasts führen. Ein höherer Schwellenkontrast geht dabei, wie es sich in vielen Studien gezeigt hat, mit einer Reduktion der Erkennbarkeitsentfernung einher. Das Vorfeld erscheint vom Fahrerraum aus gesehen in einem deutlich größeren Winkel als 10° (speziell horizontal). Folglich lässt sich vermuten, dass die Schwellwerterhöhung geringer ausfällt, wenn das Leuchtdichtenniveau des Vorfelds an die äquivalente Schleierleuchtdichte angepasst wird, welche durch die Scheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeugs entsteht. Als Ursache hierfür kann die Vergrößerung des Adaptationsfelds durch das Vorfeld angesehen werden.

4.3.2 FORSCHUNGSFRAGE

Für die Beurteilung automobiler Lichttechnik hinsichtlich der Fahrsicherheit stellt die Erkennbarkeitsentfernung eine bedeutsame Größe dar. Sie ist ein Maß dafür, aus welcher Entfernung Objekte im Straßenverkehr erkannt werden, wobei eine höhere Erkennbarkeitsentfernung mehr Zeit zum Reagieren und Agieren für den Fahrzeugführer impliziert. Im Fall der Blendung des Fahrzeugführers durch ein entgegenkommendes Fahrzeug wird durch die im

Auge entstehende Schleierleuchtdichte die Kontrastwahrnehmung und damit die Erkennbarkeitsentfernung verringert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Hypothese nachgegangen, dass sich eine Adaptation der Leuchtdichte des Vorfelds an die, durch den Gegenverkehr verursachte, Schleierleuchtdichte auf die Erkennbarkeitsentfernung im nächtlichen Straßenverkehr auswirkt.

4.3.3 STRUKTURELLER AUFBAU DER STUDIE

Die Erkennbarkeitsentfernung kann nur in dynamischen Fahrversuchen mit Probanden ermittelt werden, was die Komplexität des Versuchsaufbaus im Vergleich zu einer statischen Studie deutlich erhöhte. Um die Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen zu gewährleisten, wurden die Fahrversuche der im Folgenden beschriebenen Studie auf dem Hockenheimring in Hockenheim durchgeführt. Dieser bot den Vorteil einer dem öffentlichen Verkehr nicht zugänglichen Strecke, welche über einen normalen Straßenasphalt und die notwendige Straßengeometrie verfügte. Die fehlende Markierung der Straßenmitte und die größere Breite der Fahrbahn führten zu einem für die Probanden, zumindest anfangs, ungewohnten Fahrgefühl, was jedoch für die Aussagekraft der Ergebnisse als unerheblich erachtet wurde. Die Versuche fanden bei Dunkelheit statt, um realitätsgetreue Umfeldleuchtdichten zu erhalten. Aufgrund der empfindlichen Versuchsaufbauten und vor allem wegen der Reflexionseigenschaften des Fahrbahnbelags wurden die Versuche ausschließlich bei trockenen Witterungsbedingungen durchgeführt. Eine regennasse Fahrbahn hätte die

Vorfeldleuchtdichte aus Sicht des Fahrzeugführers deutlich herabgesetzt, da die Rückwärtsreflexion bei Nässe deutlich weniger Gewicht als bei Trockenheit aufgewiesen hätte.

Auf der Versuchsstrecke wurden drei Begegnungssituationen mit entgegenkommenden Fahrzeugen simuliert, um die Auswirkungen der Vorfeldausleuchtung bei einer Blendung durch den Gegenverkehr ermitteln zu können. Das Versuchskonzept sah es vor, dass jeder Proband jede der folgenden drei Vorfeldausleuchtungen bewertet:

- *Minimum*
- *Maximum*
- *Adaptiv*

Es handelte sich demnach um ein „within subjects design“, dessen grundlegende Vor- und Nachteile in Kapitel 4.2.3 erläutert werden. Als Vorfeld wurde der Bereich von 5 m bis 25 m vor dem Fahrzeug festgelegt. Dies entsprach dem Mittelwert der Zoneneinteilung gemäß älterer Untersuchungen wie der von Neumann [12] oder von Jack [104] und der Einteilung jüngerer Studien wie der von Dahlem [97]. Die Breite entsprach mit ca. 6 m der einer durchschnittlichen Landstraße. Die Lichtverteilung entsprach, bis auf den Bereich des zuvor definierten Vorfelds, der einer ECE-konformen Abblendlichtverteilung.

Das Niveau *Minimum* hatte eine mittlere Leuchtdichte von 1,5 cd/m² (vgl. Abbildung 4.22). Diese Größenordnung wurde auch in den Studien von Jebas [88] und Völker [84] verwendet und entsprach in

etwa den Vorfeldleuchtdichten der aktuellen Fahrzeuggeneration. Das Niveau *Minimum* konnte damit als Referenz für die beiden anderen Leuchtdichteniveaus verwendet werden.

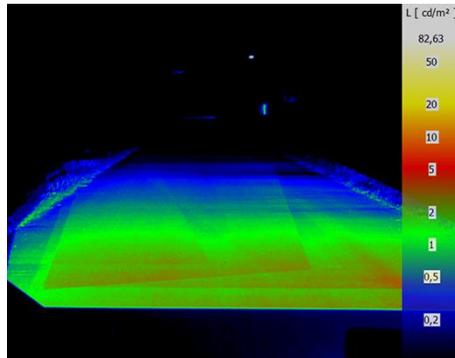


Abbildung 4.22: Leuchtdichte des Vorfeldniveaus *Minimum*

Das Niveau *Maximum* lag bei einem mittleren Leuchtdichtewert von 10 cd/m² (vgl. Abbildung 4.23). Dieser Wert orientierte sich an den Untersuchungen von Völker [84], der bei Vorfeldleuchtdichten von mehr als 10 cd/m² eine signifikante Erhöhung des Schwellenkontrasts feststellen konnte. Hierdurch waren auch in der vorliegenden Studie Auswirkungen auf die visuelle Sehleistung der Probanden zu erwarten.

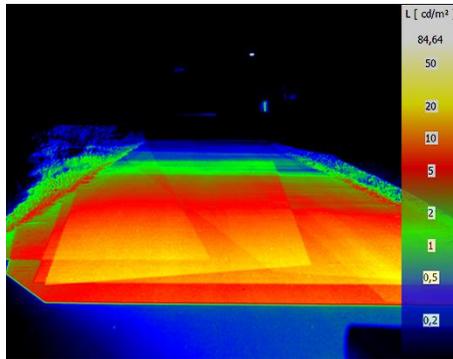


Abbildung 4.23: Leuchtdichte des Vorfeldniveaus *Maximum*

Das adaptive Niveau hatte eine Grundleuchtdichte von $1,5 \text{ cd/m}^2$, um die gewohnten Adaptationsbedingungen für den Fahrzeugführer zu gewährleisten. In den Begegnungssituationen wurde die Leuchtdichte des Vorfelds gemäß der im Auge entstehenden Schleierleuchtdichte vergrößert. Der Verlauf der Schleierleuchtdichte wurde zuvor in einer Messreihe ermittelt. Grundlage für die Berechnung der Schleierleuchtdichte war die von der CIE 2002 veröffentlichte Formel zur Blendungsbewertung [105]. Hierzu musste die Beleuchtungsstärke E gemessen werden. Der Photometerkopf *LMT 388252* wurde in einem für den Linksverkehr vorgesehenen Fahrzeug an der Position des Fahrerauges positioniert und die Beleuchtungsstärke protokolliert. Der Abstand d zwischen dem Messfahrzeug und der Blendlichtquelle wurde während der Messungen von $5 \text{ m} - 200 \text{ m}$ in $2,5 \text{ m}$ Schritten variiert. Neben der Beleuchtungsstärke E wurde für jeden Messschritt der korrespondierende Winkel θ zwischen der Normalen zur Front des Messfahr-

zeugs und der Blendlichtquelle berechnet. Der Zusammenhang zwischen den Größen wird in Abbildung 4.24 veranschaulicht. Der Verlauf der aus der Beleuchtungsstärke E und dem Winkel θ errechneten Schleierleuchtdichte ist in Abbildung 4.25 zu erkennen.

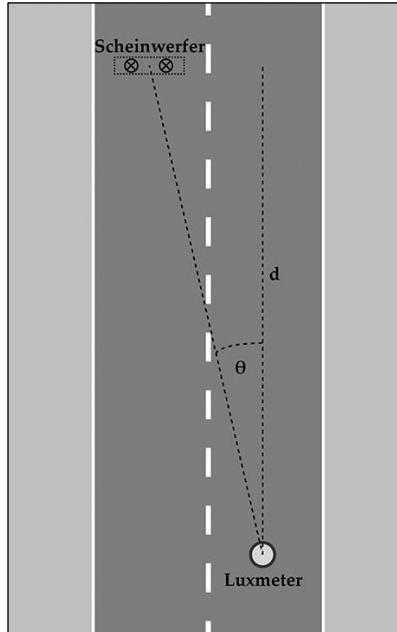


Abbildung 4.24: Prinzipieller Aufbau bei der Messung der Schleierleuchtdichte

Der Verlauf der Schleierleuchtdichte wurde für das Vorfeldniveau *Adaptiv* mithilfe der *Propix*-Software auf der Straße nachgebildet. Die von der CIE publizierte Blendungsformel nach Stiles-Holladay besitzt nur für Winkel $>1^\circ$ Gültigkeit. Die Modulation der Vorfeld-

leuchtdichte erfolgte deshalb erst ab einer Distanz zum entgegenkommenden Fahrzeug von 150 m, was in etwa einem Winkel von 1° entsprach. Von einer Anwendung der für kleinere Winkel angepassten Blendungsformel wurde aus Gründen der Praktikabilität abgesehen. Um keinen sprunghaftigen Anstieg der Leuchtdichte zu erhalten, wurde bereits ab einer Distanz von 300 m die Vorfeldleuchtdichte erhöht. Der Verlauf im Bereich von 300-150 m entsprach dabei der gespiegelten Charakteristik der Schleierleuchtdichte aus Abbildung 4.25. Zur besseren Verständlichkeit sei auf Abbildung 4.26 und Abbildung 4.27 verwiesen.

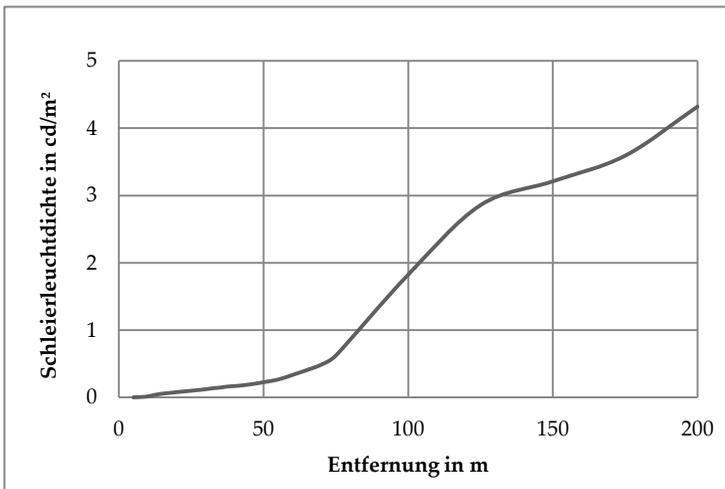


Abbildung 4.25: Berechnete Schleierleuchtdichte bei einem entgegenkommenden Fahrzeug gemäß CIE 146/147 [104]

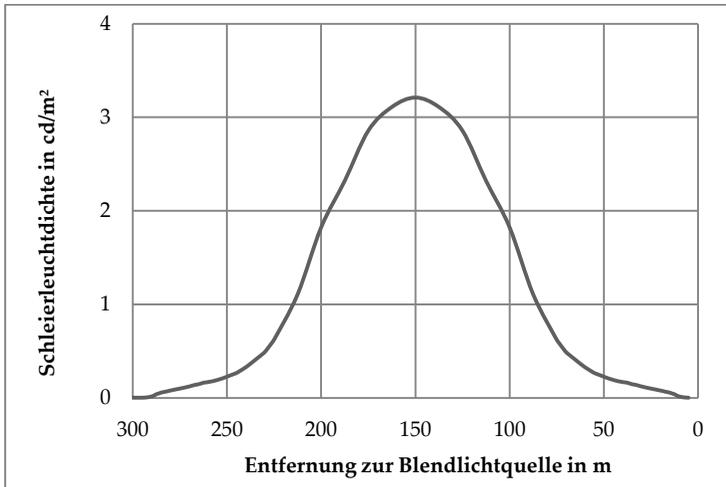


Abbildung 4.26: In den Versuchen verwendeter Verlauf der Schleierleuchtdichte; die Entfernung bezieht sich auf die Position des Propix-Versuchsfahrzeugs relativ zum entgegenkommenden Fahrzeug.

An der Studie nahmen 25 Probanden im Alter von 20-35 Jahren teil. Gemäß einer Untersuchung von Flannagan [106] war die Erkennbarkeitsentfernung bei jüngeren Fahrern höher als bei älteren Fahrern. Flannagan ließ hierzu Fußgänger auf Fahrzeuge zulaufen, während die Probanden deren Erkennung durch eine Hupe bestätigen mussten. Flannagan vermutete, dass die älteren Probanden durch die altersbedingte Trübung der Linse empfindlicher für eine Streulichtbildung im Auge waren. Einschränkend muss angemerkt werden, dass nur ein Leuchtdichteniveau in der Studie verwendet wurde.

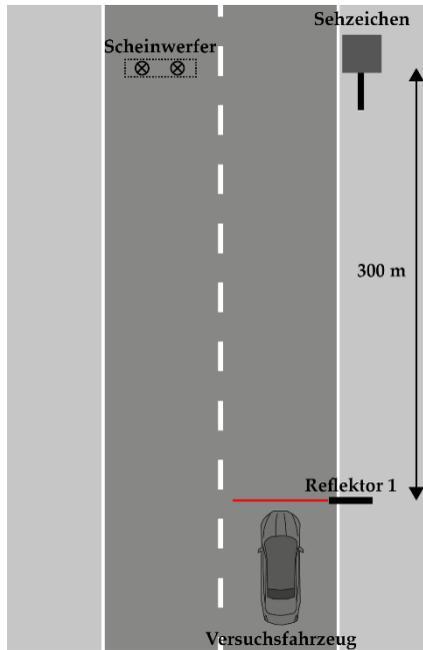


Abbildung 4.27: Der Leuchtdichteverlauf des Vorfelds in der Variante *Adaptiv* wurde beim Passieren des ersten Reflektors gestartet; die Entfernung zur Blendlichtquelle betrug dabei 300 m.

Die These einer verringerten Reduktion der Sehleistung im Blendungsfall wird demnach mit höherer Wahrscheinlichkeit bei jüngeren als bei älteren Fahrzeugführern verifiziert werden können, was die Wahl des Alters der Probanden begründete.

Die Probanden verfügten alle über eine gültige Fahrerlaubnis der Klasse B und wurden einem optometrischen Screening unterzogen. Damit wurde sichergestellt, dass die von der Fahrerlaubnis-

Verordnung (FeV) vorgeschriebene Mindestsehschärfe von 0,7 erreicht wurde [75].

4.3.4 DURCHFÜHRUNG

Die Probanden fuhren mit dem *Propix*-Versuchsfahrzeug jeweils sechs Runden mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h auf dem Hockenheimring. Den Beginn und das Ende jedes Durchgangs markierte der Ausgang der Boxengasse. Jeweils zwei Runden wurden dabei mit derselben Vorfeldvariante durchlaufen. Die Abfolge der Vorfeldniveaus wurde randomisiert, um Positions- und Gewöhnungseffekten vorzubeugen. Eine beispielhafte Abfolge war damit z.B.:

Minimum # Maximum # Maximum # Adaptiv # Adaptiv # Minimum

Abbildung 4.28: Beispielhafte Abfolge der Vorfeldleuchtdichten in der dynamischen Studie

An drei Positionen waren Blendlichtquellen auf der Strecke aufgebaut, die entgegenkommende Fahrzeuge simulierten. Die Positionen der entgegenkommenden Fahrzeuge sowie der Verlauf der Strecke sind in Abbildung 4.29 dargestellt. Während der gesamten Fahrt befand sich der Versuchsleiter auf der Rückbank des Versuchsfahrzeuges direkt hinter dem Probanden und steuerte den Versuchsablauf.

Zur Simulation des Gegenverkehrs wurden jeweils zwei Halogen-Projektionsmodule auf einem Profilrack befestigt. Die Abblendlichtverteilung der Module wurde vor Beginn der Versuche justiert. Als durchschnittlicher Wert für die Straßenspurbreite wurde 3,14 m angenommen [73]. Einen Überblick über den Aufbau der Racks gibt Abbildung 4.30.

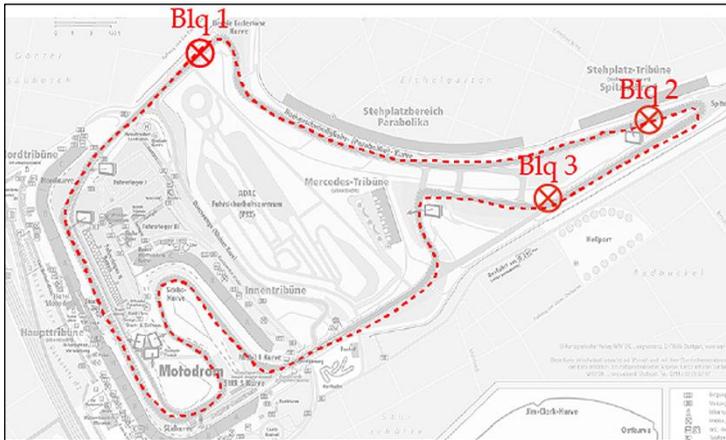


Abbildung 4.29: Schema der Versuchsstrecke auf dem Hockenheimring; die simulierten, entgegenkommenden Fahrzeuge sind mit BLQ 1-3 gekennzeichnet.

Zur Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernung wurden am rechten Fahrbahnrand Sehobjekte positioniert. Sie befanden sich auf der gleichen Höhe wie die Blendlichtquellen. Die Position wurde folgendermaßen motiviert: Vor der Blendlichtquelle konnten die Sehobjekte nicht stehen, da vor dem Hintergrund des entgegenkommenden Fahrzeugs ein Negativkontrast entstanden wäre, der

mutmaßlich die Erkennbarkeitsentfernung deutlich erhöht hätte und den Nachweis des Einflusses des Vorfelds erschwert hätte. Weiterhin lag die zu erwartende Erkennbarkeitsentfernung gemäß den Versuchen von Völker [84] und eigenen Studien [102] bei ca. 50-60 m.



Abbildung 4.30: Projektionsmodule an einem Profilschienerack zur Simulation eines entgegenkommenden Fahrzeugs

Nach gängiger Lehrmeinung und gemäß den Richtlinien der ECE liegt der Bereich der stärksten Blendung im Punkt B50L. Wenn sich das Sehobjekt hinter der Blendlichtquelle befunden hätte, wäre die Blendung schon wieder zurückgegangen, bevor das Objekt in den Bereich der Erkennbarkeit gelangt wäre. Das mögliche Wirkpotential der adaptiven Vorfeldbeleuchtung wäre mutmaßlich geringer gewesen. Die Sehobjekte wurden aus diesem Grund auf der gleichen Höhe wie die Blendlichtquellen aufgestellt.

Als Sehobjekte wurden quadratische Schilder eingesetzt, die mit der RAL³-Farbe Verkehrsgrau B (7043) matt lackiert worden waren. Der diffuse Reflexionsgrad wurde messtechnisch erfasst und betrug ca. 10 %. Die Abmessungen der Objekte werden in Abbildung 4.31 visualisiert. Um eine Identifizierung der Objekte durch die Probanden zu gewährleisten, wurden entweder links, rechts oder oberhalb des großen Quadrats zusätzliche Quadrate mit halber Kantenlänge angebracht. Zusätzlich zu den drei Varianten mit wurde eine Variante ohne zusätzliches kleines Quadrat als Sehobjekt verwendet. Hier sollten die Probanden angeben, dass sie kein kleines Quadrat erkennen konnten. Insgesamt belief sich die Wahrscheinlichkeit, das Identifikationsmerkmal durch Raten korrekt angeben zu können, damit auf 25 %.

Die Probanden bekamen während der Fahrt die Aufgabe, die Lage der kleineren Quadrate zu erkennen. Nach der Erkennung sollten sie unmittelbar einen Taster betätigen, welcher am Lenkrad befestigt wurde. Gleichzeitig sollten sie die Lage des kleineren Quadrats und damit die Identifizierung des Sehobjekts mündlich bestätigen. Stimmt die gemachten Angaben nicht mit den Sollwerten überein, so wurde die Situation aus der Auswertung ausgeschlossen.

³ Der Name RAL leitet sich aus dem *Reichsausschuss für Lieferbedingungen* ab und wird heute unter der Bezeichnung *Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.* geführt. Die RAL Farben weisen eine vierstellige Nummer auf und dienen der genormten Verwendung von Farben im industriellen Einsatz.

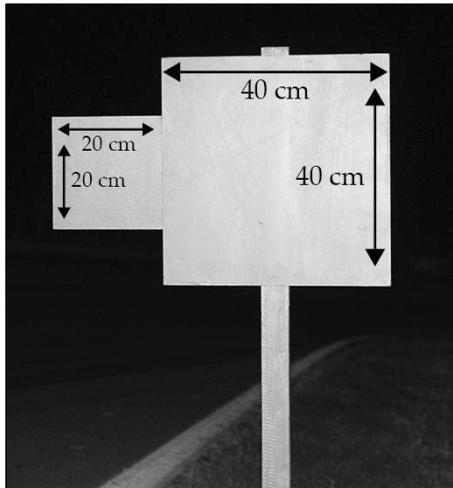


Abbildung 4.31: Sehobjekt mit charakteristischem Merkmal links

Der Tastendruck gab einem eigens dafür entwickelten Softwaretool den Startbefehl zur Messung. Die Software erfasste dabei mithilfe eines Hallsensors die Radumdrehungen ab dem Startzeitpunkt der Messung. Unter Einbezug des zuvor bestimmten Radumfangs konnte hieraus die zurückgelegte Strecke auf einen halben Radumfang (ca. 1,20 m) genau berechnet werden. Am Standfuß der Sehobjekte waren seitlich retroreflektierende Folien angebracht. Eine am Versuchsfahrzeug angebrachte Lichtschranke registrierte die Vorbeifahrt am Sehobjekt mittels der Reflexion und gab das Stoppsignal an das Softwaretool. Die zurückgelegte Entfernung zwischen Tastendruck und Vorbeifahrt am Sehobjekt war die Erkennbarkeitsentfernung. In Abbildung 4.32 werden die Zusammenhänge dieser Messung verdeutlicht.

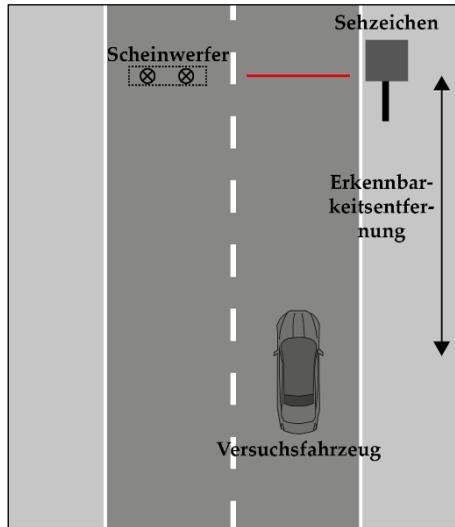


Abbildung 4.32: Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung mittels des zurückgelegten Wegs von der Identifizierung des Sehobjekts (Tastendruck) bis zu der Vorbeifahrt an letzterem

Am Ende jedes Durchgangs mussten die Probanden zusätzlich einen Fragebogen ausfüllen. Dieser beinhaltete im ersten Teil Fragen zur empfundenen Blendung beim Passieren der Blendlichtquellen. Die erste Frage betraf das Vorfeld, die zweite Frage die entgegenkommenden Fahrzeuge. Zur Bewertung wurde die von deBoer [107] vorgeschlagene Skala eingesetzt. Teil 1 des Fragebogens ist in Abbildung 4.33 dargestellt. Es wurde nicht nach den drei Begegnungssituationen unterschieden, sondern die am unangenehmsten empfundene Situation als Bewertungsgrundlage verwendet.

Frage 1: Wie stark fühlten Sie sich durch das Licht im Nahbereich des Fahrzeuges geblendet?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
<i>unerträglich</i>		<i>störend</i>		<i>Gerade akzeptabel</i>		<i>zufriedenstellend</i>		<i>Unbemerkbar</i>

Frage 2: Wie stark fühlten Sie sich durch das Licht der entgegenkommenden Fahrzeuge geblendet?

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
<i>unerträglich</i>		<i>störend</i>		<i>Gerade akzeptabel</i>		<i>zufriedenstellend</i>		<i>Unbemerkbar</i>

Abbildung 4.33: Fragebogen Teil 1 zur Ermittlung der subjektiven Blendung

Der zweite Teil des Fragebogens wurde von den Probanden nach Beendigung aller sechs Durchgänge bearbeitet. Er beinhaltet allgemeine Fragen zur Beurteilung der Versuchsdurchführung und ist in Abbildung 4.34 zu sehen.

Frage 1:	Haben Sie bereits vorher an einer ähnlichen Studie teilgenommen?		
<input type="checkbox"/>	<i>Nein</i>	<input type="checkbox"/>	<i>Ja</i>

Frage 2:	Bitte beurteilen Sie den Schwierigkeitsgrad der Versuchsfahrt						
<i>sehr schwer</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<i>sehr leicht</i>
	1	2	3	4	5	6	

Frage 3:	Wie empfanden Sie die Bedienung des Versuchsfahrzeuges?						
<i>sehr schwer</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<i>sehr leicht</i>
	1	2	3	4	5	6	

Frage 4:	Wie empfanden Sie die Einweisungen des Versuchsleiters?						
<i>sehr verständlich</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<i>sehr verwirrend</i>
	1	2	3	4	5	6	

Frage 5:	Wie sehr fühlten Sie sich durch die Messaufbauten (z.B. Kameras; Taster etc.) im Versuchsfahrzeug abgelenkt?						
<i>sehr stark</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<i>gar nicht</i>
	1	2	3	4	5	6	

Abbildung 4.34: Fragebogen Teil 2 zur allgemeinen Bewertung des Versuchsablaufs

4.3.5 ANALYSE DER DATEN

4.3.5.1 ERKENNBARKEITSENTFERNUNG

Für jeden Probanden ergaben sich 18 Werte für die Erkennbarkeitsentfernung. Getrennt nach den drei Vorfeldniveaus wurde für jeden Probanden der arithmetische Mittelwert errechnet. Durch die Messwiederholungen und die folgende Mittelung sollte die Streuung der Werte, welche bei Feldversuchen erwartungsgemäß höher als bei Laborversuchen liegt, reduziert werden. Den im Kapitel 4.2.5 beschriebenen Boxplot der Erkennbarkeitsentfernungen zeigt Abbildung 4.35.

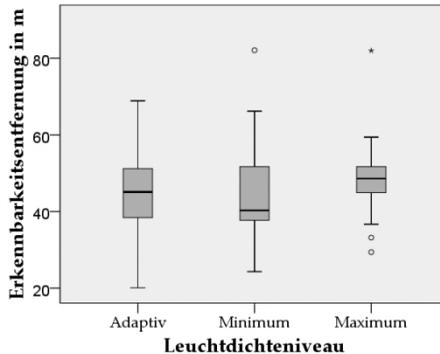


Abbildung 4.35: Boxplot der ermittelten Erkennbarkeitsentfernung, getrennt nach den drei verschiedenen Leuchtdichteniveaus des Vorfelds

Für die statistische Analyse der Stichproben wurden wie in Kapitel 4.2.5 zunächst die Null- und die Alternativhypothese formuliert. Die aufgestellten Hypothesen waren gleich denen aus der statischen Studie in Kapitel 4.2.

Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest ergab, dass ausschließlich die Stichproben *Adaptiv* und *Maximum* einer Normalverteilung folgen. Die detaillierten Ergebnisse des Tests sind Anhang E.2 zu entnehmen.

Gemäß den in Kapitel 4.2.5 aufgeführten Erläuterungen wurde trotz der fehlenden Normalverteilung der Stichproben der parametrische t-Test für abhängige Variablen für die drei Stichprobenpaare „*Adaptiv-Minimum*“, „*Adaptiv-Maximum*“ und „*Minimum-Maximum*“ verwendet.

Der α -Fehler wurde wiederum zu 5 % gewählt. Aufgrund der zweiseitigen Alternativhypothese halbiert sich das Signifikanzniveau zu 2,5 %. Weiterhin handelt es sich um drei zusammenhängende Paarvergleiche, weshalb zur Vermeidung der Kumulierung des α -Fehlers das Signifikanzniveau auf 0,8 % korrigiert wurde [79].

Die Ergebnisse der t-Tests sind in Abbildung 4.36, die Signifikanz der Ergebnisse sowie die Effektgrößen und Teststärken in Tabelle 4.6 aufgelistet.

	Paarige Differenzen					t	df	Sig. (2-seitig)
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert	95% Konfidenzintervall der Differenz				
				Unterer	Oberer			
Paar 1 Adaptiv - Minimum	,2320	9,4509	1,8902	-3,6691	4,1331	,123	24	,903
Paar 2 Adaptiv - Maximum	-4,4000	6,7512	1,3502	-7,1868	-1,6132	-3,259	24	,003
Paar 3 Minimum - Maximum	-4,6320	6,7196	1,3439	-7,4057	-1,8583	-3,447	24	,002

Abbildung 4.36: t-Test für verbundene Stichproben für die Erkennbarkeitsentfernung

Tabelle 4.6: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Vorfelddniveaus hinsichtlich der Erkennbarkeitsentfernung

Vergleichs paar	Signifikante Differenz	Effektgröße	Teststärke
Adaptiv – Minimum	nein	0,025	0,017
Adaptiv – Maximum	ja	0,652	0,748
Minimum – Maximum	ja	0,689	0,801

4.3.5.2 PSYCHOLOGISCHE BLENDUNG

Die aus dem ersten Teil des Fragebogens erhaltenen Daten der psychologischen Blendung wurden wie die der Erkennbarkeitsentfernung für jeden Probanden gemittelt. Die Boxplots für die Ergebnisse bezüglich des Vorfelds sind in Abbildung 4.37 dargestellt. Analog dazu ist die Bewertung für die entgegenkommen den Fahrzeuge in Abbildung 4.38 zu finden.

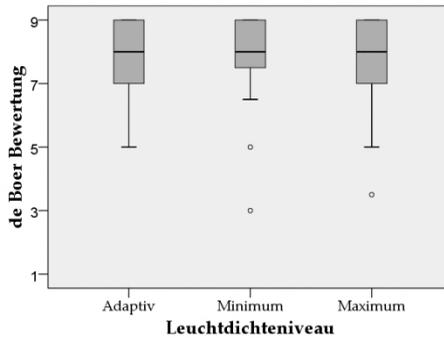


Abbildung 4.37: Boxplot der psychologischen Blendung bezüglich einer etwaigen Blendung durch das Vorfeld

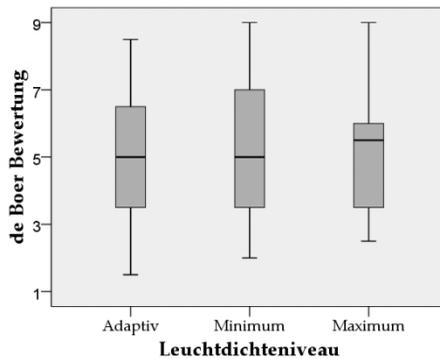


Abbildung 4.38: Boxplot der psychologischen Blendung bezüglich einer etwaigen Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge

Die Ergebnisse der Kolmogorov-Smirnov-Tests sind in Abbildung E.5 und Abbildung E.6 zu finden. Gemäß den in Kapitel 4.2.5 aufgeführten Erläuterungen wurde trotz der fehlenden Normalver-

teilung der Stichproben der parametrische t-Test für abhängige Variablen verwendet. Die drei Stichprobenpaare stellten „*Adaptiv-Minimum*“, „*Adaptiv-Maximum*“ und „*Minimum-Maximum*“ dar.

Die Resultate der Tests sind in Abbildung 4.39 sowie in Abbildung 4.40 dargestellt. Die Signifikanz der Ergebnisse sowie die Effektgrößen und Teststärken sind in Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7 aufgeführt.

	Paarige Differenzen					t	df	Sig. (2-seitig)
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert	95% Konfidenzintervall der Differenz				
				Unterer	Oberer			
Paar 1 Adaptiv - Minimum	,0200	,6690	,1338	-,2561	,2961	,149	24	,882
Paar 2 Adaptiv - Maximum	,1000	,6292	,1258	-,1597	,3597	,795	24	,435
Paar 3 Minimum - Maximum	,0800	,7171	,1434	-,2160	,3760	,558	24	,582

Abbildung 4.39: t-Test für verbundene Stichproben hinsichtlich der psychologischen Blendung durch das Vorfeld

Tabelle 4.7: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Vorfeldniveaus hinsichtlich der psychologischen Blendung durch das Vorfeld

Vergleichspaar	Signifikante Differenz	Effektgröße	Teststärke
Adaptiv – Minimum	nein	0,030	0,018
Adaptiv – Maximum	nein	0,159	0,051
Minimum – Maximum	nein	0,112	0,033

	Paarige Differenzen						t	df	Sig. (2-seitig)
	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler Mittelwert	95% Konfidenzintervall der Differenz					
				Unterer	Oberer				
Paar 1 Adaptiv - Minimum	-,2000	1,7854	,3571	-,9370	,5370	-,560	24	,581	
Paar 2 Adaptiv - Maximum	-,2200	,7649	,1530	-,5357	,0957	-1,438	24	,163	
Paar 3 Minimum - Maximum	-,0200	1,6104	,3221	-,6847	,6447	-,062	24	,951	

Abbildung 4.40: t-Test für verbundene Stichproben hinsichtlich der psychologischen Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge

Tabelle 4.8: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Vorfeldniveaus hinsichtlich der psychologischen Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge

Vergleichspaar	Signifikante Differenz	Effektgröße	Teststärke
Adaptiv – Minimum	nein	0,112	0,297
Adaptiv – Maximum	nein	0,288	0,887
Minimum – Maximum	nein	0,012	0,064

4.3.6 INTERPRETATION

Die erzielten, gemittelten Werte der Erkennbarkeitsentfernung lagen im Bereich von 45-55 m und damit etwa 10 m niedriger als bei vergleichbaren Untersuchungen mit Ablendlicht. Dies rührte mit hoher Wahrscheinlichkeit daher, dass die im *Propix* verwendete Lichtverteilung nur über wenig Streulicht oberhalb der HDG verfügte. Da es sich aber um relative Vergleiche der drei Vorfeldniveaus handelte, wird der Einfluss als vernachlässigbar erachtet. Die Anpassung der Vorfeldleuchtdichte an die Schleierleuchtdichte brachte keinen Effekt mit sich. Sowohl bei der Erkennbarkeitsentfernung als auch dem Blendungsgefühl zeigte sich kein Unterschied zwischen dem Grundniveau und der adaptiven Vorfeldleuchtdichte.

Erst eine Erhöhung der Leuchtdichte um einen Faktor 7 ergab eine Steigerung der Erkennbarkeitsentfernung im Vergleich zum

Grundniveau. Diese betrug etwa 10 % oder umgerechnet 4,6 m. Die psychologische Blendung wurde von den Probanden nicht als signifikant schwächer angegeben. Aufgrund der geringen Unterschiede der Mediane, speziell in Relation zur relativ großen Streuung der Daten, können hier auch keine Tendenzen angegeben werden. Es ist daher davon auszugehen, dass die psychologische Blendung für die vorliegende Kombination der Parameter unabhängig von der Leuchtdichte des Vorfelds ist. Als Konsequenz hieraus lässt sich feststellen, dass die psychologische und die physiologische Blendung im untersuchten Fall keiner kausalen Abhängigkeit unterliegen.

Eine mögliche Begründung für die Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung bei einer Leuchtdichte in Höhe von 10 cd/m^2 ist in Studien von Jebas [88] zu finden. Dieser vermutete, dass die mit einer Erhöhung der Vorfeldleuchtdichte einhergehende gesteigerte Erkennbarkeitsentfernung, die vorangegangene Untersuchungen ergeben hatten, aus der Vorwärtsreflexion des Scheinwerferlichts resultiert. Das Licht, welches zur Vorfeldausleuchtung verwendet wird, wird zu einem kleinen Teil nach vorne reflektiert und trägt damit zu einer Erhöhung der Kontraste von Sehobjekten im Straßenverkehr bei.

Die Resultate der vorliegenden Studie sprachen im ersten Augenblick für die Annahme der These von Jebas. Allerdings verwendete er neben dem Grundniveau nur ein zweites Niveau mit einer durchschnittlichen Leuchtdichte von 4 cd/m^2 . Dieses war in etwa vergleichbar mit dem Niveau *Adaptiv* der hier beschriebenen Studie.

Falls tatsächlich die Vorwärtsreflexion auf der Straße die hauptsächliche Ursache für die höhere Erkennbarkeitsentfernung wäre, so ließe das auch in den vorliegenden Untersuchungen einen signifikanten Unterschied zwischen den Niveaus *Minimum* und *Adaptiv* erwarten. Tatsächlich scheinen andere Vorgänge jedoch eine dominantere Rolle für die visuelle Leistungsfähigkeit gespielt zu haben.

Die Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung fiel mit etwa 10 % oder umgerechnet 4,6 m relativ hoch aus. Eine mögliche Erklärung liefern die Adaptationsvorgänge des Auges. Eine höhere Leuchtdichte des für die Adaptation maßgeblich verantwortlichen Bereichs im Vorfeld des Fahrzeugs bereitet das Auge auf die potentielle Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge vor. Die notwendige Anpassung an die höhere Schleierleuchtdichte und die damit verbundene Schwellwerterhöhung werden dadurch vorweg genommen. Augenscheinlich wiegt die vorgezogene Adaptation stärker als die Schwellenkontrasterhöhung, die gemäß vorherrschender Lehrmeinung (vgl. Anhang B.3.3) in einem solchen Fall auftritt.

4.3.7 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ergebnisse zeigen, dass davon auszugehen ist, dass eine adaptive Regelung der Vorfeldleuchtdichte, welche die Schleierleuchtdichte miteinbezieht, keine Vorteile hinsichtlich der visuellen Sehleistung im nächtlichen Straßenverkehr hat. Der Zugewinn an Erkennbarkeitsentfernung bei Verwendung einer Vorfeldleucht-

dichte in Höhe von 10 cd/m^2 ist mit über 10 % sicherheitsrelevant. Bei trockenen Fahrbedingungen ist daher die Empfehlung auszusprechen, das Niveau des Vorfelds auf einen vergleichbaren Wert anzuheben. Im Fall einer regennassen Straße würde eine hohe Ausleuchtung des Vorfelds zur Blendung vorausfahrender oder entgegenkommender Fahrzeuge führen. Hier wäre eine Reduktion der Lichtstärke vonnöten. Der Übergang sollte möglichst graduell erfolgen, um den Fahrkomfort des Fahrzeugführers zu erhöhen. Aus technischer Sicht wäre eine Umsetzung einer derartigen Vorfeldausleuchtung im Kontext der zu erwarteten zunehmenden Verbreitung von Matrixscheinwerfern vergleichsweise einfach. Die notwendigen Sensoren (Regendetektion, Kamera, Radar) ständen in den dazugehörigen Fahrzeugen in der Regel zur Verfügung.

Kapitel 5

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

5.1 ZUSAMMENFASSUNG

Der technische Fortschritt machte es in jüngster Vergangenheit möglich, die Funktionalität von automobilen Scheinwerfern weit über das Niveau klassischer Systeme, bestehend aus Lichtquelle, Reflektor und Abschlusscheibe, zu heben. Viele der technologischen Fortschritte wie Kurvenlicht, AFS oder blendfreies Fernlicht haben bereits Einzug in die Serienentwicklung der Automobilhersteller gehalten. Im Zuge der zunehmenden Innovationsgeschwindigkeit wird es jedoch immer schwieriger, die Auswirkungen der lichttechnischen Innovationen auf die Physiologie der Fahrzeugführer in einem angemessenen Maße und zeitnah zu untersuchen.

Die Intention, die dieser wissenschaftlichen Arbeit zugrunde lag, waren die Konzeption sowie der Aufbau des pixelbasierten Scheinwerfers *Propix*, der als umfassendes Werkzeug für die Forschung auf dem Gebiet der automobilen Lichttechnik genutzt werden kann. Es gelang dabei, auf Basis von sechs Digitalprojektoren, ein mobiles Forschungsinstrument zu schaffen, welches in der

Lage ist, jede beliebige Lichtverteilung und Beleuchtungsfunktion im Straßenverkehr realitätsgetreu und hochdynamisch abzubilden.

Um die vielseitige Einsatzfähigkeit und die Alleinstellungsmerkmale von *Propix* zu demonstrieren, wurden zwei Probandenstudien durchgeführt, die sich mit aktuellen Themen der automobilen Lichttechnik beschäftigten.

Die erste Studie wurde statisch durchgeführt und thematisierte die Charakteristik von Ausblendungen im Kontext eines blendfreien Fernlichts auf Matrixbasis. In einer Probandenstudie mit 29 Personen im Alter von 20–60 Jahren wurden die Faktoren Sichtweite, Blendung und Fahrkomfort anhand der Szene einer simulierten nächtlichen Hinterherfahrt bewertet. Dabei wurden vier verschiedene Kombinationen aus Sicherheitsbereich und graduellm Übergang zwischen Hell und Dunkel in Relation zueinander gesetzt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Probanden statistisch signifikant einen weicheren, d.h. stetigen Übergang zwischen der Ausblendung anderer Fahrzeuge und der eigentlichen Fernlichtverteilung einem harten Übergang vorziehen. In allgemeinen Kommentaren der Probanden stellte sich heraus, dass eine pixelgenaue Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer einerseits als große Chance eingestuft wird, die Ausleuchtung im nächtlichen Straßenverkehr zu erhöhen. Andererseits wurde aber auch deutlich, dass es aufgrund des ungewohnten Erscheinungsbilds zu Irritationen der Verkehrsteilnehmer kommen kann.

In einer dynamischen Studie wurde der Einfluss der Vorfeldausleuchtung auf die Erkennbarkeitsentfernung im nächtlichen Straßenverkehr untersucht. Hierzu wurden drei verschiedene Leuchtdichteniveaus miteinander verglichen. Das minimale Niveau stellte eine praxisnahe Ausleuchtung mit einer Leuchtdichte von ca. $1,5 \text{ cd/m}^2$ dar. Das zweite Leuchtdichteniveau hatte ein hohes Niveau in Höhe von etwa 10 cd/m^2 . Die dritte Variante passte sich adaptiv an die Schleierleuchtdichte an, welche durch entgegenkommende Fahrzeuge hervorgerufen wurde. Zusätzlich zur objektiven Erkennbarkeitsentfernung wurde die psychologische Blendung aufgenommen. Die Studie wurde auf dem Gelände des Hockenheimrings auf einer dem öffentlichen Straßenverkehr nicht zugänglichen Strecke durchgeführt. Insgesamt nahmen 25 Probanden im Alter von 20 – 35 Jahren an den Versuchen teil.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Erkennbarkeitsentfernung bei der hohen Vorfeldausleuchtung (10 cd/m^2) signifikant höher war als bei der niedrigen, konventionellen Ausleuchtung ($1,5 \text{ cd/m}^2$). Der Anstieg der im Mittel gemessenen Erkennbarkeitsentfernung betrug dabei ca. 10 %. Die adaptive Vorfeldleuchtdichte wies keine Unterschiede gegenüber den anderen beiden Varianten auf. Die psychologische Blendung stellte sich als unabhängig von der Leuchtdichte des Vorfelds heraus. Hieraus ließ sich insbesondere eine Unabhängigkeit von psychologischer und physiologischer Blendung schlussfolgern.

5.2 AUSBLICK

Der *Propix*-Versuchsträger bietet zahlreiche Erweiterungsmöglichkeiten. Auf der einen Seite betrifft dies die Steuersoftware, auf der anderen Seite die technische Umsetzung bzw. die periphere Sensorik.

Die *Propix*-Software wurde hinsichtlich einer einfachen Erweiterbarkeit entwickelt. Neben den bereits implementierten Funktionen zur Umsetzung von Ausblendungen oder für eine adaptive Steuerung der Vorfeldleuchtdichte sind, insbesondere im Hinblick auf Pixelscheinwerfer, zahlreiche Erweiterungen denkbar.

Beispielweise könnten verschiedene Auflösungen von Lichtverteilungen simuliert werden, um ggf. ein Optimum der Segmentierung zu finden. Hierzu wäre eine einfache Benutzeroberfläche zur Eingabe der gewünschten Auflösung ausreichend. Denkbar wäre in diesem Kontext auch die Möglichkeit, die Größe der einzelnen Segmente variabel gestalten zu können. Studien haben hier bereits gezeigt, dass die benötigte Auflösung zu den Randbereichen der Straße hin abnimmt ([58], [58, 64]).

Erweiterungen, welche die Sensorik betreffen, wären die Integration einer Stereokamera, eines Radars oder Lidars. Hinsichtlich einer umfassenderen Detektion von Objekten im Straßenverkehr wäre auch eine Fusion dieser Sensoren denkbar.

Weiterhin wäre es möglich, leistungsfähigere und effizientere Projektoren einzusetzen. Dadurch ließe sich entweder die Anzahl

der Projektoren reduzieren, um die Komplexität und die damit einhergehende Ungenauigkeit der Darstellung zu verringern, oder der abgedeckte Winkelbereich vor dem Versuchsfahrzeug erhöhen. Letzteres würde einen Wechsel hin zu Weitwinkelobjektiven erforderlich machen. Bei etwaigen Umbauten wird weiterhin ein Kompromiss zwischen benötigter Lichtstärke, überdecktem Raumwinkel, Gewicht, Platz- und Leistungsbedarf sowie den Anschaffungskosten zugrunde liegen.

Im Rahmen diese Arbeit ist es gelungen, mit *Propix* einen voll-funktionsfähige Scheinwerferplattform aufzubauen, deren Forschungsnutzen auf dem Gebiet der automobilen Lichttechnik durch Probandenstudien erfolgreich nachgewiesen wurde. Das *Propix*-Konzept in einen serienfähigen, automobilen Scheinwerfer zu transferieren, gestaltet sich als schwierig. Wie aus Kapitel 2 ersichtlich wird, beschäftigten sich bereits zahlreiche Entwickler mit der Frage, ob Mikrospiegel zur Lichtlenkung in konventionellen Scheinwerfern eingesetzt werden können. Das hauptsächliche Problem stellte dabei die Energieeffizienz des Systems dar. Es kann daher nicht davon ausgegangen werden, dass die Mikrospiegel-technik, die vom *Propix*-System genutzt wird, in konventionellen Scheinwerfern eingesetzt werden kann.

III LITERATUR

- [1] M. Eckert, *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Strassenverkehr*, 1st ed., Verlag Technik, Berlin **1993**.
- [2] C. Funk, *Heterogeneous data fusion to control a predictive bending* **2009**.
- [3] J. Locher, M. Böhm, J. F. Krems, *Effizienz adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfersysteme am Beispiel der adaptiven Hell-Dunkel-Grenze* **2010**.
- [4] H.-S. e. Lee, *Headlamp system based on adaptive beam patterns for improving the visibility of drivers* **2012**.
- [5] K. Zuse, US3316442A, *Apparatus for controlling headlights by counterlight*. **1967**.
- [6] H. Kretschmer, DE3601388A1, *Scheinwerferanlage für Fahrzeuge, insbesondere für Kraftfahrzeuge*. **1987**.
- [7] Kobayashi, Shoji, Shimizu, Shizuoka, DE19756574A1, *Beleuchtungseinheit für ein Fahrzeug*. **1998**.
- [8] J. Stam, J. H. Bechtel, F. T. Bauer, US6049171, *Continuously variable headlamp control*. **2000**.
- [9] R. Garnitz, DE19713884A1, *Verfahren zur Regelung von Leuchtweite und/oder Leuchtrichtung*. **1998**.
- [10] R. Neumann, DE19716784A1, *Scheinwerferanlage für Fahrzeuge*. **1998**.
- [11] T. L. Cardanha, DE19815414A1, *Lichtsteuerungssystem für Fahrzeuge*. **1998**.

- [12] R. Neumann, H. Stoll, *Automotive Design Advancements in Human Factors: Improving Driver's Comfort and Performance* **1996** (SP-1155).
- [13] W. Gottwald, EP1398210A2, *Scheinwerfer für ein Kraftfahrzeug*.
- [14] G. Hege, DE19530008B4, *Beleuchtungseinrichtung für Fahrzeuge mit einer reflektierenden Umlenkvorrichtung*. **2005**.
- [15] M. Enders, DE19737653A1, *Beleuchtungseinrichtung für Fahrzeuge und Betriebsverfahren für eine derartige Beleuchtungseinrichtung*. **1999**.
- [16] P. Lehnert, DE19944369B4, *Scheinwerfer mit variabler Lichtbündelverteilung für Kraftfahrzeuge*. **2001**.
- [17] K. Eichhorn, DE10221684A1, *Scheinwerfer für Fahrzeuge*. **2003**.
- [18] R. Kauschke, DE10344173A1, *Scheinwerfer für Fahrzeuge*. **2005**.
- [19] R. Kauschke, DE10344174A1, *Scheinwerfer für Fahrzeuge*. **2005**.
- [20] T. Reiners, DE102010028949A1, *Scheinwerfermodul*. **2011**.
- [21] M. Schnerr, DE102010048659A1, *Beleuchtungseinrichtung eines Kraftfahrzeugs*. **2012**.
- [22] J. Horn, DE102011080559A1, *Beleuchtungseinrichtung eines Fahrzeugs*. **2013**.
- [23] T. Watanabe, US7429918B2, *Vehicle Lighting System*.
- [24] R. Ackermann, DE102007050374A1, *Fahrzeugscheinwerfer und Verfahren zum Betrieb eines Fahrzeugscheinwerfers*. **2009**.
- [25] H. Erdl, WO2006125542A1, *Fahrzeugscheinwerfer*.
- [26] A. Bony, DE102012002232A1, *Beleuchtungsvorrichtung für ein Fahrzeug*. **2012**.
- [27] M. Enders, *Pixel Light* **2001**.

- [28] R. Kauschke, K. Eichhorn, J. Wallaschek, *Innovative optical concepts for future car headlights* **2003**.
- [29] M. Götz, Eichhorn Karsten, *Optical technologies for future headlamps* **2005**.
- [30] J. Roslak, R. Kauschke, *Active headlamps for increased traffic safety* **2005**.
- [31] T. Könnig, C. Amsel, I. Hoffmann, *Light has to go where it is needed: Future Light Based Driver Assistance Systems* **2007**.
- [32] S. Yamamura, *Glare-Free- Adaptive High-Beam Headlamps* **2008**.
- [33] B. Hummel, *Matrix-Beam - an Adaptive Dribing Beam System (ADB)* **2009**.
- [34] J. Moisel, R. Ackermann, M. Griesinger, *Adaptive Headlights utilizing LED-Arrays* **2009**.
- [35] A. Moser, G. Krenn, *Matrix Light - Combining Styling, Functionality and Scalability* **2011**.
- [36] C. Schmidt, *Fully Adaptive Headlamp, the next step in intelligent lighting functionality* **2011**.
- [37] T. Lee, *The Development of the Automotive Headlamp using the DMD* **2011**.
- [38] G. Böhm, *Reduzierung der mechanischen Komplexität bei gleichzeitiger Erhöhung der Funktionalität von Scheinwerfersystemen* **2012**.
- [39] P. Albou, *Matrix Beam with Optimized Vertical Distribution* **2012**.
- [40] I. Hoffmann, *First approach to reach the goal of a fully adaptive headlamp* **2013**.
- [41] M. Hamm, *Safety Improvement generated by Pioneering New Matrix and Direction Indicator Functionalities* **2013**.

- [42] S. Yamamura, *Glare-free High Beam with Beam-scanning* **2013**.
- [43] J. Roslak, *Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums*, Dissertation, Universität Paderborn **2005**.
- [44] R. Kauschke, *Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern*, Dissertation, Universität Paderborn **2006**.
- [45] A. Günther, *Entwicklung eines aktiven Kraftfahrzeugscheinwerferkonzepts mit DMD-Array*, Dissertation, Universität Berlin **2010**.
- [46] J.-M. Rechentín, *Systemdesign eines Kfz-LED-Scheinwerfers*, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe **2006**.
- [47] Alexander Günther, *Entwicklung eines aktiven Kraftfahrzeugscheinwerferkonzepts mit DMD-Array*, Dissertation, Technische Universität Berlin **2010**.
- [48] F. Ernst, *Entwurf des Gesamtkonzepts eines projektorbasierten Versuchsscheinwerfers*, Studienarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2012**.
- [49] M. Schöne, *Optische Simulation der Grundlichtverteilungen eines projektorbasierten Scheinwerfersystems*, Studienarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2012**.
- [50] S. Söhner, *Entwicklung eines Matrixscheinwerfers zur Umsetzung eines maskierten Fernlichts*, Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2012**.
- [51] S. Lutz, *Konzeption, Aufbau und technische Analyse einer Plattform für projektorbasierte Versuchsscheinwerfer*, Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2013**.

- [52] J. Reusch, *Entwicklung einer Steuersoftware für projektorbasierte Scheinwerfer*, Studienarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2012**.
- [53] J. Reusch, *Entwicklung einer echtzeitfähigen Lichtberechnungssoftware mit aktiver Ausblendung von Fahrzeugen für Scheinwerfersysteme mit Projektoren*, Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2014**.
- [54] M. Neumeyer, *Erzeugung beliebiger Lichtverteilungen durch ein Matrixscheinwerfersystem am Beispiel einer ECE-Abblendlichtverteilung*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2012**.
- [55] M. Walther, *Entwicklung einer automatisierten Kalibrierung für ein Multi-Projektor-Scheinwerfersystem*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2014**.
- [56] G. Hollmig, *Auswahl und Verifikation von Filtern zum Markieren von Objekten im Straßenverkehr*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2014**.
- [57] A. Günther, *Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einem adaptiven Scheinwerfer mit DMD-Array*, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau **2006**.
- [58] P. Jahn, *Kriterien zur Auflösungsbestimmung von adaptiven Scheinwerfersystemen*, Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2014**.
- [59] C. Neumann, *Vorlesungsskript Optische Technologien im Automobil*, Karlsruher Institut für Technologie **2014**.

- [60] Automotive Lighting, *Die Lichttechnik im Audi R8 LED Scheinwerfer*, http://www.al-lighting.com/neu/products_technology/headlamps/led/AL_Lichttechnik_AudiR8_Ackermann.pdf.
- [61] *Hella Licht Research & Development Review 2000* (Eds: Hella KG Hueck & Co.), Paderborn **2000**.
- [62] W. Huhn, *Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen*, Darmstädter Lichttechnik, Utz, München **1999**.
- [63] P. Löbig, H. Erdl, J. Kovacevic, *Licht und Design, Sehen und gesehen werden*, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, Vieweg Verlag, Wiesbaden **2004**.
- [64] A. Austerschulte, B. Dreier, E.-O. Rosenhahn, *Analysis of Safety Aspects for LED Matrix High Beam*, ISAL **2013**.
- [65] R. Gnadler, *Grundlagen der Fahrzeugtechnik*, Vorlesungsskript, Karlsruher Institut für Technologie.
- [66] Bayer AG, *Makrolon / Apec: Transparenz und Farbe*, <http://www.plastics.bayer.de>.
- [67] ZES, *LMG95 Einphasen Präzisions-Leistungsmessgerät*, <http://www.zes.com/deutsch/produkte/einphasen-praezisions-leistungsmessgeraet-lmg95.html> **2014**.
- [68] ECE, *Electromagnetic compatibility: R010r4e* **2012**.
- [69] *Tagungsband lux junior* (Eds: Technische Universität Ilmenau) **2013**.

- [70] Edmundoptics, *Datenblatt Guppy Pro F-503*,
<http://www.edmundoptics.de/imaging/cameras/firewire-cameras/avt-guppy-pro-firewire-b-cameras/3341> **2014**.
- [71] R. Hofner, *Bewertung von Ausblendungsstrategien bei adaptiven Scheinwerfersystemen*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2014**.
- [72] Bundespolizei, *Mit Abstand mehr Sicherheit*,
http://www.bundespolizei.de/DE/01Buergerservice/Reiseinformationen/Infos-auf-Tschechisch/PDF/abstand_file.pdf?__blob=publicationFile.
- [73] S. Michenfelder, *Einfluss einer ambienten Innenraumbelichtung auf das Kontrastsehen des Fahrzeugführers*, Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie **2010**.
- [74] P. Sedlmeier, F. Renkewitz, *Forschungsmethoden und Statistik in der Psychologie*, PS Psychologie, Pearson Studium, München [u.a.] **2008**.
- [75] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, *"Fahrerlaubnis-Verordnung vom 13. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1980), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. April 2014 (BGBl. I S. 348) geändert worden ist": FeV* **2010**.
- [76] H. Moosbrugger, A. Kelava, *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*, Springer Medizin Verlag Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2007**.
- [77] J. Bortz, *Statistik für Sozialwissenschaftler*, 5th ed., Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin **1999**.

- [78] K. D. Kubinger, D. Rasch, T. Yanagida, *Statistik in der Psychologie: Vom Einführungskurs bis zur Dissertation*, Psychlehrbuch plus, Hogrefe, Göttingen, Bern, Wien [u.a.] **2011**.
- [79] H. Abdi, *Bonferroni and Sidak corrections for multiple comparisons*, Encyclopedia of Measurement and Statistics, Thousand Oaks **2007**.
- [80] J. Damasky, *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer*, Dissertation, Universität Darmstadt **1995**.
- [81] R. Zechnall, *Lichttechnik* **1966**, 18 (10).
- [82] J. Locher, P. Stroop, H. Hesse, *Glare Free High Beam: Acceptance Studies* **2013**.
- [83] Sanchez, V., Reiss, B., *Adaptive Driving Beam with LED – Beam pattern expectations* **2011**.
- [84] S. Völker, *Hell- und Kontrastempfindung - ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern*, Habilitation, Universität Paderborn **2006**.
- [85] J. Locher, S. Völker, M. Kleinkes, I. Colin, *Der Einfluss der Kfz-Lichtverteilung auf Sicherheit* **2002**.
- [86] L. Holladay, *Journal of the optical society of america* **1926**, 12 (4).
- [87] C. Jebas, *Untersuchung des Einflusses der Vorfeld- und Seitenausleuchtung automobiler Scheinwerfer auf die Erkennbarkeitsentfernung von Sehobjekten*, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe **2006**.
- [88] C. Jebas, *Physiologische Bewertung aktiver und passiver Lichtsysteme im Automobil*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie **2012**.

- [89] P. Moon, D. E. Spencer, *Journal of the optical society of america* **1943**, 33 (8), 444.
- [90] P. Moon, D. E. Spencer, *Journal of the optical society of america* **1945**, 35 (3), 233.
- [91] R. G. Mortimer, C. M. Jorgeson, *Eye fixations of drivers in night driving with three headlight beams*, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration **1974**.
- [92] Graf, C.P., Krebs, M. J., *Headlight Factors and Nighttime Vision: Final Report*, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration **1976**.
- [93] M. Sivak, P. L. Olson, *From headlamp illumination to headlamp performance: a critical review of issues relevant to the ford motor company "detect" model* **1985**.
- [94] R. Brückmann et al., *Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT)*, **2000**, 151, 105.
- [95] C. Diem, *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Strassenverkehr*, Darmstädter Lichttechnik, Utz, München **2005**.
- [96] F. Stahl, *Kongruenz des Blickverlaufs bei virtuellen und realen Autofahrten -Validierung eines Nachtfahrssimulators*, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau **2004**.
- [97] T. Dahlem, *Methoden zur Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern*, Universität Darmstadt **2000**.
- [98] D. Schneider, *Markierungslicht - eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern*, Dissertation, Universität Darmstadt **2011**.

- [99] M. Hörter, *Entwicklung und vergleichende Bewertung einer bildbasierten Markierungslichtsteuerung für Kraftfahrzeuge*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie **2013**.
- [100] U. Carraro, *Die Adaptationsleuchtdichte bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern unter besonderer Berücksichtigung einer dynamischen Sehaufgabe*, Dissertation, Technische Universität Ilmenau **1985**.
- [101] Uwe Schmitz Handelsvertretung, *Antiblendlicht*, www.antiblendlicht.com **2014**.
- [102] M. Niedling, S. Michenfelder, C. Jebas, C. Neumann, *Influence of adaptive interior lighting in vehicles on the discomfort and disability glare*, Darmstadt **2011**.
- [103] R. Greule, *Kontrastschwellen bei transientser Adaptation*, Dissertation, Universität Karlsruhe **1993**.
- [104] D. D. Jack, S. M. O'Day, Bhise, V.D., *SAE Technical Paper Series* **1994** (940639).
- [105] International Commission on Illumination, *CIE collection on glare: 2002*, Technical report / Commission Internationale de l'Éclairage, Vol. 146, CIE Central Bureau, Vienna **2002**.
- [106] Flannagan, Sivak, Traube, Aoki, *Effects of Foreground Illumination, Wet Pavement and Driver Age on Pedestrians* **1995**.
- [107] Boer, J. B. de, *Public lighting* **1967**, 11.
- [108] *Spectral luminous efficiency function for photopic vision*, 1st ed., Publication CIE, Vol. 86, Commission Internationale de l'Éclairage, Vienna **1990**.
- [109] Tregilgas, John H., Richardson, DE69529880T2, *Mikromechanische Vorrichtung*. **1996**.

[110]H.-J. Hentschel, *Licht und Beleuchtung: Theorie und Praxis der Lichttechnik*, 4th ed., Hüthig, Heidelberg **1994**.

[111]S. Kokoschka, *Grundlagen der Lichttechnik: Vorlesungsskript* **2003**.

IV ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Beispielhafte Straßenszene ohne jegliche Ausleuchtung durch Scheinwerfer; es sind keine Orientierungshilfen zu erkennen.	2
Abbildung 1.2:	Beispielhafte Straßenszene mit Ausleuchtung durch ein Fernlicht; die Orientierungshilfen wie die Leitpfosten, die Fahrbahnmarkierung oder die Verkehrszeichen sind gut zu erkennen.	3
Abbildung 2.1:	<i>Links</i> : Prinzip der lichterzeugenden Einheit bestehend aus Reflektor, Lichtquelle, dazugehöriger Mechanik und Energieversorgung <i>Rechts</i> : Anordnung von Photodioden, um das Licht anderer Verkehrsteilnehmer zu detektieren [5]	11
Abbildung 2.2:	DMD-Technologie als lichtlenkendes Element in einem automobilen Scheinwerfer nach Hege [7].....	15
Abbildung 2.3:	Die Erfindung von Enders [15] beschreibt ein Scheinwerfersystem bestehend aus einer Gasentladungslampe (21), einem Mikrospiegelarray (23) und zwei nachgeschalteten Optiken.	17

Abbildung 2.4:	Einzelne Segmente mit LED als Lichtquellen werden zur Gesamtlichtverteilung auf der Straße zusammengefügt [23].	20
Abbildung 2.5:	Versuchsfahrzeug mit Projektorack im Frontbereich; aufgebaut und vorgestellt von Yamamura [31].....	23
Abbildung 2.6:	Funktionsstruktur eines aktiven Scheinwerfers, der sich an die aktuelle Fahrsituation anpasst und so eine optimale Ausleuchtung des Verkehrsraums gewährleisten soll (nach Roslak [44]).	28
Abbildung 2.7:	Versuchsfahrzeug mit DMD-Scheinwerfer auf einem Rack vor dem Fahrzeug montiert [43].....	29
Abbildung 3.1:	Räumliche Abstrahlcharakteristik der sechs <i>Propix</i> -Projektoren; die Intensität der einzelnen Überlagerungen ist analog zur Graustufe.	42
Abbildung 3.2:	CAD-Modell des Grundgerüsts des <i>Propix</i> -Racks	43
Abbildung 3.3:	CAD-Modell des <i>Propix</i> -Racks mit Außenwänden, den zwei horizontalen Profilplatten sowie den sechs speziell angefertigten Projektorgehäusen	45
Abbildung 3.4:	Modellierung des ursprünglichen Projektorgehäuses aus Aluminiumteilen.....	46

Abbildung 3.5:	<i>Propix</i> -Versuchsfahrzeug mit montiertem Rack. Zur einfacheren Identifizierung als Forschungsfahrzeug wurde eine retroreflektierende Folie auf den Außenwänden angebracht.47
Abbildung 3.6:	Zeitlicher Spannungsverlauf des fahrzeugeigenen CAN-Busses bei Verwendung von konventionellen Wechselrichtern ohne entsprechende Entstörmaßnahmen. Das Schaubild zeigt die beiden Signalpegel CANhigh (blau) und CANlow (rot) sowie die Differenz (grün).....52
Abbildung 3.7:	Zeitlicher Spannungsverlauf des fahrzeugeigenen CAN-Busses bei Verwendung von E-Mark klassifizierten Wechselrichtern in Kombination mit Entstörfiltern. Das Schaubild zeigt die beiden Signalpegel CANhigh (blau) und CANlow (rot) sowie die Differenz (grün).52
Abbildung 3.8:	Der wesentliche Gedanke der <i>Propix</i> -Steuersoftware besteht darin, die Strahlfelder der Projektoren durch Kamerablickfelder zu modellieren; die Berechnung der Kamerabilder erfolgt schnell und in hoher Auflösung durch die Grafikkarte; Darstellung nach Reusch.....57

Abbildung 3.9:	Zentrale Benutzeroberfläche der Software; an der Stelle der beiden Würfel befindet sich das Versuchsfahrzeug; die Straße ist mit einem Gitter symbolisiert, im Hintergrund ist eine Fernlichtverteilung aktiv; rechts: Eingabemaske für ein Lichtobjekt	59
Abbildung 3.10:	Prinzipieller Ablauf der Bilderzeugung für den <i>Propix</i> -Versuchsscheinwerfer	61
Abbildung 3.11:	Vergleich eines nicht kalibrierten <i>Propix</i> -Systems mit einem kalibrierten; die Kalibrierung erfolgte dabei statisch und manuell [50].....	63
Abbildung 3.12:	Zur Bestimmung der Abweichung der Neigungswinkel werden die Höhendifferenzen (exemplarisch dargestellt durch Δb_1 und Δb_2) für jede der beiden Projektorebenen B1 und B2 ermittelt.	64
Abbildung 3.13:	Zur Bestimmung der Abweichung der Schwenkwinkel werden die Seitendifferenzen (exemplarisch dargestellt durch Δb_1 und Δb_2) für alle sechs Projektoren ermittelt.	65
Abbildung 3.14:	Kreuzmuster der automatisierten Kalibrierung [55]	67
Abbildung 3.15:	Schema des Algorithmus zur automatisierten Kalibrierung der <i>Propix</i> -Projektoren	67

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 3.16:	Benutzeroberfläche der automatisierten Kalibrierung als Erweiterung der <i>Propix</i> -Software68
Abbildung 4.1:	Skizze des Versuchsaufbaus der statischen Studie.....73
Abbildung 4.2:	Anordnung der beiden Versuchsfahrzeuge in der statischen Probandenstudie; im Hintergrund ist der Opel Astra, im Vordergrund das <i>Propix</i> -Fahrzeug zu erkennen.....74
Abbildung 4.3:	Benutzeroberfläche der <i>Propix</i> -Softwareerweiterung zur Einstellung der Ausblendungsparameter [70]75
Abbildung 4.4:	Zur Definition der Ausblendungsparameter: Innerhalb des blauen Rahmens befindet sich das Fahrzeug; der rote Rahmen gibt den fakultativen Sicherheitsbereich (komplett schwarz) an; der graduelle Übergang findet zwischen rotem und grünem Rahmen statt.....75
Abbildung 4.5:	Reale Aufnahmen der Ausblendungen (ausgeblendetes Fahrzeug im Hintergrund); oben links: <i>Kombination 1</i> ; oben rechts: <i>Kombination 2</i> unten links: <i>Kombination 3</i> ; unten rechts: <i>Kombination 4</i>77
Abbildung 4.6:	Altersstruktur der Probanden in der statischen Studie78

Abbildung 4.7:	Beispielhafte Abfolge der Lichtverteilungen im statischen Versuch..... 80
Abbildung 4.8:	Unipolare Skala für die Stellungnahme der Probanden 81
Abbildung 4.9:	Boxplot der Bewertung der Abblendlichtverteilung bezüglich der Aussage <i>Sichtweite</i> (vor und nach der Darbietung der Ausblendungen); dabei bezeichnet die 1 eine große, die 6 eine geringe Sichtweite. 83
Abbildung 4.10:	Boxplot der Bewertung der Abblendlichtverteilung bezüglich der Aussage <i>Blendgefühl</i> (vor und nach der Darbietung der verschiedenen Ausblendungen); dabei bezeichnet die 1 ein großes, die 6 ein geringes Blendgefühl. 83
Abbildung 4.11:	Boxplot der Bewertung der Abblendlichtverteilung bezüglich der Aussage Komfort 1 (vor und nach der Darbietung der <i>Ausblendungen</i>); dabei bezeichnet die 1 einen großen, die 6 einen geringen Komfort. 84
Abbildung 4.12:	Boxplot der Bewertung der Abblendlichtverteilung bezüglich der Aussage Komfort 2 (vor und nach der Darbietung der <i>verschiedenen</i> Ausblendungen); dabei bezeichnet die 1 einen großen, die 6 einen geringen Komfort..... 84

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 4.13:	Boxplot der Bewertungen der Aussage Sichtweite (1: trifft zu, 6: trifft nicht zu).....	88
Abbildung 4.14:	t-Test für verbundene Stichproben für die Aussage <i>Sichtweite</i>	89
Abbildung 4.15:	Boxplot der Bewertungen der Aussage <i>Blendung</i> (1: trifft zu, 6: trifft nicht zu)	90
Abbildung 4.16:	t-Test für verbundene Stichproben für die Aussage <i>Blendung</i>	90
Abbildung 4.17:	Boxplot der Bewertungen der Aussage <i>Komfort 1</i> (1: trifft zu, 6: trifft nicht zu).....	91
Abbildung 4.18:	t-Test für verbundene Stichproben für die Aussage <i>Komfort 1</i>	92
Abbildung 4.19:	Boxplot der Bewertungen der Aussage <i>Komfort 2</i> (1: trifft zu, 6: trifft nicht zu).....	93
Abbildung 4.20:	t-Test für verbundene Stichproben für die Aussage <i>Komfort 2</i>	93
Abbildung 4.21:	Illustration des Antiblendlichts, welches, an der Sonnenschutzblende angebracht, die Blendung durch andere Verkehrsteilnehmer reduzieren soll [100].	105
Abbildung 4.22:	Leuchtdichte des Vorfeldniveaus <i>Minimum</i>	109
Abbildung 4.23:	Leuchtdichte des Vorfeldniveaus <i>Maximum</i>	110
Abbildung 4.24:	Prinzipieller Aufbau bei der Messung der Schleierleuchtdichte	111
Abbildung 4.25:	Berechnete Schleierleuchtdichte bei einem entgegenkommenden Fahrzeug gemäß CIE 146/147 [104]	112

Abbildung 4.26:	In den Versuchen verwendeter Verlauf der Schleierleuchtdichte; die Entfernung bezieht sich auf die Position des Propix-Versuchsfahrzeugs relativ zum entgegenkommenden Fahrzeug.....	113
Abbildung 4.27:	Der Leuchtdichteverlauf des Vorfelds in der Variante <i>Adaptiv</i> wurde beim Passieren des ersten Reflektors gestartet; die Entfernung zur Blendlichtquelle betrug dabei 300 m.	114
Abbildung 4.28:	Beispielhafte Abfolge der Vorfeldleuchtdichten in der dynamischen Studie	115
Abbildung 4.29:	Schema der Versuchsstrecke auf dem Hockenheimring; die simulierten, entgegenkommenden Fahrzeuge sind mit BLQ 1-3 gekennzeichnet.....	116
Abbildung 4.30:	Projektionsmodule an einem Profilschienenrack zur Simulation eines entgegenkommenden Fahrzeugs.....	117
Abbildung 4.31:	Sehobjekt mit charakteristischem Merkmal links.....	119
Abbildung 4.32:	Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung mittels des zurückgelegten Wegs von der Identifizierung des Sehobjekts (Tastendruck) bis zu der Vorbeifahrt an letzterem	120
Abbildung 4.33:	Fragebogen Teil 1 zur Ermittlung der subjektiven Blendung	121

Abbildung 4.34:	Fragebogen Teil 2 zur allgemeinen Bewertung des Versuchsablaufs.....	122
Abbildung 4.35:	Boxplot der ermittelten Erkennbarkeitsentfernung, getrennt nach den drei verschiedenen Leuchtdichteniveaus des Vorfelds	123
Abbildung 4.36:	t-Test für verbundene Stichproben für die Erkennbarkeitsentfernung.....	125
Abbildung 4.37:	Boxplot der psychologischen Blendung bezüglich einer etwaigen Blendung durch das Vorfeld	126
Abbildung 4.38:	Boxplot der psychologischen Blendung bezüglich einer etwaigen Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge.....	126
Abbildung 4.39:	t-Test für verbundene Stichproben hinsichtlich der psychologischen Blendung durch das Vorfeld	127
Abbildung 4.40:	t-Test für verbundene Stichproben hinsichtlich der psychologischen Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge	128
Abbildung B.1:	Prinzipielle Funktionsweise von Digitalprojektoren mit DMD-Technologie: Das Licht einer Gasentladungslampe wird auf eine Anordnung von Mikrospiegeln gelenkt, die die Lichtstrahlen entweder auf einen Absorber (logisch 0) oder auf die Projektionsoptik (logisch 1).....	171
Abbildung B.2:	Streulichtentstehung im Auge nach Hentschel [110].....	176

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung C.1:	Lichtstärkeverteilung Benq SP840.....	177
Abbildung C.2:	Graustufen vs. Intensität	178
Abbildung C.3:	Spektrum der Gasentladungslampe der Projektoren	178
Abbildung D.1:	Deskriptive Statistik bezüglich der Aussage <i>Sichtweite</i>	196
Abbildung D.2:	Deskriptive Statistik bezüglich der Aussage <i>Blendung</i>	196
Abbildung D.3:	Deskriptive Statistik bezüglich der Aussage <i>Fahrkomfort 1</i>	196
Abbildung D.4:	Deskriptive Statistik bezüglich der Aussage <i>Fahrkomfort 2</i>	197
Abbildung D.5:	Kolmogorov-Smirnov-Test für die Bewertung der Aussage <i>Sichtweite</i> ; für die Erläuterung der Abkürzungen siehe Kapitel D.1.....	197
Abbildung D.6:	Kolmogorov-Smirnov-Test für die Bewertung der Aussage <i>Blendung</i> ; für die Erläuterung der Abkürzungen siehe Kapitel D.1.....	198
Abbildung D.7:	Kolmogorov-Smirnov-Test für die Bewertung der Aussage <i>Komfort 1</i> ; für die Erläuterung der Abkürzungen siehe Kapitel D.1.....	198
Abbildung D.8:	Kolmogorov-Smirnov-Test für die Bewertung der Aussage <i>Komfort 2</i> ; für die Erläuterung der Abkürzungen siehe Kapitel D.1.....	199

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung E.1:	Deskriptive Statistik der Erkennbarkeitsentfernung.....	203
Abbildung E.2:	Deskriptive Statistik der psychologischen Blendung durch das Vorfeld nach deBoer	203
Abbildung E.3:	Deskriptive Statistik der psychologischen Blendung durch die entgegenkommenden Fahrzeuge nach deBoer	203
Abbildung E.4:	Kolmogorov-Smirnov-Test für die Erkennbarkeitsentfernung separiert nach der Vorfeldleuchtdichte	204
Abbildung E.5:	Kolmogorov-Smirnov-Test für die psychologische Blendung durch das Vorfeld.....	204
Abbildung E.6:	Kolmogorov-Smirnov-Test für die psychologische Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge.....	205
Abbildung H.7:	Auszug aus dem Datenblatt des Polycarbonats „Makrolon“; im <i>Propix</i> -System wird die Nummer 3103 mit 2mm Wandstärke eingesetzt [66]	213
Abbildung H.8:	Datenblatt der eingesetzten Wechselrichter MEC-PB 1500-12C2.....	214
Abbildung H.9:	Schaltplan der <i>Propix</i> -Elektronik nach Lutz und Walther [51] [55]	216

V TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1:	Kenndaten der <i>Propix</i> -Projektoren	39
Tabelle 3.2:	Leistungsaufnahme der Komponenten [51].....	49
Tabelle 3.3:	Leistung des zusätzlichen Generators in Abhängigkeit der Drehzahl.....	50
Tabelle 4.1:	Überblick über die in der statischen Studie verwendeten Kombinationen aus Sicherheitsbereich und graduellem Übergang von Hell zu Dunkel bei einer Ausblendung.....	76
Tabelle 4.2:	Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Ausblendungen für die Aussage Sichtweite.....	89
Tabelle 4.3:	Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Ausblendungen für die Aussage Blendung.....	91
Tabelle 4.4:	Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Ausblendungen für die Aussage <i>Komfort 1</i>	92
Tabelle 4.5:	Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Ausblendungen für die Aussage <i>Komfort 2</i>	94
Tabelle 4.6:	Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Vorfeldniveaus hinsichtlich der Erkennbarkeitsentfernung.....	125
Tabelle 4.7:	Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Vorfeldniveaus hinsichtlich der psychologischen Blendung durch das Vorfeld.....	128

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4.8:	Ergebnisse des statistischen Vergleichs der Vorfeldniveaus hinsichtlich der psychologischen Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge 129
Tabelle C.1:	Auszug aus dem Datenblatt des Projektors Benq SP840 [113]..... 179
Tabelle C.2:	Menüeinstellungen der Projektoren im <i>Propix</i> -System..... 182
Tabelle D.1:	Abkürzungen Kommentare 185
Tabelle E.1:	Ermittelte Erkennbarkeitsentfernung in m; Werte nach arithmetischer Mittelung über die drei Sehobjekte und die Wiederholung des Durchgangs 200
Tabelle E.2:	Psychologische Blendung für das Vorfeld nach deBoer; Werte nach arithmetischer Mittelung über die Wiederholung des Durchgangs 201
Tabelle E.3:	Psychologische Blendung für entgegenkommende Fahrzeuge nach deBoer; Werte nach arithmetischer Mittelung über die Wiederholung des Durchgangs 202
Tabelle H.1:	Datenblatt der Kalibrierkamera 215

VI ANHANG

Anhang A: ABKÜRZUNGEN

AC	<u>A</u> lternating <u>C</u> urrent
ADB	<u>A</u> daptive <u>D</u> riving <u>B</u> eam
AFS	<u>A</u> dvanced <u>F</u> rontlighting <u>S</u> ystem
aHDG	<u>a</u> daptive <u>H</u> ell- <u>D</u> unkel- <u>G</u> renze
AMD	<u>A</u> nalog <u>M</u> icromirror <u>D</u> evice
CAN	<u>C</u> ontroller <u>A</u> rea <u>N</u> etwork
CIE	<u>C</u> ommission <u>I</u> nternationale d' <u>E</u> clairage
DC	<u>D</u> irect <u>C</u> urrent
DMD	<u>D</u> igital <u>M</u> icromirror <u>D</u> evice
EMV	<u>E</u> lektro <u>m</u> agnetische <u>V</u> erträglichkeit
FeV	<u>F</u> ahrer <u>l</u> aubnis- <u>V</u> erordnung
FeV	<u>F</u> ahrer <u>l</u> aubnis- <u>V</u> erordnung

ANHANG

FI/LS	<u>F</u> ehler <u>s</u> trommschutzschalter/ <u>L</u> eitungsschutzschalter
HDG	<u>H</u> ell- <u>D</u> unkel- <u>G</u> renze
HDMI	<u>H</u> igh <u>D</u> efinition <u>M</u> ultimedia <u>I</u> nterface
KFZ	<u>K</u> raft <u>f</u> ahrzeug
LCD	<u>L</u> iquid <u>C</u> rystal <u>D</u> isplay
Lidar	<u>L</u> ight <u>D</u> etection <u>a</u> nd <u>R</u> anging
LMG	<u>L</u> eistung <u>m</u> essgerät
MDP	<u>M</u> agnetodynamisches <u>P</u> ositionieren
PC	<u>P</u> olycarbonat
PMMA	<u>P</u> olymethylmethacrylat
PPP	<u>P</u> ublic <u>P</u> rivate <u>P</u> artnership
<i>Propix</i>	<u>P</u> rojektor- <u>P</u> ixellicht
PWM	<u>P</u> uls <u>w</u> eiten <u>m</u> odulation
Radar	<u>R</u> adio <u>D</u> etection <u>a</u> nd <u>R</u> anging
U/min	<u>U</u> mdrehungen pro <u>M</u> inute
UHP	<u>U</u> ltra <u>H</u> igh <u>P</u> ressure
vHDG	<u>v</u> ertikale <u>H</u> ell- <u>D</u> unkel- <u>G</u> renze

Anhang B: GRUNDLAGEN

B.1 LICHTTECHNISCHE GRUNDGRÖßEN

B.1.1 LICHTSTROM

Die lichttechnischen Größen gewichten die radiometrischen Größen mit der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges. Die Empfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ für Tagsehen wurde empirisch ermittelt und gibt die Stärke der Helligkeitsempfindung über den Bereich der sichtbaren Strahlung von 380 nm – 780 nm an [108]. Bei nächtlichen Sehbedingungen hat die $V'(\lambda)$ -Kurve Gültigkeit.

Die grundlegende lichttechnische Größe ist der Lichtstrom Φ , welcher das lichttechnische Pendant zur Strahlungsleistung Φ_e darstellt. Der Index e steht hierbei für „energetisch“. Die Einheit des Lichtstroms Φ ist [lm]. Der Lichtstrom Φ wird gemäß Gleichung (B.1) berechnet. Dabei bezeichnet k_m das photometrische Strahlungsäquivalent, welches für Tagsehen $683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ und für Nachtsehen $1699 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ beträgt.

$$\Phi = k_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (\text{B.1})$$

Messtechnisch wird der Lichtstrom Φ erfasst, indem entweder eine einzelne Messung in einer Ulbricht-Kugel durchgeführt wird oder

die Lichtstärke I in jeder Raumrichtung gemessen und dann über den gesamten Raumwinkel Ω integriert wird.

B.1.2 LICHTSTÄRKE

Die Lichtstärke I hat die Einheit [cd] und berechnet sich gemäß Gleichung(B.2). Es handelt sich dabei um den Lichtstromanteil $d\Phi$, der in ein bestimmtes Raumwinkelement $d\Omega$ abgestrahlt wird.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (\text{B.2})$$

Die Lichtstärke I ist unabhängig von der Entfernung, da sich der Raumwinkel Ω nicht mit der Entfernung ändert. Messbar ist die Lichtstärke nicht direkt, sie kann aber gemäß dem photometrischen Entfernungsgesetz, Gleichung(B.3), aus der Beleuchtungsstärke E berechnet werden. Dabei bezeichnet r den Abstand zwischen dem Messempfänger und der Lichtquelle.

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (\text{B.3})$$

B.1.3 BELEUCHTUNGSSTÄRKE

Die Beleuchtungsstärke E wird in der Einheit [lx] angegeben und ist die einzige lichttechnische Größe, die gemessen werden kann. Sie ergibt sich gemäß Gleichung(B.4) aus dem Lichtstromanteil $d\Phi$, der auf eine bestimmte Fläche dA , z.B. die des Messempfängers, trifft.

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (\text{B.4})$$

Die Beleuchtungsstärke und die Lichtstärke besitzen im photometrischen Entfernungsgesetz einen Zusammenhang. Für weitere Informationen hierzu sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

B.1.4 LEUCHTDICHTE

Die Leuchtdichte L hat keine eigene Einheit, sondern wird in $[\frac{cd}{m^2}]$ angegeben. Sie ist die einzige lichttechnische Größe, die das menschliche Auge wahrnimmt. Gemäß Gleichung(B.5) ergibt sich die Leuchtdichte L aus dem Lichtstrom Φ , der in ein Raumwinkelement $d\Omega$ und von einem Flächenelement dA abgestrahlt wird.

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA} \quad (\text{B.5})$$

B.2 DIGITALE PROJEKTOREN AUF DMD-BASIS

Grundlage der DMD-Technologie ist eine matrixförmige Anordnung (Array) von Spiegeln, deren Größe im Mikrometerbereich liegt. Diese können in wenigen Mikrosekunden zwischen zwei stabilen Positionen gekippt werden. Während die erste Position dem digitalen Wert 0 entspricht und die Lichtstrahlen auf einen Absorber gelenkt werden, handelt es sich bei der zweiten Position um die digitale 1. Dazu werden die Lichtstrahlen auf eine Projektionsoptik reflektiert, welche die, in der Regel in einer Ebene rechteckige, Ziellichtverteilung erzeugt. Die Effizienz dieser Art der Lichtlenkung ist vergleichsweise gering, da je nach eingestellter Lichtverteilung ein Großteil des Lichtes absorbiert, d.h. in Wärme umgewandelt wird.

Digitale Projektoren verwenden aufgrund des großen Lichtstroms zumeist Höchstdruckgasentladungslampen als Lichtquelle. Die Lichtstrahlen der Lampe werden gesammelt und auf das DMD-Array gelenkt. Dazwischen befindet sich ein rotierendes Filtrerrad, mit dessen Hilfe die spektrale Zusammensetzung des abgestrahlten Lichts variiert werden kann. Durch eine zeitliche Synchronisierung zwischen der Kippstellung der Mikrospiegel und der Rotationsgeschwindigkeit erfolgt die Farbmodulation pixelgenau.

Die Bildübertragung zwischen Steuerrechner und Projektor erfolgt mittels gängiger Verbindungsstandards wie VGA, DVI, HDMI oder DisplayPort. Die Erfindung des DMD wird im Patent von Tregilgas [109] beschrieben.

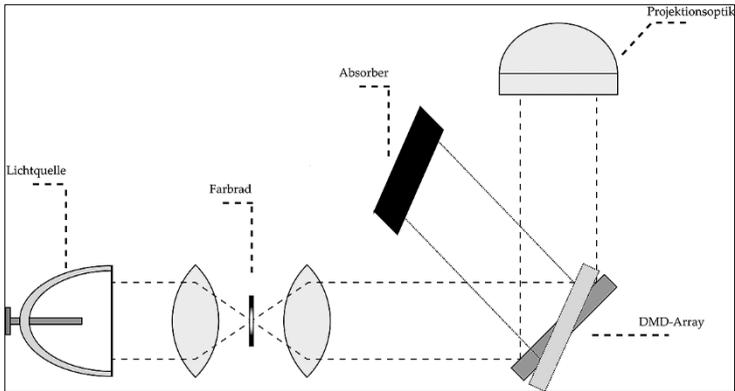


Abbildung B.1: Prinzipielle Funktionsweise von Digitalprojektoren mit DMD-Technologie: Das Licht einer Gasentladungslampe wird auf eine Anordnung von Mikrospiegeln gelenkt, die die Lichtstrahlen entweder auf einen Absorber (logisch 0) oder auf die Projektionsoptik (logisch 1).

B.3 VISUELLE WAHRNEHMUNG IM KRAFTFAHRZEUG

B.3.1 FLIMMERVERSCHMELZUNGSFREQUENZ

Die Intensitätsmodulation von LEDs erfolgt in der automobilen Lichttechnik in der Regel mit Hilfe einer PWM. Auch DMD-basierte Digitalprojektoren setzen diese Technik ein. Auf die technischen Hintergründe, die die Anwendung dieses Verfahrens bedingen, soll dabei an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Gemäß dem Gesetz von Talbot ist die vom menschlichen Auge wahrgenommene Leuchtdichte der arithmetische Mittelwert der periodischen Intensitätsschwankungen der Lichtquelle. Der Satz gilt jedoch nur, wenn die Taktfrequenz der PWM (Ein/Aus) oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz des Auges liegt. Letztere hängt jedoch von der Lage der Lichtquelle im Blickfeld ab. Im peripheren Bereich liegen die unterscheidbaren Frequenzen evolutionsbiologisch bedingt deutlich höher und es kann u.U. ein Flackern des Lichts wahrgenommen werden.

B.3.2 REGENBOGENEFFEKT

Wie in Anhang B.2 beschrieben, wird in DMD-Projektoren ein rotierendes Filterrads eingesetzt, welches im Zeitmultiplexverfahren Farbfilter im Strahlengang platziert. Bei schnellen Augenbewegungen, hohen Relativgeschwindigkeiten der im Straßenverkehr beleuchteten Objekte sowie einer unzureichenden Rotationsfrequenz des Filterrads kann das Auge die einzelnen Farben getrennt

wahrnehmen und es entsteht der Eindruck eines Regenbogens. Es wird vom sogenannten Regenbogeneffekt gesprochen. Bei DMD-Projektoren kann dieser vermieden werden, indem jeder Farbkanal ein eigenes Mikrospiegelarray bekommt und die Farben danach wieder zusammengesetzt werden. Ein Regenbogeneffekt tritt hier durch das Wegfallen des Filtrerrades nicht auf. Die 3-Chip Technologie ist jedoch aufwändig in der Herstellung und daher mit Kosten verbunden, die in etwa einem Faktor 10 im Vergleich zur herkömmlichen 1-Chip Technik entsprechen.

B.3.3 ADAPTATION DES AUGES

Die Grundfunktionen des menschlichen Auges, d.h. die Wahrnehmung von Leuchtdichte- und Farbdifferenzen sowie von Formen, hängen entscheidend von der im Gesichtsfeld vorherrschenden Umfeldleuchtdichte ab. Im Fall einer konstanten Umfeldleuchtdichte erreicht das Auge einen bestimmten Adaptationsendzustand. Bei einem Wechsel der Umfeldleuchtdichte findet ein Adaptationsvorgang statt. Das menschliche Auge verfügt über vier Adaptationsmechanismen:

- *Pupillenweite*
- *Übergang vom Zapfen- auf das Stäbchensehen*
- *Empfindlichkeitsänderung von Zapfen und Stäbchen*
- *Zusammenschaltung mehrerer Rezeptoren*

Die Pupillenweite kann im Bereich von 2-8 mm variiert werden und regelt vor allem den ins Auge einfallenden Lichtstrom. Nachts ist die Pupillenweite folglich groß und tagsüber klein.

Die Zapfen sind für die Helligkeits- und Farbempfindung zuständig, die Stäbchen detektieren die einfallende Strahlung spektral aseptiv und tragen ausschließlich zur Helligkeitsempfindung bei. Durch Verschiebungen des Reaktionsgleichgewichtes des für den Lichtreiz verantwortlichen Sehstoffes Rhodopsin (Sehpurpur) kann die Empfindlichkeit der Stäbchen und Zapfen variiert werden. Rhodopsin besteht aus Vitamin A und einem Protein und erzeugt durch Absorption eines Lichtquants einen elektrischen Impuls. Sein Absorptionsmaximum liegt bei einer Wellenlänge von etwa 500 nm. Speziell langwellige Strahlung (rotes Licht) wirkt sich auf das Rhodopsin nur unmerklich aus, weshalb rotes Licht z.B. in U-Booten eingesetzt wird, um eine Beeinflussung des Adaptationsniveaus des Auges zu minimieren.

Schließlich kann durch die Zusammenschaltung mehrerer Rezeptoren, insbesondere der Stäbchen, die Empfindlichkeit bei geringen Umfeldleuchtdichten weiter erhöht werden.

Die Anpassung des Auges an höhere Leuchtdichten wird als Helladaptation bezeichnet. Sie erfolgt innerhalb von Sekundenbruchteilen. Der gegenteilige Mechanismus ist die Dunkeladaptation, welche deutlich langsam abläuft und in der Regel mehrere Minuten benötigt. Für detailliertere Informationen sei auf die einschlägige Literatur verwiesen ([110],[103],[1],[111]).

B.3.4 BLENDUNG

Der Begriff Blendung umfasst im Kontext der Lichttechnik einerseits einen Sehzustand, der als unangenehm oder störend empfunden wird, und zum anderen eine Herabsetzung der Sehfunktionen. Der erste Fall wird als psychologische, der zweite als physiologische Blendung bezeichnet.

Von einer psychologischen Blendung spricht man, wenn eine Person eine Beleuchtungssituation als unangenehm oder störend empfindet. Die Quantifizierung der psychologischen Blendung erfolgt in der Regel mithilfe der von deBoer vorgeschlagenen Skala [107]. Diese ist ordinal skaliert und reicht von 1 (unerträglich) bis 9 (merklich).

Die physiologische Blendung hat ihre Ursache gemäß Holladay [86] in einer Streulichtbildung im Auge, welche durch Lichtquellen im Gesichtsfeld hervorgerufen wird. Entstehungsorte für das Streulicht sind dabei die Grenzflächen „Hornhaut-Lederhaut“, „Linse-Kammerwasser“ sowie eine Inhomogenität des Brechungsindex in den Augenmedien. In Abbildung B.2 ist die Streulichtentstehung visualisiert.

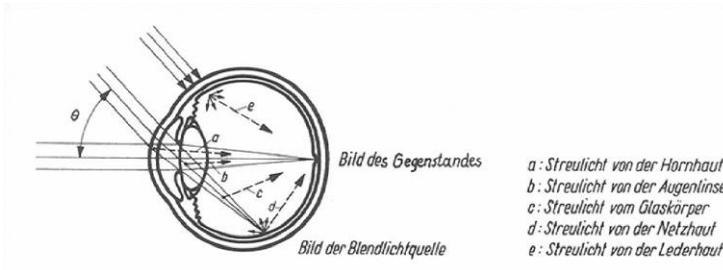


Abbildung B.2: Streulichtentstehung im Auge nach Hentschel [110]

Das Streulicht der Lichtquellen überlagert sich dem eigentlichen Bild des Gegenstandes und führt zu einer Erhöhung des Adaptionsniveaus. Die zur ursprünglichen Adaptionsleuchtdichte hinzukommende Leuchtdichte durch das Streulicht wird als äquivalente Schleierleuchtdichte bezeichnet. Sind mehrere Lichtquellen vorhanden, so addieren sich deren Schleierleuchtdichten.

Die Schleierleuchtdichte legt sich sowohl über die zu erkennenden Objekte als auch den Hintergrund, womit der resultierende Objektkontrast herabgesetzt wird. Ein Objekt muss demnach über eine höhere Leuchtdichte verfügen, um erkannt werden zu können. Folglich steigt der Schwellenkontrast mit einer zunehmenden äquivalenten Schleierleuchtdichte.

Anhang C: PROJEKTOREN

C.1 LICHTSTÄRKE

Die Lichtstärkeverteilung wurde für jeden Projektor mittels eines KFZ-Photogoniometers ermittelt. Der Projektor befand sich während der Messung in der Position bzw. dem Modus „Decken-einbau vorne“, d.h. er strahlte mit einem vertikalen Versatz von 3° nach unten. Vertikal erstreckte sich der Messbereich von 0° bis $-21,8^\circ$, horizontal von $-17,45^\circ$ bis $17,45^\circ$. Die Auflösung betrug in beiden Richtungen $0,07^\circ$. Dieser Wert resultiert aus der Größe der Projektorpixel, welche ca. $0,0175^\circ$ beträgt, und aus der Tatsache, dass nur ein ganzzahliges Vielfaches eines Pixels, im kleinsten Fall also das Vierfache, in die Messung einbezogen werden sollte, um Messunsicherheiten zu verringern.

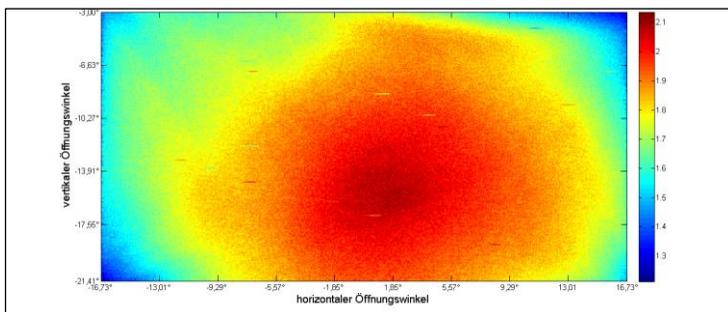


Abbildung C.1: Lichtstärkeverteilung Benq SP840

C.2 GRAUSTUFEN

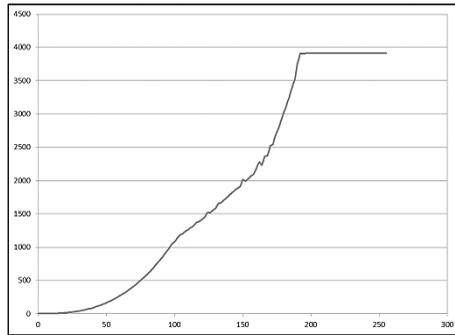


Abbildung C.2: Graustufen vs. Intensität

C.3 SPEKTRALE CHARAKTERISTIK

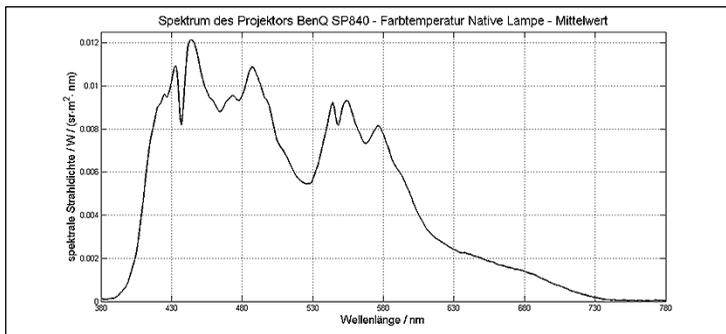


Abbildung C.3: Spektrum der Gasentladungslampe der Projektoren

C.4 DATENBLATT

Tabelle C.1: Auszug aus dem Datenblatt des Projektors Benq SP840 [113]

Projektionssystem	DLP® technology by Texas Instruments®
Natürliche Auflösung	1080p (1920 x 1080)
Helligkeit	4000 ANSI lumens
Kontrastverhältnis	3000:1 (Full on/Full off)
Bildschirmfarben	Full 1.07 billion color palette
Objektiv	F=2.50-2.76, f=23.5mm-28.2mm
Seitenverhältnis	16:9 Native, 5 modes Selectable
Projektionsrate	1.60-1.92 (56"@2m)
Bildgröße (diagonal)	24" to 300"
Zoom-Verhältnis	Manual Zoom, 1.20:1
Lampen-Modus (Normal/Eco)	300W, 2000/ 3000 hours (Normal/Economic mode)
Trapezkorrektur	Manual Vertical ± 30°
Horizontalfrequenz	31-90 kHz
Vertikalfrequenz	50-85 Hz
Computer-Kompatibilität	VGA(640 x 480) to UXGA(1600 x 1200)
Abmessungen (B x H x T)	325 x 95 x 254 mm (12.8 x 3.7 x 10 inch)
HDTV-Kompatibilität	480i, 480p, 576i, 576p, 720p, 1080i, 1080p/60/50/30/25/24

ANHANG

Video-Kompatibilität	NTSC, PAL, SECAM
Eingangsanschlüsse	<p style="text-align: center;">PC: Analog RGB: D-sub 15 pin x 1</p> <p style="text-align: center;">A/V: HDMI(v1.3) x 2 Component Video: RCAx 3 S-Video: Mini Din 4 pin x 1 Composite Video:RCAx1 LAN: RJ45 x 1</p> <p style="text-align: center;">Audio: Stereo Mini Jack x 1 Audio L/R: RCA x 2</p>
Ausgangsanschlüsse	<p style="text-align: center;">PC: Monitor Out: D-sub 15 pin x 1</p> <p style="text-align: center;">Audio: Speaker: 3W x 1 Variable Audio Out : Stereo Mini Jack x 1 DC 12V x1</p>
Kontrollgerät	Serial Connector : RS232 9 pin (male)
Gewicht	Net weight: 3.4 kg. Gross weight: 6.67 kg.
Betriebsgeräusch	38/33 dBA (Normal/Economic mode)
Netzteil	100 to 240 VAC, 50/60 Hz
Leistungsaufnahme	430W, Standby < 1W
OSD Sprachen	English/ Danish/ Finnish/ French/ German/ Italian/ Norwegian/ Polish/ Portuguese/ Russian/ Traditional Chinese/ Simplified Chinese/Spanish/ Swedish/ Korean/ Czech/ Japanese (17 Languages)
Bild-Modi	Dynamic Mode Standard Mode

	<p>sRGB Mode Cinema Mode User 1 Mode User 2 Mode User 3 Mode</p>
Funktionen	<p>BrilliantColor™ RoomView Compatible Crestron LAN Control Wall Color Correction Closed Captioning Blank 3D Color Management Panel Key Lock Resolution Reminder Auto Off Digital Zoom Security Password Freeze "Q?" Hot Key for FAQ HDTV compatible High altitude mode</p>

C.5 PROJEKTOREINSTELLUNGEN

Tabelle C.2: Menüeinstellungen der Projektoren im *Propix*-System

Bild	
<i>Standard</i>	
Bildmodus	Benutzer 1
Referenzmodus	Standard
Helligkeit	50
Kontrast	50
Farbe	0
Farbton	0
Bildschärfe	15
Rauschunterdrückung	5
<i>Erweitert</i>	
Steuerung Bildschärfe	
Geräuschreduktion	15
Detailverbesserung	0
Luma Übertragung	10
Chroma Übertragung	10
Farbtemperatur	Benutzer 1
Farbtemperatur Feinabstimmung	Native Lampe
Gamma-Auswahl	2:8
Helle Farben	Ein
Mikrospiegelaktor	4
3D-Farbverwaltung	
Primärfarben	R
FTn	-12
Sättigung	104
Zunahme	105
Farbraum-Umwandlung	RGB
Display	
<i>Standard</i>	
Bildformat	16:9
Schrägposition	
Autom. Schrägposition	Aus
Schrägposition	0
Überscan-Anpassung	

ANHANG

Video-Overscan	0
Einstellungen	
<i>Standard</i>	
Sprache	Deutsch
Projektorposition	Decke vorne
Menüeinstellungen	
Menüposition	Mitte
Menü-Anzeigezeit	30 sec
Autom. Abschaltung	Deaktiviert
Direct Power On	Ein
Wartezeit	Deaktiviert
Sleeptimer	Deaktiviert
Bedienfeldtastensperre	Ein
Hintergrundfarbe	Schwarz
Quelle	
Computer	✓
HDMI 1	✓
HDMI 2	✓
Component	✓
Video	✓
S-Video	✓
Schnelle Auto-Suche	Ein
Startbild	Schwarz
<i>Erweitert</i>	
Audioeinstellungen	
Ton aus	Ein
Lautstärke	0
Höhen	0
Tiefen	0
Ton Ein/Aus	Aus
Lampeneinstellungen	
Lampenmodus	Normal
HDMI-Einstellungen	
HDMI-Format	PC-Signal
HDMI-Verstärkung	3
Höhenmodus	Aus
Sicherheitseinstellungen	
Startsperre	Aus
Baudrate	115200
Testmuster	Aus

ANHANG

Monitorausgang im Standbymodus	Aus
LAN-Steuerungseinstellungen	
Gesteuert von	RS232
Informationen	
Quelle	HDMI
Bildmodus	Benutzer 1
Auflösung	1080i 60 Hz
Color System	RGB
Entsprechende Lampenstunden	...
Firmware-Version	100

Anhang D: STUDIE AUSBLENDUNG

D.1 KOMMENTARE ZU DEN LICHTVERTEILUNGEN

Dieser Abschnitt listet die Kommentare der Probanden zu den einzelnen Lichtverteilungen auf. Teilweise beziehen sich die Aussagen auf vorangegangene Lichtverteilungen, die in eckigen Klammern aufgeführt sind. Für die Lichtverteilungen werden die in Tabelle D.1 erläuterten Abkürzungen verwendet.

Tabelle D.1: Abkürzungen Kommentare

Abkürzung	Bedeutung
G0	Kein gradueller Übergang zwischen Hell und Dunkel
G1	Gradueller Übergang zwischen Hell und Dunkel über einen Winkelbereich von 1°
G2	Gradueller Übergang zwischen Hell und Dunkel über einen Winkelbereich von 2°
SB0	Kein Sicherheitsbereich um das ausgeblendete Fahrzeug
SB1	Sicherheitsbereich um das ausgeblendete Fahrzeug über einen Winkelbereich von 1°
SB2	Sicherheitsbereich um das ausgeblendete Fahrzeug über einen Winkelbereich von 2°

D.1.1 AUSBLENDENDES FAHRZEUG (PROPIX)

Abblendlicht

- *Wald wenig ausgeleuchtet, also so gut wie keine Ausleuchtung nach links & rechts*
- *Gute Ausleuchtung des linken Randes*
- *Viel zu dunkel*
- *Vgl. zu vorher sehr düster*
- *Lichtkegel relativ breit*
- *Lichtverteilung breit*
- *Zu dunkel, vorherige [Ausleuchtung] wesentlich besser [G2-SB0]*
- *Lichtverteilung bzw. Helligkeit deutlich angenehmer*
- *Wald wird nicht ausgeleuchtet*
- *Zu wenig Ausleuchtung zum Vordermann*
- *Fahrzeug sehr dunkel, aber gut zu erkennen*
- *Schlechte Lichtverteilung*
- *Ausleuchtung schlecht, alle anderen waren besser*
- *Viel zu dunkel*
- *Ist mir zu dunkel*

G0-SB1

- *Zu kantiger Bereich*
- *Ausleuchtung bis in die Höhe [ABBL]*
- *Rechts + links Ausleuchtung tiefer [G0-SB2]*
- *Fahrbahnränder sehr weitläufig ausgeleuchtet, aber zu grell! [ABBL]*
- *Rechteckige ausgeleuchtete Fläche um das vordere Auto irritiert*
- *Zu wenig Ausleuchtung*
- *Dunkle Fläche ist zu groß*

- *Angenehme Ausleuchtung*
- *Vorm vorausfahrenden Fahrzeug zu dunkel*
- *(...) klare Umrisse, die irritierend sind*
- *Zu eckig, unsymmetrisch*
- *Zu dunkel in der Mitte*
- *Aussparung für Vordermann rautenförmig, aber nicht besser [G1-SB0]*
- *Die Ausleuchtung des Straßenrands ist störend*
- *Geringste Blendwirkung*
- *Kontrast des Trapez zu stark!*
- *Kleines Trapez besser [G0-SB2], Konturschärfe negativ*

G0-SB2

- *Wenig Ausleuchtung direkt zwischen Fahrzeugen*
- *Zu großer kantiger Kasten*
- *Zu dunkel in der Mitte*
- *Übergang zu krass von hellem Licht zu Ausblendung*
- *Zu wenig Ausleuchtung zum vorausfahrenden Fahrzeug*
- *Dunkle Fläche ist zu groß*
- *Große Aussparung in der Mitte -> unangenehm*
- *Zu großer dunkler Bereich in der Mitte*
- *Die zwei schwarzen Rechtecke stören*
- *Unangenehme schwarze Schatten vorm Fahrzeug und dahinter – macht unsicher*
- *„Dunkel“-Kasten um vorderes Auto merkwürdig, weil man dort nichts sieht*
- *Kasten um Vordermann zu eckig, störend; mehrere Schatten*
- *Mehrfache Schatten störend, viel zu dunkel*
- *Es fehlt zu viel Straße*

- *Die hell-dunklen Kanten sind zu stark*
- *Fahrzeug schlechter beleuchtet [ABBL]*
- *Dunkles Rechteck stört*
- *Schwarze Raute irritiert*
- *Die „schwarzen Vierecke“ stören*
- *Unsicheres Gefühl*
- *Ist mir zu dunkel*
- *Kontrast zu dunklem Trapez sehr hoch!*
- *Großes, kontrastreiches Trapez negativ!*

G1-SB0

- *Kontinuierliche Beleuchtung angenehmer als „Kästen“*
- *Dunkles Feld in der Mitte verschwunden [G0-SB1]*
- *Ausleuchtung mittig heller [G0-SB1]*
- *Kleiner Schatten hinter dem Auto*
- *Gute Ausleuchtung – aber Gefühl zu blenden*
- *Lichtbreite trapezförmig*
- *Kasten noch weniger zu sehen [G1-SB1]*
- *Vorderfahrzeug in dunklem Kasten, aber angenehmer im Vgl. zu [G0-SB2]*
- *Fahrzeug reflektiert mein Licht stärker*
- *Zu kontrastarm*
- *Gefällt mir besonders*
- *Die Ausleuchtung um das vordere Fahrzeug ist in einem Abstand von ca. 0,5 m nicht gut*
- *Zu großer schwarzer Bereich, zu krasser Kontrast*
- *Kleineres Trapez ist besser, geringe Kontraste positiv!*

G2-SB0

- *Heller, weiter (breiter), höher ausgeleuchtet [ABBL]*
- *Lichtverteilung besser [G0-SB1]*
- *Lichtverteilung sehr hoch [ABBL]*
- *Mittig heller und angenehmer [G0-SB2]*
- *Fließender Übergang vom hellen Scheinwerferlicht zur Ausblendung des Vordermanns sehr angenehm.*
- *Besser als [G0-SB2], da weichere Kanten*
- *Kasten eher diffus, also nicht so irritierend wie in [G0-SB2]*
- *Etwas schlechter als [G1-SB0]*
- *Sehr angenehm, blendet eventuell, da Fahrzeug etwas stärker beleuchtet, aber eigentlich geht es denke ich*
- *Noch bessere Ausleuchtung des Vordermanns [G0-SB1]*
- *Größeres Trapez ist angenehmer*
- *Großes Trapez mit geringstem Kontrast! Positiv!*

D.1.2 AUSGEBLENDETES FAHRZEUG

Abblendlicht

- *Man gewöhnt sich schnell an das Helle. Dagegen wirkt eigener Scheinwerfer im Nachhinein kümmerlich*
- *Zu wenig Licht in die Weite*
- *Zu dunkel, vorher besser [G2-SB0]*
- *Man sieht in die Weite gar nichts mehr*
- *Zu wenig Ausleuchtung vom Umfeld*
- *Schlechte Ausleuchtung in Entfernung*
- *Eingeschränkte Sicht*
- *Relativ schlechte Sicht*

- *Sehr schlechte Sicht*
- *Viel zu dunkel*
- *Allgemein zu dunkel*

G0-SB1

- *Ausleuchtung oben an Bäumen besser, aber Straße gleich [G0-SB2]*
- *In der Ferne etwas dunkler, aber kaum bemerkbar [G1-SB0]*
- *Weitere Sicht auch in die Höhe [G0-SB2]*
- *Mittig zu dunkel*
- *Etwas blendend [ABBL]*
- *Sehr angenehm*
- *Wald stark beleuchtet, die Straße aber nicht, lenkt von der Straße ab, man schaut immer nach links und rechts*
- *Starke Blendung von hinten*
- *Man fährt in ein schwarzes Loch*
- *Im entfernten Bereich schlechtere Beleuchtung am Boden*
- *Licht geht weiter in die Tiefe [G0-SB2]*
- *Angenehm, nur Mitte macht unsicher*
- *Mittlere Sicht im Dunkeln*
- *Eine unnatürliche und damit störende Form*
- *Zu scharfe Kanten*
- *Links und rechts – Umfeld mehr ausgeleuchtet*
- *Bessere Ausleuchtung nach rechts vorne*
- *Seitliche Ausleuchtung stört*
- *Besser als [G0-SB2], zentraler Bereich vor mir wird besser ausgeleuchtet als zuvor*
- *Fernbereich intensiver [G1-SB0]*

G0-SB2

- *Deutlicher dunkler in der Ferne*
- *Ränder weniger gut ausgeleuchtet [G1-SB0]*
- *Angenehm*
- *Besser, da nicht so großer Kontrast zwischen hell/dunkel [G0-SB1]*
- *Gute Ausleuchtung des Waldrands (2-3 m von der Straße weg)*
- *In größerer Entfernung direkter Straßenrand nur schlecht sichtbar*
- *Straßenausleuchtung und Seitenstreifen sichtbar*
- *Kante an Baum störend*
- *Noch weniger vom Wald zu sehen [G2-SB0]*
- *Weniger Ausleuchtung der Seiten [G2-SB0]*
- *Straßenführung zu dunkel*
- *Ist mir in der Ferne zu dunkel*
- *Umgebung sehr gut ausgeleuchtet*

G1-SB0

- *Sehr angenehme Ausleuchtung der Straße und Ränder*
- *Randbeleuchtung geht weiter, bringt aber nur bedingt was, dazwischen schwarz, etwas komisch -> Mitte nicht sichtbar*
- *Bessere, weitere Ausleuchtung [G2-SB0]*
- *Seitenstreifen sind gut ausgeleuchtet, Straßenmitte dunkel*
- *Gute Randausleuchtung nach vorne*
- *Finde ich besonders gut*
- *Da weiteres Sichtfeld [ABBL] besser als [ABBL], ich fühle mich sicherer, kann schneller reagieren*
- *Bis jetzt am besten, Bereich vor mir angenehm angestrahlt*

- *Straße noch zu dunkel [G0-SB2]*
- *Ausleuchtung seitlich besser [G2-SB0]*
- *Wesentlich bessere räumliche Ausleuchtung [ABBL]*

G2-SB0

- *Etwas irritierend, dass an Seiten hell [ABBL]*
- *Man sieht nicht, ob eigener Scheinwerfer an ist*
- *Sehr helle Ränder [ABBL]*
- *Auf Straße verschwindet das Licht [G0-SB1]*
- *Straßenseiten besser ausgeleuchtet [G0-SB2]*
- *Seiten besser ausgeleuchtet [ABBL]*
- *Weiterer Blick [ABBL]*
- *Sehr gut in der Höhe und Breite [ABBL]*
- *Ränder wie bei [G1-SB0] sehr gut ausgeleuchtet, man sieht weiter als bei [G0-SB2] und [G2-SB0]*
- *Seiten ungewohnt hell [ABBL]*
- *Das Dunkelfeld der Straßenmitte ist schwächer [G0-SB2]*
- *Dunkelheit in der Mitte scheint weniger [G0-SB1]*
- *Angenehmer, da keine so scharfen Kanten, aber insgesamt seitlich zu hell, deshalb Ferne im Vgl. sehr dunkel*

**D.1.3 GESAMTER VERSUCHSAUFBAU
(ABSCHLIEßENDER KOMMENTAR)**

- *Licht zu grell, schmerzt auf Dauer in den Augen*
- *Die harte Grenze zwischen ausgeleuchteter Fläche und nicht ausgeleuchteter Fläche (immer noch)*
- *unangenehm*
- *Allg.: harte Grenzen sind besser [wurden dennoch schlechter bewertet]*
- *Gute Ausleuchtung des Waldrandes in näherer Entfernung des Fahrzeuges*
- *Weichere Übergänge angenehmer*
- *Werde durch die gute Beleuchtung der Seiten vom eigentlichen Fahrzeug abgelenkt.*
- *Fließender Kontrastübergang besser!*
- *Schlechte Resultate v.a. wegen zu weit reichendem Seitenlicht*
- *Baumwipfelbeleuchtung unnötig und störend*
- *Ausleuchtung sehr gut. Für Fahrzeug vorne eventuell irritierend, da ungewohnt & starke Veränderung, wenn System aus. Sehr angenehm ist die Ausleuchtung links & rechts, womit man etwas mehr vom Wald sieht.*
- *Cooler System, v.a. bei stufenloser Ausblendung des Vorausfahrenden*
- *Bessere Ausleuchtung, viel weitere Sicht*
- *Deutlich bessere Sichtverhältnisse, auch im Seitenbereich und in die Höhe, ohne den Vordermann zu blenden -> sehr angenehm*
- *Sehr angenehm für Fahrer in beiden Fahrzeugen*
- *Die Ausleuchtung war sehr gut im Gegensatz zur herkömmlichen. Bessere Sicht nach vorne und zur Seite*

- *Licht war viel zu hell, auf Dauer unangenehm für die Augen des Fahrers, für den Vordermann war die Ausleuchtung der Straße bei fast allen Einstellungen sehr angenehm und ohne Blendung*
- *Guter Eindruck*
- *Schön hell und teilweise eine gute Ausleuchtung, Vordermann wird vermutlich kaum geblendet. Allerdings ist der optische Eindruck für den Vorfahrenden nicht sehr toll.*
- *Wäre von Vorteil, wenn man's hat*
- *Seitenstreifen waren toll ausgeleuchtet – war angenehm. Straße selbst war mir zu dunkel, hat mich teilweise unsicher gemacht*
- *Positiv ist vor allem, dass der Vordermann nicht im Rückspiegel geblendet wird. Der Dunkeltunnel ist irritierend, wenn der Übergang von Licht zum Dunkeln kaum diffus ist.*
- *Ausleuchtung des vorfahrenden Fahrzeugs insgesamt noch recht eckig, aber immer angenehmer bei weichem Lichtverlauf. Vorfahrender aber teilweise durch zu viel Licht seitlich evtl. eher abgelenkt -> Augen sind an hell gewöhnt und sehen im dunklen (vorne) dann schlechter.*
- *System ist wesentlich besser als die Xenonscheinwerfer*
- *Die Helligkeit ist sehr angenehm und entspannend. Das Weiß reflektiert die Gegenstände besser.*
- *Auf jeden Fall deutlich besser als „konventionelle“ Scheinwerfersysteme! Super interessant =)*
- *Durch das Scheinwerfersystem sieht man weiter, man sieht auch mehr die Umgebung*
- *Ausleuchtung der Seitenflächen sind sehr angenehm/entspannend für die Augen*

- *Zu viel Umfeldbeleuchtung. Fahrzeugausleuchtung nur etwas besser. Vorteil: deutlich weniger Kontrastübergänge und geringe Gefahr von Zufallsbegegnungen*
- *Wesentlich bessere seitliche Ausleuchtung und nach vorn als mit normalen Scheinwerfern. Starke kantige Aussparung vom Vordermann ist eher störend.*
- *Sehr störend war die Baumwipfelbeleuchtung durch das hintere Fahrzeug. Lenkt ab!*
- *Anfangs war ich skeptisch, aber als ich mich daran gewöhnt hatte, war es doch überzeugend.*
- *Ganz okay, die Ausleuchtung des Fahrzeuges muss meiner Meinung nach noch konturgenauer erfolgen, so dass kein dunkler Bereich um die ausgeblendeten Objekte entsteht.*
- *Leuchtet die Seiten gut aus und auch die Straße, aber ich hätte mir gewünscht, dass das vordere Fahrzeug an sich mehr ausgeleuchtet wird, bis auf Höhe des unteren Endes des Kofferraumdeckels.*
- *Ich orientiere mich beim Autofahren fast ausschließlich am Vordermann und nicht so sehr an den seitlichen Straßenrändern. Ebenso konzentriere ich mich vorwiegend auf den Straßenverlauf. Deswegen ist mir eine seitliche Ausleuchtung der Umgebung nicht so wichtig.*

D.2 STATISTISCHE AUSWERTUNG

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
G0_SB1	23	1,0	5,0	2,522	1,1229
G0_SB2	20	2,0	6,0	3,600	1,0588
G1_SB0	23	1,0	5,0	1,739	,9154
G2_SB0	23	1	5	2,22	1,085
Gültige Anzahl (listenweise)	20				

Abbildung D.1: Deskriptive Statistik bezüglich der Aussage *Sichtweite*

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
G0_SB1	28	1,0	6,0	5,143	1,3254
G0_SB2	28	1,0	6,0	5,571	1,0066
G1_SB0	27	1,0	6,0	4,389	1,5648
G2_SB0	24	1	6	5,08	1,357
Gültige Anzahl (listenweise)	21				

Abbildung D.2: Deskriptive Statistik bezüglich der Aussage *Blendung*

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
G0_SB1	28	1,0	6,0	3,429	1,4511
G0_SB2	27	1,0	6,0	4,148	1,3715
G1_SB0	28	1,0	5,0	2,250	1,2285
G2_SB0	27	1	5	2,41	1,135
Gültige Anzahl (listenweise)	23				

Abbildung D.3: Deskriptive Statistik bezüglich der Aussage *Fahrkomfort 1*

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
G0_SB1	24	1,0	5,5	2,896	1,2246
G0_SB2	29	1,0	5,5	3,034	1,2096
G1_SB0	29	1,0	5,0	2,483	1,2781
G2_SB0	29	1	5	2,53	,999
Gültige Anzahl (listenweise)	24				

Abbildung D.4: Deskriptive Statistik bezüglich der Aussage *Fahrkomfort 2*

Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe					
		G0_SB1	G0_SB2	G1_SB0	G2_SB0
H		28	26	28	27
Parameter der Normalverteilung $\hat{g}^{a,b}$	Mittelwert	2,4643	3,5000	1,6964	2,1667
	Standardabweichung	1,19357	1,25698	,87495	1,11803
Extremste Differenzen	Absolut	,294	,193	,221	,226
	Positiv	,294	,193	,221	,226
	Negativ	-,138	-,115	-,213	-,148
Teststatistik		,294	,193	,221	,226
Asymp. Sig. (2-seitig)		,000 ^c	,014 ^c	,001 ^c	,001 ^c

a. Die Testverteilung ist normal.
b. Aus Daten berechnet.
c. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors.

Abbildung D.5: Kolmogorov-Smirnov-Test für die Bewertung der Aussage *Sichtweite*; für die Erläuterung der Abkürzungen siehe Kapitel D.1

Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe					
		G0_SB1	G0_SB2	G1_SB0	G2_SB0
H		28	28	27	24
Parameter der Normalverteilung	Mittelwert	5,1429	5,5714	4,3889	5,0833
	Standardabweichung	1,32537	1,00659	1,56484	1,35668
Extremste Differenzen	Absolut	,277	,343	,207	,287
	Positiv	,259	,335	,152	,250
	Negativ	-,277	-,343	-,207	-,287
Teststatistik		,277	,343	,207	,287
Asymp. Sig. (2-seitig)		,000 ^a	,000 ^a	,004 ^c	,000 ^c

a. Die Testverteilung ist normal.
 b. Aus Daten berechnet.
 c. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors.

Abbildung D.6: Kolmogorov-Smirnov-Test für die Bewertung der Aussage *Blendung*; für die Erläuterung der Abkürzungen siehe Kapitel D.1

Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe					
		G0_SB1	G0_SB2	G1_SB0	G2_SB0
H		28	27	28	27
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	3,4286	4,1481	2,2500	2,4074
	Standardabweichung	1,45114	1,37152	1,22852	1,13542
Extremste Differenzen	Absolut	,111	,161	,259	,152
	Positiv	,088	,088	,259	,152
	Negativ	-,111	-,161	-,154	-,108
Teststatistik		,111	,161	,259	,152
Asymp. Sig. (2-seitig)		,200 ^{a,d}	,072 ^c	,000 ^c	,113 ^c

a. Die Testverteilung ist normal.
 b. Aus Daten berechnet.
 c. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors.
 d. Dies ist eine Untergrenze der tatsächlichen Signifikanz.

Abbildung D.7: Kolmogorov-Smirnov-Test für die Bewertung der Aussage *Komfort 1*; für die Erläuterung der Abkürzungen siehe Kapitel D.1

Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe

		G0_SB1	G0_SB2	G1_SB0	G2_SB0
H		24	29	29	29
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	2,8958	3,0345	2,4828	2,5345
	Standardabweichung	1,22456	1,20957	1,27813	,99938
Extremste Differenzen	Absolut	,101	,167	,150	,162
	Positiv	,101	,109	,150	,126
	Negativ	-,076	-,167	-,123	-,162
Teststatistik		,101	,167	,150	,162
Asymp. Sig. (2-seitig)		,200 ^{c,d}	,038 ^c	,095 ^c	,050 ^c

- a. Die Testverteilung ist normal.
- b. Aus Daten berechnet.
- c. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors.
- d. Dies ist eine Untergrenze der tatsächlichen Signifikanz.

Abbildung D.8: Kolmogorov-Smirnov-Test für die Bewertung der Aussage *Komfort 2*; für die Erläuterung der Abkürzungen siehe Kapitel D.1

Anhang E: STUDIE VORFELD

E.1 ROHDATEN

Tabelle E.1: Ermittelte Erkennbarkeitsentfernung in m; Werte nach arithmetischer Mittelung über die drei Sehobjekte und die Wiederholung des Durchgangs

#	Adaptiv	Minimum	Maximum	#	Adaptiv	Minimum	Maximum
1	53,2	36,1	48,6	14	50,0	42,6	54,8
2	48,9	34,9	45,9	15	47,4	51,7	55,0
3	33,5	37,1	29,4	16	38,4	39,1	50,7
4	20,1	24,3	33,2	17	39,8	36,0	40,0
5	28,8	33,6	42,0	18	40,8	52,4	44,9
6	38,2	38,4	46,2	19	68,9	82,1	82,0
7	51,9	37,7	49,7	20	41,4	41,9	51,7
8	31,6	37,9	48,7	21	46,8	40,4	47,3
9	52,1	53,4	59,4	22	30,6	40,2	36,7
10	51,2	46,4	50,4	23	45,1	54,3	53,3
11	43,6	52,6	47,1	24	58,6	40,3	51,7
12	43,9	38,1	40,9	25	51,4	66,2	59,3
13	49,1	41,8	46,4				

Tabelle E.2: Psychologische Blendung für das Vorfeld nach deBoer; Werte nach arithmetischer Mittelung über die Wiederholung des Durchgangs

#	Adaptiv	Minimum	Maximum	#	Adaptiv	Minimum	Maximum
1	9	9	9	14	9	9	9
2	8	8	8	15	8	8,5	8,5
3	9	9	9	16	9	7,5	8
4	8	8	8	17	8	7,5	7,5
5	8,5	8	8,5	18	6	6,5	7
6	9	9	9	19	6,5	7,5	5
7	7	7	7,5	20	5,5	5	6
8	8	8,5	8,5	21	9	9	9
9	6	7	6,5	22	8	8	8
10	8,5	8,5	9	23	7,5	7,5	7
11	9	9	8	24	9	9	9
12	7	8	6,5	25	8	8,5	8,5
13	5	3	3,5				

Tabelle E.3: Psychologische Blendung für entgegenkommende Fahrzeuge nach deBoer; Werte nach arithmetischer Mittelung über die Wiederholung des Durchgangs

#	Adaptiv	Minimum	Maximum	#	Adaptiv	Minimum	Maximum
1	6,5	3,5	7,5	14	6	6	6
2	6,5	5,5	6	15	5	7	6
3	5	3	6	16	3	7	5,5
4	5,5	6	6	17	8	8	8
5	6	4,5	5	18	5	5	5,5
6	4,5	6	5,5	19	7,5	3,5	7
7	3	4	3	20	6,5	7,5	5,5
8	4	4	4	21	8,5	9	9
9	6,5	8	6,5	22	3,5	7,5	4
10	3,5	4	3,5	23	6	6	6
11	4	3,5	3,5	24	6	6	6
12	1,5	2	2,5	25	5	7	6
13	3	2	2,5				

E.2 STATISTISCHE AUSWERTUNG

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Adaptiv	25	20,1	68,9	44,212	10,4155
Minimum	25	24,3	82,1	43,980	11,7631
Maximum	25	29,4	82,0	48,612	10,0747
Gültige Anzahl (listenweise)	25				

Abbildung E.1: Deskriptive Statistik der Erkennbarkeitsentfernung

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Adaptiv	25	5,0	9,0	7,860	1,2376
Minimum	25	3,0	9,0	7,840	1,4048
Maximum	25	3,5	9,0	7,760	1,4077
Gültige Anzahl (listenweise)	25				

Abbildung E.2: Deskriptive Statistik der psychologischen Blendung durch das Vorfeld nach deBoer

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Adaptiv	25	1,5	8,5	4,960	1,8367
Minimum	25	2,0	9,0	5,160	2,0037
Maximum	25	2,5	9,0	5,180	1,7905
Gültige Anzahl (listenweise)	25				

Abbildung E.3: Deskriptive Statistik der psychologischen Blendung durch die entgegenkommenden Fahrzeuge nach deBoer

Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe

		Adaptiv	Minimum	Maximum
H		25	25	25
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	44,212	43,980	48,612
	Standardabweichung	10,4155	11,7631	10,0747
Extremste Differenzen	Absolut	,114	,227	,143
	Positiv	,114	,227	,143
	Negativ	-,082	-,149	-,116
Teststatistik		,114	,227	,143
Asymp. Sig. (2-seitig)		,200 ^{c,d}	,002 ^c	,200 ^c

- a. Die Testverteilung ist normal.
- b. Aus Daten berechnet.
- c. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors.
- d. Dies ist eine Untergrenze der tatsächlichen Signifikanz.

Abbildung E.4: Kolmogorov-Smirnov-Test für die Erkennbarkeitsentfernung separiert nach der Vorfeldleuchtdichte

Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe

		Adaptiv	Minimum	Maximum
H		25	25	25
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	7,860	7,840	7,760
	Standardabweichung	1,2376	1,4048	1,4077
Extremste Differenzen	Absolut	,225	,204	,208
	Positiv	,178	,204	,189
	Negativ	-,225	-,204	-,208
Teststatistik		,225	,204	,208
Asymp. Sig. (2-seitig)		,002 ^c	,008 ^c	,007 ^c

- a. Die Testverteilung ist normal.
- b. Aus Daten berechnet.
- c. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors.

Abbildung E.5: Kolmogorov-Smirnov-Test für die psychologische Blendung durch das Vorfeld

Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe

		Adaptiv	Minimum	Maximum
H		25	25	25
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	4,960	5,160	5,180
	Standardabweichung	1,8367	2,0037	1,7905
Extremste Differenzen	Absolut	,114	,159	,171
	Positiv	,107	,159	,123
	Negativ	-,114	-,102	-,171
Teststatistik		,114	,159	,171
Asymp. Sig. (2-seitig)		,200 ^{c,d}	,105 ^c	,058 ^c

- a. Die Testverteilung ist normal.
- b. Aus Daten berechnet.
- c. Signifikanzkorrektur nach Lilliefors.
- d. Dies ist eine Untergrenze der tatsächlichen Signifikanz.

Abbildung E.6: Kolmogorov-Smirnov-Test für die psychologische Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge

Anhang F: VERÖFFENTLICHUNGEN

C. Jebas, S. Michenfelder

Ermittlung des Einflusses einer ambienten Innenraumbeleuchtung auf das Kontrastsehen des Fahrzeugführers

13. Augenoptisches Kolloquium, Jena 2010

C. Jebas, S. Michenfelder, C. Neumann

Einfluss einer ambienten Innenraumbeleuchtung auf das Kontrastsehen des Fahrzeugführers

Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (VKU), Ausgabe 07-08, 2010

S. Michenfelder, C. Neumann

Einfluss einer ambienten Innenraumbeleuchtung auf die Erkennbarkeit von Sehobjekten im nächtlichen Straßenverkehr

Lux junior 2011, Tagungsband, Dörnfeld/Ilm 2011

M. Niedling, S. Michenfelder, C. Jebas, C. Neumann

Influence of adaptive interior lighting in vehicles in the discomfort and disability glare

International Symposium on Automotive Lighting, Tagungsband, Darmstadt 2011

S. Michenfelder, C. Neumann

Entwicklung eines Projektor-basierten Forschungsscheinwerfers zur Erprobung neuartiger Lichtverteilungen

LICHT 2012, Tagungsband der 20. Gemeinschaftstagung, Berlin
2012

S. Michenfelder, C. Neumann

*Entwicklung eines Projektor-basierten Forschungsscheinwerfers zur
Erprobung neuartiger Lichtverteilungen*

VDI-Tagung „Optische Technologien im Automobil“, Karlsruhe
2012

S. Michenfelder, M. Neumeyer, C. Neumann

Konvertierungsalgorithmus für automobilen Forschungsscheinwerfer

Lux junior 2013, Tagungsband, Dörnfeld/Ilm 2013

S. Michenfelder, C. Neumann

Pixel Lighting – An Automotive Lighting Research Head Lamp

International Symposium on Automotive Lighting, Tagungsband,
Darmstadt 2013

S. Michenfelder, C. Neumann

Propix – Projektorbasiertes automobiles Pixellicht

Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Ausgabe 11, 2013

S. Michenfelder, C. Neumann

Propix – An Automotive Pixel Lighting Research Head Lamp

Fachtagung “Intelligent Automotive Lighting”, Frankfurt 2014

S. Michenfelder, C. Neumann

Propix (Projektor-Pixellicht) - Aktueller Entwicklungsstand und praktische Erprobung mittels Probandenstudien

VDI-Tagung „Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik“,
Karlsruhe 2014

S. Michenfelder, C. Neumann

Propix: Aktueller Entwicklungsstand und praktische Erprobung mittels Probandenstudien

LICHT 2014, Tagungsband der 21. Gemeinschaftstagung, Den Haag
2014

Anhang G: BETREUTE ARBEITEN

Jahn, P.

Einflussnahme des Antiblendlichtes auf psychophysiologische Parameter des Fahrzeugführers

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2011

Schöne, M.

Optische Simulation der Grundlichtverteilungen eines projektorbasierten Scheinwerfersystems

Studienarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2012

Ernst, F.

Entwurf des Gesamtkonzepts eines projektorbasierten Versuchsscheinwerfers

Studienarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2012

Reusch, J.

Entwicklung einer Steuersoftware für projektorbasierte Scheinwerfer

Studienarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2012

Söhner, S.

Entwicklung eines Matrixscheinwerfers zur Umsetzung eines maskierten Fernlichts

Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2012

Neumeyer, M.

Erzeugung beliebiger Lichtverteilungen durch ein Matrixscheinwerfersystem am Beispiel einer ECE-Abblendlichtverteilung

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2012

Helmer, M.

Sicherheitskritische Analyse eines laserbasierenden Nebelschlusslichts

Studienarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2012

Amann, H.

Entwicklung und Verifizierung einer Software zur Simulation von Blendung über Fahrzeugspiegel

Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2013

Lutz, S.

Konzeption, Aufbau und technische Analyse einer Plattform für projektorbasierte Versuchsscheinwerfer

Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2013

Schöne, M.

Simulation und Verifikation der temperaturbedingten Veränderungen einer refraktiven Elastomeroptik

Diplomarbeit, L-Lab / KIT, Lippstadt / Karlsruhe 2013

Beyer, C.

Kamerabasierte Detektion witterungsbedingter Fahrbahneigenschaften

Masterarbeit, Hella KGaA Hueck & Co./ KIT, Lippstadt / Karlsruhe
2013

Helmer, M.

*Altersbedingter Einfluss einer ambienten Innenraumbeleuchtung auf das
Kontrastsehvermögen bei Nacht*

Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2013

Reusch, J.

*Entwicklung einer echtzeitfähigen Lichtberechnungssoftware mit aktiver
Ausblendung von Fahrzeugen für Scheinwerfersysteme mit Projektoren*

Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2013

Hofner, R.

Bewertung von Ausblendungsstrategien bei adaptiven Scheinwerfersystemen

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2014

Walther, M.

*Entwicklung einer automatisierten Kalibrierung für ein Multi-Projektor-
Scheinwerfersystem*

Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2014

Jahn, P.

Kriterien zur Auflösungsbestimmung von adaptiven Scheinwerfersystemen

Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2014

Hollmig, G.

Auswahl und Verifikation von Filtern zum Markieren von Objekten im Straßenverkehr

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2014

H.2 DATENBLATT WECHSELRICHTER

EA-MEC-PB 150VA - 2000VA DC-AC SINUS-WECHSELRICHTER / DC-AC PURE SINE WAVE INVERTER							
Technische Daten	Technical Data	MEC-PB 800-24B	MEC-PB 1000-12	MEC-PB 1000-12C	MEC-PB 1000-24	MEC-PB 1000-24C	MEC-PB 1000-48C
Eingangsspg. DC	Input voltage DC	21...30V	10.5...15V	10.5...15V	21...30V	21...30V	42...62V
Ausgangsspg. AC	Output voltage AC	230V ±3%	230V ±3%	230V ±3%	230V ±3%	230V ±3%	230V ±3%
Ausgangsleistung	Output power	800VA	1000VA	1000VA	1000VA	1000VA	1000VA
Spitzenleistung	Output peak pwr.	1000VA	1500VA	1500VA	1500VA	1500VA	1500VA
Wirkungsgrad	Efficiency	>85%	>85%	>91%	>87%	>94%	>95%
Kurvenform	Waveform	Sinus / Sine	Sinus / Sine	Sinus / Sine	Sinus / Sine	Sinus / Sine	Sinus / Sine
KFZ-Zulassung	Automotive appr.	nein / no	nein / no	E-Mark	nein / no	E-Mark	E-Mark
Abm. BxHxT (mm)	Dim. WxHxD (mm)	236x83x335	236x83x395	182x88x383	236x83x395	182x88x383	182x88x383
Artikelnummer	Article number	35300127	35300112	35300138	35300113	35300137	35300138

Technische Daten	Technical Data	MEC-PB 1500-12C2	MEC-PB 1500-24C2	MEC-PB 1500-48C2	MEC-PB 2000-12C	MEC-PB 2000-24C	MEC-PB 2000-48C
Eingangsspg. DC	Input voltage DC	10.5...15V	21...30V	42...60V	10...16V	20...32V	42...62V
Ausgangsspg. AC	Output voltage AC	230V ±3%	230V ±3%	230V ±3%	230V ±3%	230V ±3%	230V ±3%
Ausgangsleistung	Output power	1500VA	1500VA	1500VA	2000VA	2000VA	2000VA
Spitzenleistung	Output peak pwr.	1650VA	1650VA	1650VA	2500VA	2500VA	2500VA
Wirkungsgrad	Efficiency	90% typ.	93% typ.	94% typ.	>91%	>94%	>95%
Kurvenform	Waveform	Sinus / Sine	Sinus / Sine	Sinus / Sine	Sinus / Sine	Sinus / Sine	Sinus / Sine
KFZ-Zulassung	Automotive appr.	E-Mark	E-Mark	E-Mark	E-Mark	E-Mark	E-Mark
Abm. BxHxT (mm)	Dim. WxHxD (mm)	191x88x370	191x88x370	191x88x370	208x166x422	208x166x422	208x166x422
Artikelnummer	Article number	35300147	35300148	35300149	35300139	35300140	35300141



300VA, C model



1000VA, C model

Abbildung H.8: Datenblatt der eingesetzten Wechselrichter MEC-PB 1500-12C2

H.3 DATENBLATT MONOKAMERA KALIBRIERUNG

Tabelle H.1:Datenblatt der Kalibrierkamera

Modellnummer	Guppy Pro F-503
Sensortyp	Progressive CMOS
Sensortyp	½.5"
Sensor	Aptina MT9P031
Sensorgröße, H x V (mm)	5.7 x 4.28
Pixels (H x V)	2592 x 1944
Pixelgröße, H x V (µm)	2.2 x 2.2
Pixeltiefe	12 bit
Bildrate (fps)	13
Kamerasteuerung	Programmable via IEEE-1394 bus
Synchronisation	External or Via Software
Videoausgang	IEEE-1394/FireWire.b
Belichtungsregelung	Via Software
Spannungsversorgung	IEEE-1394 cable or 12-pin HIROSE
Gewinde	C-Mount
Gewinde	#68-585 ¼-20 Mounting Adapter
Größe (mm)	29 H x 29 W x 44.8 L
Speicherplatz (MB)	64
Gewicht (g)	70
RoHS	Konform

H.4.1 ERLÄUTERUNGEN ZUM SCHALTPLAN

Im Folgenden die Erläuterungen zum Schaltplan in Abbildung H.9:

- 1 Lichtmaschine des Versuchsfahrzeugs
- 2 Zusätzliche Lichtmaschine
- 3-4 Pufferbatterien 12 VDC
- 5-9 Hochlastsicherungen
- 10-11 Schütze *SU 80-5038 14V CO/ SU 280 B-1277 14V CO* der Fa. Albright zum Zu-und Abschalten der Rechner / Projektoren
- 12-14 Wechselrichter *MEC-PB 1500-12C2* der Firma COTEK
- 15 Externer 230V-Anschluss für stationären Netzbetrieb
- 16-18 Relais *FIN 4C.02.8 230V* der Fa. Finder zum Schalten der Projektoren / Rechner
- 19-21 Fehlerstrom- / Leitungsschutzschalter *DS201A-B6/0,03* der Fa. ABB
- 22-24 Digitalprojektoren *SP 840* der Fa. Benq
- 25 Mehrfachsteckdose 230 V
- 26-27 *Propix* Steuerrechner samt Monitor
- 28 Zentraler Hauptschalter

- 29 Bedienpanel
- 30 Externe Festplatte
- 31 Entstörfilter
- 32 Kamera zur Objektdetektion
- 33 Rechner zur Verarbeitung der Kameradaten (Fa. Hella Aglaia)
- 34-35 Lüfter zur Entwärmung des Racks (12 V)
- 36 Arbeitsleuchte

SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
ISSN 2195-1152

- Band 1 Christian Jebas
**Physiologische Bewertung aktiver und passiver
Lichtsysteme im Automobil.** 2012
ISBN 978-3-86644-937-4
- Band 2 Jan Bauer
**Effiziente und optimierte Darstellungen von
Informationen auf Grafikanzeigen im Fahrzeug.** 2013
ISBN 978-3-86644-961-9
- Band 3 Christoph Kaiser
**Mikrowellenangeregte quecksilberfreie
Hochdruckgasentladungslampen.** 2013
ISBN 978-3-7315-0039-1
- Band 4 Manfred Scholdt
**Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der
Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System.** 2013
ISBN 978-3-7315-0044-5
- Band 5 André Domhardt
**Analytisches Design von Freiformoptiken
für Punktlichtquellen.** 2013
ISBN 978-3-7315-0054-4
- Band 6 Franziska Herrmann
Farbmessung an LED-Systemen. 2014
ISBN 978-3-7315-0173-2
- Band 7 Simon Wendel
Freiform-Optiken im Nahfeld von LEDs. 2014
ISBN 978-3-7315-0251-7
- Band 8 Carmen Kettwich
**Ablenkung im Straßenverkehr und deren
Einfluss auf das Fahrverhalten.** 2014
ISBN 978-3-7315-0288-3

Band 9 Steffen Michenfelder
**Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen
Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren. 2015**
ISBN 978-3-7315-0301-9



Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, wie aktuelle sowie zukünftige Technologien der automobilen Lichttechnik kosten- und zeiteffizient sowie insbesondere realitätsgetreu und mit hoher Validität abgebildet werden können. Es wird die Konzeption und der technische Aufbau der multifunktionalen Scheinwerferplattform Propix beschrieben, die sich für vielfältige Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Physiologie im Kontext der automobilen Scheinwerfertechnik nutzen lässt.

