

# **Entwicklung eines adaptiven Schlechtwetterlichtsystems zur Reduzierung der indirekten Blendung bei nassen Fahrbahnen**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte

**Dissertation**

von  
**Dipl.-Ing. Jorne Fischer**  
geb. am 17. September 1985 in Lüneburg

2015

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek
2. Referent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

Tag der Promotion: 13. Juli 2015

---

## Danksagung

---

Es ist geschafft: Nach Jahren über drei intensiver Arbeit können Sie endlich meine Dissertation in Ihren Händen halten. Diese entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im L-LAB, einem Forschungsinstitut für automobiler Lichttechnik und Mechatronik. Ich freue mich, dass HELLA mir die Möglichkeit gegeben hat, mich in einem so großartigen Umfeld mit diesem Thema beschäftigen zu können. Da eine solche Arbeit nie das Werk einer Einzelperson ist, möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Mitwirkenden für ihre tatkräftige Unterstützung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek, der sich sofort dazu bereit erklärt hat, mich als externen Doktoranden zu betreuen. Danke für die hervorragende fachliche Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen. Bei Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann bedanke ich mich herzlichst für die Übernahme des Koreferats.

Für die fachliche Betreuung seitens HELLA möchte ich mich aufrichtig bei Dr. Carsten Wilks und Christian Schmidt bedanken. Mein Dank gilt außerdem Christian Hüster, der durch seine Erfahrung in der Programmierung der MicroAutoBox wesentlich zur Inbetriebnahme des Radarsensors beigetragen hat. Zur Fertigstellung des Prototyps war das Verschwenken der Scheinwerfermodule unabdingbar. Bei der Anpassung der eingesetzten Schwenkmodule war mir David Schulz eine wertvolle Hilfe. Für die Unterstützung bei der Ausrüstung des Versuchsträgers und der Umrüstung der Rackaufbauten möchte ich vielmals bei der „guten Seele“ des Lichtkanals, Michael Schneider, bedanken.

Ich bedanke mich weiterhin bei allen Mitarbeitern des L-LAB, die mir zu jeder Tages- und Nachtzeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Diese Unterstützung und die stets harmonische Arbeitsatmosphäre sind wesentliche Faktoren, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Vielen Dank auch an alle Studenten, deren Praktika oder Abschlussarbeiten ich betreuen durfte. Hierdurch war es überhaupt erst möglich, das Thema in dem behandelten Umfang innerhalb des geplanten Zeitrahmens zu verwirklichen.

Ein großes Dankeschön geht an alle fleißigen Korrekturleser, die mir dabei geholfen haben, unverständliche Formulierungen oder Inhalte aufzudecken. Hervorzuheben sind hier insbesondere mein Vater und meine Freundin, die sich ohne jegliche Berührungspunkte mit Ingenieurwissenschaften sprachlich durch diese Arbeit „gequält“ haben.

Zu guter Letzt bedanke ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern, durch deren stete Unterstützung und Förderung ich diesen akademischen Weg überhaupt erst einschlagen konnte sowie bei meiner Freundin, die sich sicherlich den einen oder anderen Abend einen Partner gewünscht hätte, dessen Gedanken mal nicht woanders sind...

Jorne Fischer

Lippstadt, im Juli 2015



---

## Kurzfassung

---

Bei Dunkelheit liegen im Straßenverkehr aufgrund eingeschränkter Sichtverhältnisse erschwerte Bedingungen vor. Im Falle einer trockenen Fahrbahn sorgt der Einsatz der fahrzeugeigenen Scheinwerfer für eine deutliche Verbesserung. Nässe führt allerdings zu einem verstärkt spiegelnden Verhalten der Fahrbahn, sodass das meiste Licht der Scheinwerfer nach vorne reflektiert wird. Aufgrund dieser Reflexionen kann es zu einer erhöhten indirekten Blendung des Gegenverkehrs kommen. Dies stellt für jeden Fahrzeugführer eine unangenehme und gefahrenträchtige Situation dar, die es zu vermeiden gilt. Obwohl es im Bereich der lichtbasierten Fahrerassistenzsysteme schon mehrere adaptive Lösungen gibt, wurde die situative Anpassung der Lichtverteilung an die Witterungsverhältnisse bisher vernachlässigt. Das Ziel dieser Arbeit besteht daher in der Entwicklung eines Gesamtsystems zur Vermeidung einer indirekten Blendung des Gegenverkehrs in Schlechtwettersituationen. Als Lösung wird die partielle Abdunkelung relevanter Bereiche der Abblendlichtverteilung verfolgt, um die Reflexionen zu verhindern und somit den Gegenverkehr zu entblenden. Aufbauend auf diesem Ansatz wird ein Gesamtsystem entwickelt, das sowohl die notwendige Sensorik als auch ein Scheinwerfermodul zur Umsetzung dieser Schlechtwetterlichtfunktion umfasst. Zunächst werden die Anforderungen an das Gesamtsystem definiert und dieses anschließend in Form eines Prototyps realisiert. Mittels der Fusion eines Kamera- und Radarsensors sowie eines Sensorsystems zur Bestimmung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn kann das Umfeld bezüglich anderer Verkehrsteilnehmer und der Witterungsverhältnisse beschrieben werden, sodass die Scheinwerfer zur adaptiven Anpassung der Lichtverteilung angesteuert werden können. Die Validierung des Gesamtsystems erfolgt in einem zweistufigen Evaluationsverfahren: Die am Auge eines entgegenkommenden Fahrers gemessene Beleuchtungsstärke belegt, dass diese durch den gewählten Ansatz fast über den gesamten Begegnungsvorgang um über 90 % im Vergleich zu einem herkömmlichen Abblendlicht reduziert wird. Eine anschließende Probandenstudie zeigt, dass auch das subjektive Blendempfinden entgegenkommender Fahrer signifikant gesenkt werden kann. Im Vergleich zwischen herkömmlichem Abblend- und dem entwickelten Schlechtwetterlicht fällt die Bewertung der Probanden für letzteres auf einer neunstufigen Skala um fünf Skalenstufen besser aus. Die Adaption der eigenen Lichtverteilung wird hierbei nicht als störend empfunden. Damit wird belegt, dass das im Rahmen dieser Arbeit realisierte System eine wirksame Lösung zur Reduzierung der indirekten Blendung darstellt. Letztendlich würde eine Serienlösung, basierend auf den hier gewonnenen Erkenntnissen, einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit leisten.

**Schlüsselwörter:** Schlechtwetterlicht, nasse Fahrbahn, Vorwärtsreflexion, indirekte Blendung, lichtbasierte Fahrerassistenz, Kfz-Scheinwerfer, Sensorfusion, Umfelderkennung



---

## Abstract

---

### **Development of an adaptive adverse weather light system to reduce indirect glare on wet roads**

Driving at night has proven to be a challenge task, due in part to restricted visibility. In normal conditions, using the car's headlamps serves as a suitable solution for better visibility. However, in case of wet roads, the reflection properties of the surface change so that the light of the headlamps is mainly reflected forward and may interfere with the oncoming driver's vision. This effect leads to a negative impact on safety and must be avoided. Although several solutions in the field of light-based driver assistance systems exist, the adaptation to adverse weather conditions has been neglected so far. The aim of this thesis is to develop an integrated system to prevent indirect glare for oncoming drivers in adverse weather conditions. As a solution, the author suggests to darken those areas of light distribution which are responsible for the undesired reflections in order to reduce the dazzling effect. Based on this approach, the requirements of the system are defined and a prototype consisting of required sensors as well as headlamp modules is created. The fusion of a camera and a radar sensor allows to detect and describe other road users. A newly developed sensor that is able to measure the reflection properties of the road is used to determine the weather conditions. This information enables the adaptation of the light distribution according to the situation. The integrated system is validated following a two-stage evaluation method. Measurement data collected in the first stage show that in the chosen approach, the illuminance in the oncoming driver's eyes is reduced by more than 90% compared to the use of regular low beam. This finding can be confirmed in an empirical study. The results clearly indicate that the degree of the test persons' discomfort glare can be reduced significantly. On a 9-point scale participants' evaluation is 5 points better when the developed adverse weather light is activated. Moreover, the test group was unable to recognize the fact that the own light distribution is adapted and partially darkened. These results indicate that the chosen approach offers great benefits to oncoming drivers by effectively reducing indirect glare. Finally, an implementation of the proposed adverse weather light function as a series solution would make an important contribution to improved road safety conditions.

**Keywords:** adverse weather light, wet road, forward reflection, indirect glare, light-based driver assistance systems, headlamp, sensor fusion, environment detection





---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b>	<b>5</b>
2.1	Grundlagen . . . . .	5
2.1.1	Reflexionsarten . . . . .	5
2.1.1.1	Spiegelnde und diffuse Reflexion . . . . .	5
2.1.1.2	Vorwärts- und Rückwärtsreflexion . . . . .	6
2.1.2	Adaptation . . . . .	6
2.1.3	Blendung . . . . .	6
2.1.4	Feuchtezustände einer Fahrbahn . . . . .	7
2.1.5	Sensor-/Informationsfusion . . . . .	10
2.1.5.1	Sensorintegration . . . . .	11
2.1.5.2	Abstraktionsebenen . . . . .	11
2.1.5.3	Fusionsarchitekturen . . . . .	12
2.1.5.4	Sensordatenverarbeitung . . . . .	14
2.1.5.5	Umfeldmodellierung . . . . .	14
2.2	Stand der Technik . . . . .	15
2.2.1	Untersuchungen zu Schlechtwettersituationen . . . . .	15
2.2.2	Umfeldsensorik . . . . .	26
2.2.2.1	Verkehrsteilnehmer . . . . .	26
2.2.2.2	Straßenverhältnisse . . . . .	28
2.2.3	Sensorfusion . . . . .	29
2.3	Beitrag dieser Arbeit . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Systemfunktionsanalyse</b>	<b>32</b>
3.1	Geometrische Betrachtungen . . . . .	32
3.2	Pilotversuche zur Festlegung der Anforderungen . . . . .	34
3.2.1	Quantifizierung der Wirksamkeit des Ansatzes . . . . .	35
3.2.2	Probandenversuch zur Wahrnehmung der Lichtfunktion . . . . .	40
3.2.2.1	Aufgabenstellungen an die Probanden . . . . .	42
3.2.2.2	Auswertung der Studie . . . . .	44
3.3	Anforderungen an das Gesamtsystem . . . . .	47
3.3.1	Sensorik . . . . .	47
3.3.1.1	Detektion anderer Verkehrsteilnehmer . . . . .	47
3.3.1.2	Witterungsverhältnisse . . . . .	48
3.3.2	Scheinwerfer . . . . .	50

3.3.2.1	Winkelbereich . . . . .	50
3.3.2.2	Auflösung . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Realisierung der Umfelderkennung</b>	<b>63</b>
4.1	Detektion anderer Verkehrsteilnehmer . . . . .	63
4.1.1	Analyse der Sensordaten . . . . .	64
4.1.2	Realisierung der Datenfusion . . . . .	67
4.1.2.1	Position anderer Verkehrsteilnehmer . . . . .	67
4.1.2.2	Orientierung anderer Verkehrsteilnehmer . . . . .	68
4.1.2.3	Breite der Windschutzscheibe anderer Verkehrsteilnehmer	69
4.1.2.4	Höhe der Windschutzscheibe anderer Verkehrsteilnehmer .	69
4.1.2.5	Dynamik anderer Verkehrsteilnehmer . . . . .	70
4.1.2.6	Fahrzeugart der Verkehrsteilnehmer . . . . .	70
4.2	Detektion der Straßenverhältnisse . . . . .	71
4.3	Umfeldbeschreibung . . . . .	72
4.3.1	Verkehrsteilnehmer . . . . .	72
4.3.2	Straßenverhältnisse . . . . .	72
4.3.3	Witterungsbedingungen . . . . .	74
4.3.4	Verkehrsinfrastruktur . . . . .	74
4.3.5	Fahrzeugdynamik und -zustand . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Einzelkomponenten des realisierten Prototyps</b>	<b>76</b>
5.1	Sensorik . . . . .	77
5.1.1	Verkehrsteilnehmer . . . . .	77
5.1.2	Straßenverhältnisse . . . . .	77
5.1.2.1	Lichtmodul . . . . .	80
5.1.2.2	Sensoreinheit . . . . .	81
5.2	Scheinwerfer . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>90</b>
6.1	Validierung der Umfelderkennung . . . . .	91
6.1.1	Detektion der Verkehrsteilnehmer . . . . .	91
6.1.1.1	Genauigkeit der Einzelsensoren . . . . .	92
6.1.1.2	Genauigkeit des Fusionsalgorithmus . . . . .	96
6.1.2	Detektion der Straßenverhältnisse . . . . .	103
6.1.3	Fazit . . . . .	110
6.2	Validierung der Gesamtfunktionalität . . . . .	111
6.2.1	Messtechnische Bewertung der Schlechtwetterlichtfunktion . . . . .	111
6.2.2	Wahrnehmungsbasierte Bewertung der Schlechtwetterlichtfunktion	121
6.2.3	Fazit . . . . .	125
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>126</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	126

---

7.2 Ausblick . . . . .	128
<b>A Lichtstärkeverteilungen</b>	<b>144</b>
<b>B Kennlinien</b>	<b>145</b>
<b>C Matrix-Modul</b>	<b>146</b>
<b>D Ergänzungen zu Berechnungen und Messungen</b>	<b>148</b>
D.1 Quantifizierung der Wirksamkeit . . . . .	148
D.2 Analyse des relevanten Winkelbereiches . . . . .	148
D.3 Detektion der Straßenverhältnisse . . . . .	150
<b>E Ergänzungen zu den Probandenstudien</b>	<b>154</b>
E.1 Ergänzende Dokumente zur statischen Studie . . . . .	154
E.2 Histogramme zur statischen Probandenstudie . . . . .	160
E.3 Ergänzende Dokumente zur dynamischen Studie . . . . .	161
E.4 Histogramme zur dynamischen Probandenstudie . . . . .	168

---

## Abbildungsverzeichnis

---

1.1	Bei einer nassen Fahrbahn auftretende Blendkeulen durch die Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge . . . . .	2
1.2	Anzahl der Niederschlagstage für Hannover im Jahr 2013. Die Niederschlagsarten sind farblich voneinander abgegrenzt . . . . .	2
2.1	Darstellung verschiedener Reflexionsarten . . . . .	5
2.2	Vereinfachte Darstellung zur Veranschaulichung der Begriffe Vorwärts- und Rückwärtsreflexion . . . . .	6
2.3	Hydrologische Beschreibung des Abfließprozesses von Regenwasser auf Fahrbahnen . . . . .	8
2.5	Darstellung der dezentralen Fusionsarchitektur . . . . .	12
2.6	Darstellung der zentralen Fusionsarchitektur . . . . .	13
2.7	Versuchsaufbau von Damasky zur Messung der Vorwärtsreflexion bei nassen Fahrbahnoberflächen . . . . .	16
2.8	Leuchtdichtekoeffizientenverlauf bei einer nassen Fahrbahn für die Vorwärtsreflexion . . . . .	16
2.9	Vorschlag für eine Schlechtwetterlichtverteilung nach Damasky . . . . .	17
2.10	Adaptive Beleuchtungsstärke im Punkt $E_{10V}$ bei entgegenkommendem Verkehr auf einer nassen Fahrbahn . . . . .	18
2.11	Gemessene Leuchtdichte einer Blendkeule in Abhängigkeit der Position vor dem Blendfahrzeug für einen Begegnungsabstand von $d = 50$ m . . . .	20
2.12	Blendbeleuchtungsstärkeverlauf am Auge eines entgegenkommenden Fahrers in Abhängigkeit der Entfernung für eine trockene (1) und eine nasse Fahrbahn (2) . . . . .	20
2.13	Segmentierte Lichtverteilung zur Bewertung der Ausleuchtung unter Regenbedingungen . . . . .	21
2.14	Vorschlag einer Schlechtwetterlichtverteilung für einen Regenscheinwerfer nach Rosenhahn . . . . .	22
2.15	Gemessene Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Beregnungsdauer . . .	23

---

2.16	Für einen Abtrocknungsvorgang ermittelter Anteil der indirekten Blendbeleuchtungsstärke an der gesamt gemessenen Blendbeleuchtungsstärke . . .	23
2.17	Verlauf der Blendbeleuchtungsstärke für verschiedene Scheinwerfersysteme nach Hof . . . . .	24
2.18	Messschirm der ECE-Regelung 123 . . . . .	25
3.1	Geometrische Verhältnisse zur Bestimmung der korrespondierenden Winkel	33
3.2	Bewässerung einer Fahrbahn auf der Fahrtrainingsanlage des <i>ADAC Ostwestfalen-Lippe e.V.</i> . . . . .	35
3.3	Visualisierung der resultierenden Lichtverteilung als Straßendiagramm. Rot ist der ursprünglich angestrebte Entblendungsbereich dargestellt . . . .	36
3.4	Versuchsaufbau zur Quantifizierung der Wirksamkeit des Ansatzes. . . . .	37
3.5	Durch Reflexionen an einer abtrocknenden Fahrbahn erzeugte Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers in 50 m Entfernung, aufgetragen über der Zeit . . . . .	39
3.6	Versuchsaufbau zur Durchführung der Probandenstudie . . . . .	41
3.7	Histogramm zur Bewertung der Blendung aus dem Fahrzeug mit adaptivem System . . . . .	45
3.8	Histogramm zur Bewertung der Aussage „Bei widrigen Bedingungen fühle ich mich häufig von entgegenkommenden Fahrzeugen geblendet“ . . . .	46
3.9	Schematische Darstellung der geometrischen Zusammenhänge einer realen Begegnungssituation . . . . .	49
3.10	Spektrale Abhängigkeit des Reflexionsgrades von Asphalt unterschiedlichen Alters . . . . .	50
3.11	Form des abzdunkelnden Winkelbereiches bei Definition eines rechteckförmigen Blendbereiches, beispielhaft für den linken Scheinwerfer bei einem Begegnungsabstand von 10 m auf einer Geraden . . . . .	52
3.12	Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten eines Kurvenradiuses auf Landstraßen in Deutschland . . . . .	53
3.13	Verschiedene Begegnungsmöglichkeiten auf einer Fahrbahn bei festem Abstand zwischen den Fahrzeugen . . . . .	54
3.14	Ablauf des Algorithmus zur Bestimmung der vertikalen und horizontalen Winkel einer Lichtverteilung, die zu einer indirekten Blendung des Gegenverkehrs führen . . . . .	55

3.15	Relevanter Winkelbereich, in dem sich die Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfers verändern lassen muss . . . . .	57
3.16	Relevanter Winkelbereich, in dem sich die Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfers verändern lassen muss, dargestellt in Abhängigkeit des kürzest möglichen Begegnungsabstandes . . . . .	58
3.17	Häufigkeiten der relevanten Winkel, die in der Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfers abgeschattet werden müssen . . . . .	60
4.1	Vom Radarsensor ermittelte Breite für ein entgegenkommendes Objekt . . .	64
4.2	Die vom Kamerasensor ermittelten Abstandsinformationen über einen entgegenkommenden Pkw, aufgetragen über den tatsächlichen Begegnungsabstand . . . . .	66
4.3	Definition eines fahrzeugfesten KOS . . . . .	66
4.4	Bestimmung des korrigierten Fahrzeugmittelpunktes und der Fahrzeugbreite . . . . .	68
5.1	Für die dynamischen Studien ausgerüsteter Versuchsträger . . . . .	76
5.2	Grobkonzept des Sensorsystems zur Messung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn . . . . .	78
5.3	Mit dem Sensorsystem ausgerüstetes Versuchsfahrzeug . . . . .	78
5.4	Vom Lichtmodul unterhalb des Versuchsfahrzeuges erzeugtes Messlicht . .	79
5.5	Systemarchitektur des Sensorsystems . . . . .	79
5.6	Seitlicher Blick in das offene Lichtmodul . . . . .	81
5.7	Blick auf die Sensorschaltung bei noch offenem Gehäuse . . . . .	82
5.8	Rechteckimpuls und dessen Näherung durch die zugehörige Fourierreihe bis zum ersten Glied (Grundschwingung) . . . . .	83
5.9	Ergebnis des Lock-In-Verfahrens zur Kompensation künstlich eingebrachter Störungen . . . . .	84
5.10	Vergleich der Lichtverteilungen des originalen und des angepassten Scheinwerfermoduls . . . . .	85
5.11	Benötigter horizontaler Winkelbereich zur Entblendung der Windschutzscheibe eines entgegenkommenden Fahrzeuges auf einer Geraden, aufgetragen über dem Begegnungsabstand . . . . .	86
5.12	Durch die Blende erwirkte prozentuale Abschwächung der Lichtstärke . . .	87

5.13	Limitierung durch das eingesetzte Scheinwerfersystem für eine Begegnungssituation auf einer Geraden, betrachtet für den linken und den rechten Scheinwerfer . . . . .	88
5.14	Modulkiste mit zwei verschiedenen Scheinwerfersystemen . . . . .	89
6.1	Realisierung des Schlechtwetterlichtes mit dem entwickelten Prototyp . . .	90
6.2	Einfluss der Verzögerung der Daten des Kamerasensors auf dessen Genauigkeit am Beispiel des ermittelten Horizontalwinkels für ein Objekt . . . . .	92
6.3	Einfluss der Latenzzeit auf die Genauigkeit der Distanzmessung des verwendeten Radarsensors . . . . .	94
6.4	Vergleich der Genauigkeit des Kamera- und des Radarsensors am Beispiel des ermittelten Horizontalwinkels für ein Objekt . . . . .	95
6.5	Vom Radarsensor bereitgestellte Information über den lateralen Abstand zu einem entgegenkommenden Fahrzeug . . . . .	95
6.6	Ergebnis der Fusion von Kamera- und Radardaten am Beispiel des Horizontalwinkels zum Objektmittelpunkt . . . . .	97
6.7	Ergebnis der Fusion von Kamera- und Radardaten am Beispiel des lateralen Abstandes zum Objektmittelpunkt . . . . .	98
6.8	Einfluss der Fusion von Kamera- und Radardaten am Beispiel des Abstandes zum Objektmittelpunkt . . . . .	98
6.9	Im Fusionsprozess ermittelte Breite für ein entgegenkommendes Fahrzeug .	99
6.10	Vergleich zwischen der ermittelten und der vom Referenzsystem zur Verfügung gestellten Orientierung eines entgegenkommenden Fahrzeuges . . .	100
6.11	Schematische Darstellung der geometrischen Zusammenhänge bei der Transformation von Winkelinformationen in das Scheinwerfer-KOS . . . . .	103
6.12	Prozentualer Fehler des Rückwärtsreflexionssensors im Vergleich zum Referenzsystem . . . . .	104
6.13	Im Stand gemessene Vorwärtsreflexion für eine trockene und eine nasse Fahrbahnoberfläche . . . . .	105
6.14	Im Stand gemessene Rückwärtsreflexion für eine trockene und eine nasse Fahrbahnoberfläche . . . . .	106
6.15	Verhältnis zwischen Vorwärts- und Rückwärtsreflexion . . . . .	107
6.16	Messwerte des Vorwärtsreflexionssensors für eine Fahrt über die nasse Regenstrecke . . . . .	108

---

6.17	Beleuchtungsstärkeverläufe der Sensoren für eine Fahrt auf feuchter Fahrbahn; eine Unterführung war Bestandteil der Strecke . . . . .	109
6.18	Bewässerung der Regenstrecke aus Sicht des Fahrzeuges mit adaptivem Schlechtwetterlichtsystem . . . . .	112
6.19	Mit Beleuchtungsstärkemessgerät und Webcam ausgerüstetes Versuchsfahrzeug . . . . .	112
6.20	Beleuchtungsstärkeverlauf am Auge eines entgegenkommenden Fahrers für eine Begegnungssituation auf trockener Fahrbahn . . . . .	113
6.21	Deutliche Wahrnehmung des Entblendungsbereiches auf einer trockenen Fahrbahn . . . . .	114
6.22	Wahrnehmung unterschiedlicher Lichtfunktionen auf einer nassen Fahrbahn	115
6.23	Wahrnehmung der unterschiedlichen Lichtverteilungen auf nasser Fahrbahn aus Sicht des entgegenkommenden Fahrzeuges . . . . .	116
6.24	Zur durchgängigen Entblendung der Windschutzscheibe des entgegenkommenden Fahrzeuges notwendigen Winkelbereiche . . . . .	117
6.25	An der Augenposition eines entgegenkommenden Fahrers in Abhängigkeit des Begegnungsabstandes gemessene Beleuchtungsstärke für einen Passiervorgang auf nasser Fahrbahn . . . . .	118
6.26	Verlauf der Schwenkwinkel für beide Scheinwerfermodule, die während der Begegnungssituation eingestellt wurden . . . . .	119
6.27	Prozentuale Reduzierung der Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers durch das Schlechtwetterlicht, bezogen auf die Messwerte bei aktiviertem Abblendlicht . . . . .	120
A.1	Einfluss des OS-Fensters am Beispiel eines Halogen-Moduls . . . . .	144
A.2	Lichtstärkeverteilung des HKM mit zusätzlich eingebrachter Blende . . . . .	144
B.1	Kennlinie einer H7-Glühlampe 58520 der Fa. <i>General Electric</i> . . . . .	145
B.2	Kennlinie einer HB3-Glühlampe des Typs 9005 der Fa. <i>Osram Sylvania Inc.</i> . . . . .	145
C.1	Aufbau des Matrix-Moduls . . . . .	146
C.2	Bestückte Leiterplatte des Matrix-Moduls . . . . .	146
C.3	Abblendlichtverteilung des Matrix-Moduls . . . . .	147
C.4	Fernlichtverteilung des Matrix-Moduls . . . . .	147



---

C.5	Fernlichtverteilung mit drei ausgeschalteten Segmenten zur Realisierung der Funktion blendfreies Fernlicht . . . . .	147
D.1	Relevanter Winkelbereich, in dem sich die Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfers verändern lassen muss . . . . .	148
D.2	Häufigkeiten der relevanten Winkel, die in der Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfers abgeschattet werden müssen . . . . .	149
D.3	Prozentualer Fehler des Vorwärtsreflexionssensors im Vergleich zum Referenzsystem . . . . .	150
D.4	Fahrzeugniveau bei der Fahrt über die Regenstrecke . . . . .	150
D.5	Streckenverlauf für die Fahrt auf einer feuchten Fahrbahn . . . . .	151
D.6	Weg-Zeit-Diagramm für die zurückgelegte Strecke auf der feuchten Fahrbahn . . . . .	152
D.7	Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm für die zurückgelegte Strecke auf der feuchten Fahrbahn . . . . .	152
D.8	Verlauf der Beleuchtungsstärke bei der Fahrt über einen Parkplatz mit unterschiedlichen Asphaltarten . . . . .	153
E.1	Histogramm zur Bewertung der Aussage „Es ist mir wichtig, andere Fahrer bei widrigen Wetterbedingungen nicht zu blenden“ . . . . .	160
E.2	Histogramm zur Bewertung der Aussage „Ich würde mir ein solches System als Sonderzubehör kaufen, wenn es mein Budget erlaubt“ . . . . .	160
E.3	Histogramm zur Bewertung der Aussage „Bei widrigen Bedingungen fühle ich mich häufig von entgegenkommenden Fahrzeugen geblendet“ . . . . .	168
E.4	Histogramm zur Bewertung der Aussage „Es ist mir wichtig, andere Fahrer bei widrigen Wetterbedingungen nicht zu blenden“ . . . . .	168
E.5	Histogramm zur Bewertung der Aussage „Ich würde mir ein solches System als Sonderzubehör kaufen, wenn es mein Budget erlaubt“ . . . . .	168

---

## Tabellenverzeichnis

---

3.1	Ergebnisse der Beleuchtungsstärkemessungen für die verschiedenen Modulvarianten auf einer trockenen und einer nassen Fahrbahn . . . . .	38
3.2	Bewertung der eigenen Ausleuchtung (1: sehr schlecht, 5: sehr gut) . . . . .	44
3.3	Bewertung der psychologischen Blendung (1: unerträglich, 9: kaum merklich) . . . . .	45
3.4	Bewertung der Sichtverhältnisse (1: sehr schlecht, 5: sehr gut) . . . . .	46
3.5	Verwendete Parameter zur Berechnung der anzupassenden Winkelbereiche	56
4.1	Durch den Radarsensor generierte Beschreibung von Objekten . . . . .	64
4.2	Durch den Kamerasensor generierte Beschreibung von Objekten . . . . .	65
4.3	Generierte Umfeldbeschreibung bezüglich anderer Verkehrsteilnehmer . . .	73
4.4	Generierte Umfeldbeschreibung bezüglich der Straßenverhältnisse . . . . .	73
4.5	Generierte Umfeldbeschreibung bezüglich der Witterungsverhältnisse . . .	74
4.6	Generierte Umfeldbeschreibung bezüglich der Verkehrsinfrastruktur . . . .	75
4.7	Beschreibung des Fahrzeugzustandes . . . . .	75
6.1	Kennzahlen zur Beschreibung der Ähnlichkeit der Messsignale in Bezug auf das ADMA-Referenzsystem . . . . .	101
6.2	Ergebnisse der t-Tests zur Überprüfung, ob der Zeitpunkt der Bewässerung einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der Probanden hatte .	123
6.3	Bewertung der eigenen Ausleuchtung aus dem stehenden Fahrzeug (1: sehr schlecht, 5: sehr gut) . . . . .	123
6.4	Bewertung der psychologischen Blendung aus dem stehenden Fahrzeug (1: unerträglich, 9: kaum merklich) . . . . .	124
6.5	Bewertung der psychologischen Blendung aus dem fahrenden Fahrzeug (1: unerträglich, 9: kaum merklich) . . . . .	124
D.1	Ergebnisse der Beleuchtungsstärkemessung für die HB3-Modulvarianten auf einer trockenen und einer nassen Fahrbahn . . . . .	148

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

<b>ABS</b>	Antiblockiersystem
<b>ACC</b>	Adaptive Cruise Control
<b>ADMA</b>	Automotive Dynamic Motion Analyzer
<b>ADU</b>	Analog-Digital-Umsetzer
<b>AFS</b>	Adaptive Frontbeleuchtungssysteme
<b>BAS</b>	Bremsassistent
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>CCD</b>	Charge Coupled Device
<b>CMOS</b>	Complementary Metal Oxide Semiconductor
<b>CPU</b>	Central Processing Unit
<b>CV</b>	Constant Velocity
<b>DGPS</b>	Differential Global Positioning System
<b>ECE</b>	Economic Commission for Europe
<b>ESP</b>	Elektronisches Stabilitätsprogramm
<b>FAS</b>	Fahrerassistenzsystem
<b>FPI</b>	Fog Potential Index
<b>HDG</b>	Hell-Dunkel-Grenze
<b>HKM</b>	HELLA Konzern Modul
<b>IMM</b>	Interacting Multiple Model
<b>KOS</b>	Koordinatensystem
<b>Kfz</b>	Kraftfahrzeug
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>Lkw</b>	Lastkraftwagen
<b>NIR</b>	Nahinfrarot
<b>Pkw</b>	Personenkraftwagen
<b>PMD</b>	Photomischdetektor
<b>PWM</b>	Pulsweitenmodulation

<b>RQ</b>	Regelquerschnitt
<b>SAE</b>	Society of Automotive Engineers
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>ToF</b>	Time-of-Flight

---

# 1 Einleitung

---

## 1.1 Motivation

In modernen Automobilen wird der Fahrer durch eine Vielzahl elektronischer Helfer unterstützt, um die Fahrt für ihn angenehmer und vor allem sicherer zu gestalten. Bekannte Vertreter sind zum Beispiel das Antiblockiersystem (ABS), das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) und der Bremsassistent (BAS), deren Sicherheitspotenzial bereits in mehreren Studien nachgewiesen werden konnte [Gai+08, GDV11]. Da 90 % aller Unfallursachen auf menschliches Fehlverhalten zurückzuführen sind [Hüt13], ist die Unterstützung des Fahrers in Form von Fahrerassistenzfunktionen die richtige Konsequenz, um das Risiko menschlichen Fehlverhaltens zu minimieren.

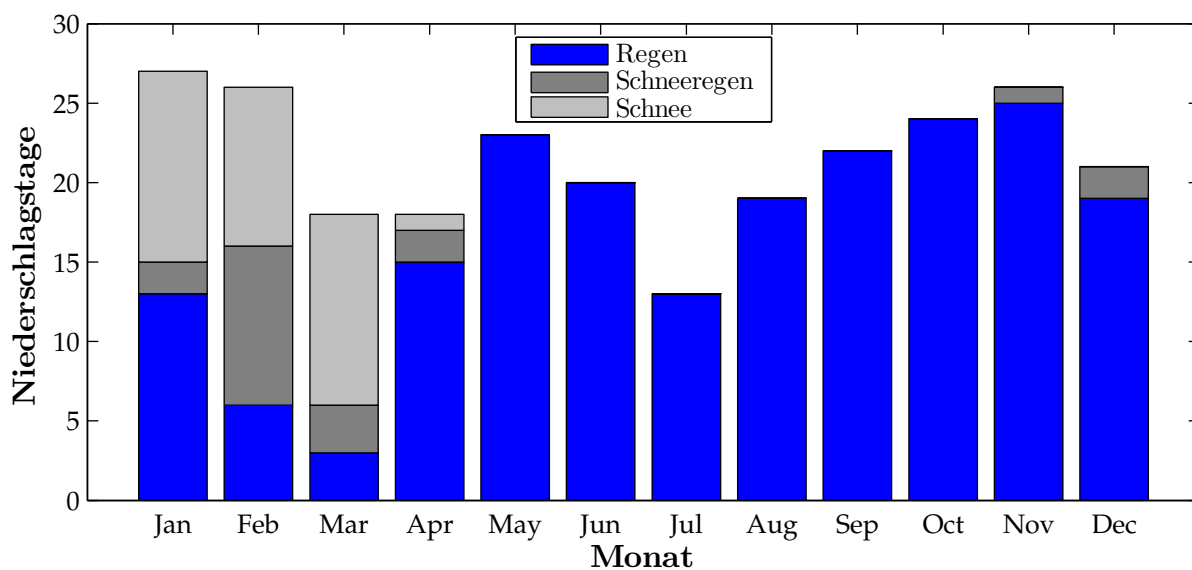
Eine besonders große Herausforderung stellt das Fahren bei Dunkelheit dar. Zusätzlich zu den „normalen“ Gefahren muss der Fahrer mit den stark eingeschränkten Sichtverhältnissen zurechtkommen. Zur Verbesserung der Sichtbedingungen nutzt der Fahrer seine Scheinwerfer. Ganz nach dem Sprichwort „des einen Freud, des anderen Leid“ kann jedoch der Einsatz der eigenen Scheinwerfer zu einer Blendung des Gegenverkehrs führen. Eine Erfahrung, die bereits viele Autofahrer machen mussten, denn laut einer Umfrage des Deutschen Verkehrssicherheitsrates fürchten sich bei Dunkelheit mit 63 % am meisten davor, durch andere geblendet zu werden [DVR08]. Widrige Witterungsverhältnisse können dieses Blendrisiko zusätzlich verstärken und somit zu prekären Situationen führen. Durch lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme, die situativ die Lichtverteilung an die Verhältnisse anpassen, kann eine wesentliche Verbesserung dieser Umstände erzielt werden.

Eine allbekannte Schlechtwettersituation, in der sich jeder Fahrberechtigte schon einmal befand, stellt eine nasse Fahrbahn dar. Durch die Nässe ändert sich das Reflexionsverhalten der Fahrbahn – je nasser diese ist, desto spiegelnder verhält sie sich. Unter diesen Bedingungen bilden sich sogenannte „Blendkeulen“ oder Reflexstreifen aus, die sich auf den Verbindungslinien zwischen jedweder Lichtquelle und dem Beobachter befinden. In Abbildung 1.1 ist dies am Beispiel von Scheinwerfern in einer nächtlichen Straßensituation verdeutlicht. Bei diesen Bedingungen fühlen sich viele Autofahrer unsicher und verstärkt durch den Gegenverkehr geblendet. Zudem kann es gerade innerorts zu sehr irritierenden und unübersichtlichen Bedingungen kommen, da man aufgrund der Spiegelungen im Prinzip jede Lichtquelle doppelt interpretieren muss. Auch wird mit zunehmendem Alter eine solche Situation als noch unangenehmer empfunden, da die Blendempfindlichkeit zunimmt und die Erholung von einer Blendung eine längere Zeit erfordert [HC96]. Es ist daher nachvollziehbar, dass sich viele eine verbesserte Ausleuchtung bei diesen Verhältnissen wünschen [Jeb+08].



**Abbildung 1.1:** Bei einer nassen Fahrbahn auftretende Blendkeulen durch die Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge [NTV13]

Dass man sich als Verkehrsteilnehmer widrigen Bedingungen nicht entziehen kann, verdeutlicht Abbildung 1.2. In diesem Diagramm ist die Anzahl der Niederschlagstage exemplarisch für Hannover über die einzelnen Monate des Jahres 2013 aufgetragen. Die Daten stammen von der Station des Deutschen Wetterdienstes [DWD13]. Insgesamt kam es an 257 Tagen zu Niederschlägen und somit auch zu einem mehr oder minder großen Einfluss auf die vorherrschenden Fahrbedingungen. Diese Daten sensibilisieren bereits dafür, wie häufig im Straßenverkehr mit Schlechtwetterbedingungen zu rechnen ist, obwohl in diese Statistik keinerlei Informationen über Nebel-, Taubildung oder ähnliche Wetterphänomene eingeflossen sind.



**Abbildung 1.2:** Anzahl der Niederschlagstage für Hannover im Jahr 2013. Die Niederschlagsarten sind farblich voneinander abgegrenzt

Je schlechter die Fahrbedingungen sind, desto höher ist das Risiko, in einen Unfall verwickelt zu werden. Für „Schönwettersituationen“ gibt es lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme in Form adaptiver Lichtfunktionen, die dem Fahrer eine möglichst gute Ausleuchtung bei einer möglichst geringen Blendung anderer Verkehrsteilnehmer bieten. Aber was ist mit den bereits angesprochenen Schlechtwettersituationen, wo doch der Nutzen wirkungsvoller Systeme um ein Vielfaches höher ist? Hier gibt es einen deutlichen Nachholbedarf, denn im Falle einer nassen Fahrbahn wird der größte Anteil des von den Scheinwerfern ausgesendeten Lichtes an der Fahrbahnoberfläche gerichtet nach vorne reflektiert und kann so zu einer starken, indirekten Blendung führen. Eine unangenehme und gefahrenträchtige Situation für jeden Fahrzeugführer, die es zu vermeiden gilt. Verbindliche Vorschriften zur Entschärfung derartiger Risiken existieren bisher nicht. Die gesetzlichen Regelungen fordern keine einzuhaltenden Grenzwerte zur Reduzierung einer indirekten Blendung bei Nässe, vielmehr wird zur Blendbewertung lediglich der direkte Strahlengang eines Scheinwerfers betrachtet. Hierfür werden photometrische Messungen mit einem Goniophotometer vorgenommen, bei denen zur Vermeidung von störendem Streulicht geeignete Abdeckungen eingesetzt werden müssen. Daher bleiben Umgebungseinflüsse, wie die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn, bei der Zulassung eines Scheinwerfers unberücksichtigt [ECE98, ECE112, ECE123].

Deshalb wird in dieser Arbeit ein adaptives Schlechtwetterlicht für nasse Fahrbahnen entwickelt. Ziel dieser Lichtfunktion ist es, ebendiese indirekte Blendung des Gegenverkehrs zu verhindern. Dies wird durch eine gezielte Abdunkelung der Lichtverteilung in den Bereichen erreicht, die aufgrund von Reflexionen zu einer Blendung führen. Der gewählte Lösungsansatz wird in Studien überprüft und anhand der Ergebnisse der Nutzen und die Wahrnehmung einer solchen Funktion herausgearbeitet. Wenn zukünftig das Gros der Fahrzeuge mit einer solchen Schlechtwetterlichtfunktion ausgestattet wird, ist der nächste Schritt auf dem Weg zur Verwirklichung der Vision einer stets blendfreien Fahrt getan und ein wichtiger Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit geleistet. Das ist die Hauptintension dieser Arbeit.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst auf den Stand des Wissens eingegangen. Hierfür werden zum Verständnis dieser Arbeit benötigte Grundlagen angeführt sowie der für diese Thematik relevante Stand der Technik dargelegt. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit der Abgrenzung zu vorangegangenen Arbeiten, um den neuen wissenschaftlichen Beitrag dieser Arbeit aufzuzeigen.

Eine grundlegende Betrachtung der Schlechtwetterlichtfunktion erfolgt in Abschnitt 3. Zunächst wird die Funktionsweise beschrieben und deren Wirksamkeit anhand von ersten Untersuchungen belegt. Anschließend werden Anforderungen an ein Gesamtsystem ausgearbeitet und definiert, mit dem eine Umsetzung der Lichtfunktion möglich ist.

Der Funktionsanalyse schließt sich das Kapitel 4 über die Umfelderkennung an. Hier wird erläutert, welche Daten welcher Sensoren zur Generierung der Umfeldbeschreibung herangezogen werden. Anschließend erfolgt in Kapitel 5 die Beschreibung des ausgerüsteten Versuchsfahrzeuges. Diese beinhaltet zum einen die verwendete Sensorik und zum anderen die für die Untersuchungen eingesetzten Scheinwerfersysteme. In diesem Zusammenhang wird auch auf den selbst entwickelten, neuartigen Sensor zur dynamischen Messung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn eingegangen.

In Kapitel 6 folgt die Darstellung der abschließenden Untersuchungen. Der Fokus liegt zunächst auf den Ergebnissen der einzelnen Sensoren, ehe der Mehrwert der Datenfusion aufgezeigt wird. Im Anschluss werden die Wirksamkeit und der Nutzen der adaptiven Schlechtwetterlichtfunktion auf Grundlage eines zweistufigen Evaluierungsverfahrens herausgestellt. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick für mögliche weiterführende Forschungsschwerpunkte ab.



---

## 2 Stand des Wissens

---

### 2.1 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zum besseren Verständnis dieser Arbeit benötigten Grundlagen vermittelt und um Verweise auf die entsprechende Standardliteratur für zusätzliche Informationen ergänzt. Außerdem werden einige Begriffe für ihren späteren Gebrauch in dieser Arbeit definiert.

#### 2.1.1 Reflexionsarten

Die Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn nehmen großen Einfluss auf die Wahrnehmungsbedingungen und bestimmen somit auch die Sicherheit und den Komfort im Straßenverkehr entscheidend mit. Im Folgenden wird deswegen auf verschiedene Reflexionsarten eingegangen. Die Ausführungen sind sinngemäß aus den Werken von [Bae96], [Gal04] und [Hen02] entnommen, in denen sich entsprechend weiterführende Informationen finden lassen.

##### 2.1.1.1 Spiegelnde und diffuse Reflexion

Grundsätzlich wird zwischen zwei verschiedenen Reflexionsarten unterschieden: der spiegelnden und der diffusen Reflexion. Äquivalent werden hier auch häufig die Begriffe gerichtete und ungerichtete Reflexion verwendet. Für die spiegelnde Reflexion gilt das Reflexionsgesetz *Eintrittswinkel gleich Austrittswinkel*, veranschaulicht in Abbildung 2.1a. Bei der diffusen Reflexion hingegen wird das Licht in den gesamten Halbraum reflektiert. Hier wird die Annahme getroffen, dass die Leuchtdichte unter allen Reflexionswinkeln identisch ist, wie in Abbildung 2.1b dargestellt. Da dieses Verhalten durch das Lambert-Gesetz definiert ist, spricht man in diesem Fall auch von einer Lambert'schen Reflexion.

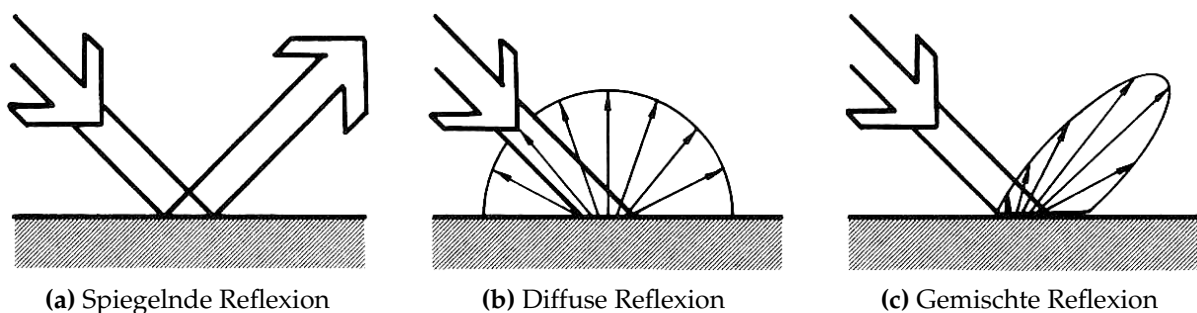


Abbildung 2.1: Darstellung verschiedener Reflexionsarten, angelehnt an [Hen02]

Bei den eben angesprochenen Reflexionsarten handelt es sich um idealisierte Spezialfälle, die in der Realität so nicht auftreten. Vielmehr liegen beide Arten simultan vor, sodass das Reflexionsverhalten durch die Überlagerung dieser beiden Arten bestimmt wird. Dies ist beispielhaft in Abbildung 2.1c illustriert. Die Anteile der beiden idealen Reflexionsarten hängen von der Beschaffenheit der Oberfläche ab, sodass sich je nach Oberflächenstruktur unterschiedliche Reflexionseigenschaften ergeben.

### 2.1.1.2 Vorwärts- und Rückwärtsreflexion

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine abstraktere Betrachtungsweise der Reflexionsarten verwendet. Hierbei wird das von den fahrzeugeigenen Scheinwerfern ausgesendete und an der Fahrbahnoberfläche reflektierte Licht in zwei „Arten“ zu unterteilen. Bei diesen handelt es sich zum einen um den zum Fahrer zurückreflektierten Anteil, die sogenannte Rückwärtsreflexion, und zum anderen um den nach vorne reflektierten Anteil, die sogenannte Vorwärtsreflexion, die von anderen Verkehrsteilnehmern, zum Beispiel einem entgegenkommenden Fahrer, wahrgenommen werden kann. Eine schematische Darstellung dieser Betrachtungsweise zeigt Abbildung 2.2.



**Abbildung 2.2:** Vereinfachte Darstellung zur Veranschaulichung der Begriffe Vorwärts- und Rückwärtsreflexion

## 2.1.2 Adaptation

Das menschliche Auge ist in der Lage, sich an unterschiedliche visuelle Bedingungen anzupassen. Neben der Akkommodation – eine Änderung der Brechkraft zur Anpassung an verschiedene Gegenstandsweiten – ist hier vor allem die Adaptation zu nennen. Hierunter versteht man die Anpassung an eine im Gesichtsfeld vorhandene mittlere Leuchtdichte. Damit ist das Auge in der Lage, einen großen Leuchtdichtebereich von  $10^{-6}$  cd/m<sup>2</sup> bis  $10^5$  cd/m<sup>2</sup> abzudecken [Bae96]. Je nach Richtung und Höhe einer Leuchtdichteänderung dauern Adaptationsvorgänge unterschiedlich lang. Eine Anpassung an ein helleres Beleuchtungsniveau erfolgt hierbei wesentlich schneller als im umgekehrten Fall [Hen02].

## 2.1.3 Blendung

Blendung ist ein „Sehzustand, der als unangenehm empfunden wird oder eine Herabsetzung der Sehfunktion zur Folge hat, verursacht durch eine ungünstige Leuchtdich-

teverteilung oder durch zu hohe Kontraste“ [DIN11, S. 8]. In dieser Definition werden bereits die beiden Blendungsarten, zwischen denen grundsätzlich unterschieden wird, angesprochen: die psychologische und die physiologische Blendung.

Unter der physiologischen Blendung (engl. disability glare) versteht man eine Beeinträchtigung der Sehleistung, also eine messbare, objektive Blendung. Die psychologische Blendung (engl. discomfort glare) ist auf eine nicht messbare Störempfindung zurückzuführen. Es handelt sich hierbei um ein subjektives Blendgefühl. Beide Arten sind unabhängig voneinander und können demnach sowohl einzeln als auch gleichzeitig auftreten.

Bezüglich der Adaptationsfähigkeit des menschlichen Auges ist zwischen zwei Blendungsmöglichkeiten zu unterscheiden [Hen02]:

**Absolutblendung** Das Leuchtdichteniveau im Gesichtsfeld ist so hoch, dass eine Blendung durch Adaptationsvorgänge nicht mehr aufgehoben werden kann.

**Relativblendung** Häufigste Form der Blendung. Sie tritt bei hohen Leuchtdichteunterschieden im Gesichtsfeld auf. In diesem Fall ist nur ein bestimmter Bereich der Netzhaut betroffen, die Blendung kann durch eine Adaptation des betroffenen Netzhautanteils (Lokaladaptation) nicht ausgeglichen werden. Lediglich durch eine Anhebung der mittleren Leuchtdichte wird eine Milderung erzielt.

Eine vor allem im nächtlichen Straßenverkehr häufig anzutreffende Blendung ist die transiente Blendung beziehungsweise transiente Adaptation [Hen02]. Hierbei muss das Auge wiederholt zwischen einem hohen und einem niedrigen Adaptationsniveau hin- und herwechseln. Diese Bedingungen ergeben sich beispielsweise bei Passiervorgängen.

Die Blendung durch eine Lichtquelle kann grundsätzlich auf direkte und/oder indirekte Weise erfolgen. Bei der direkten Blendung gelangt das Licht der Störquelle auf direktem Wege in das Auge eines Betrachters. Bei der indirekten Blendung hingegen erfolgt diese aufgrund von Reflexionen, zum Beispiel durch Reflexionen auf einer (nassen) Fahrbahn.

#### 2.1.4 Feuchtezustände einer Fahrbahn

Die unterschiedlichen Feuchtezustände einer Fahrbahn beeinflussen deren Reflexionsverhalten. Je nasser die Fahrbahn, desto höher ist die Vorwärtsreflexion und desto größer ist auch das Risiko, andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Die Ursachen für Feuchte auf Fahrbahnen sind vielfältig:

- „fallender tropfenförmiger Niederschlag (Regen)
- fallender gefrorener Niederschlag (Schnee)
- abgesetzter Niederschlag (Tau, Reif)“ [Eul+89, S. 2]

Der Feuchtezustand einer Fahrbahn ist von vielen Faktoren abhängig, die sich in fahrbahnspezifische, witterungsspezifische und Verkehrseinflüsse einteilen lassen. In [Eul+89] sind diese Einflüsse detailliert beschrieben.

Bei dem Abfluss von Regenwasser über versiegelte Oberflächen, zum Beispiel eine Fahrbahn, handelt es sich um Filmströmungen [EZ84]. Der zeitliche Verlauf einer solchen Filmströmung lässt sich unter Berücksichtigung der Hydrologie beschreiben. Für die Annahme einer konstanten Regenintensität kann der in Abbildung 2.3 dargestellte Ablaufprozess nach Zior [Zio87] in vier Phasen eingeteilt werden.

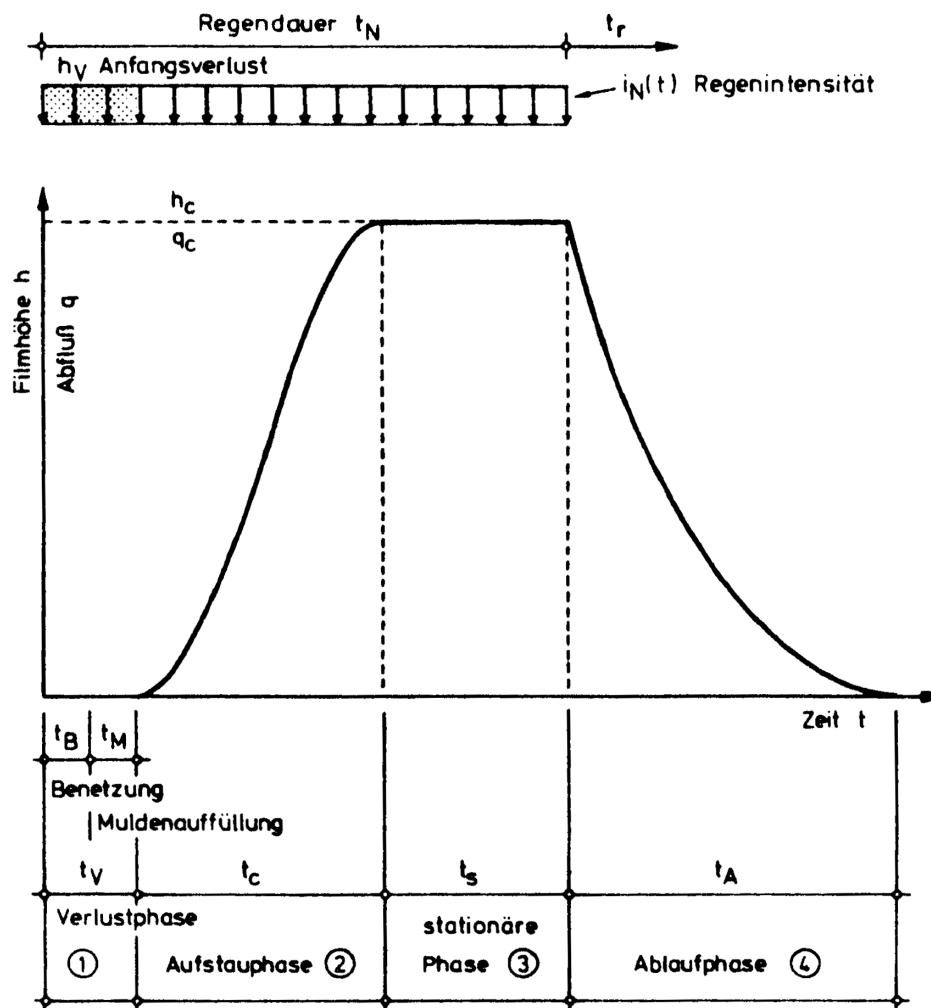
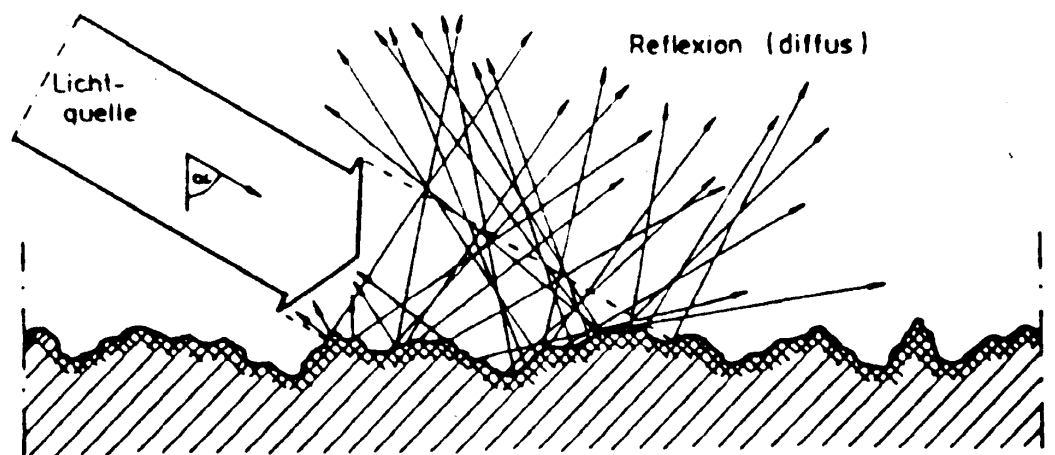


Abbildung 2.3: Hydrologische Beschreibung des Abfließprozesses von Regenwasser auf Fahrbahnen [Zio87]

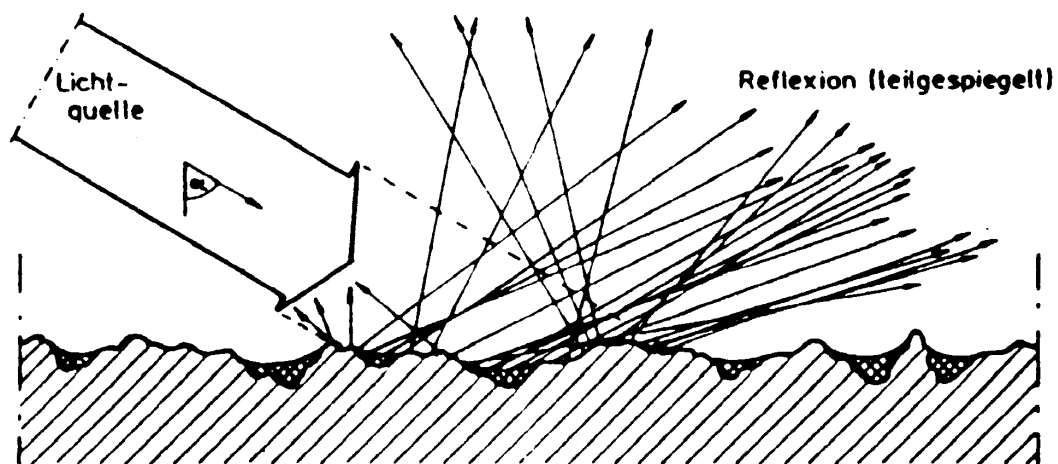
In der ersten Phase kommt es durch den beginnenden Niederschlag zunächst zu einer Benetzung der anfangs trockenen Fahrbahnoberfläche. Anschließend werden die Rauh-tiefen, auch Mulden genannt, mit Wasser aufgefüllt. In dieser Phase kommt es noch zu keinem Abfließverhalten, sodass diese Phase als Verlustphase bezeichnet wird. In der nachfolgenden Aufstauphase beginnt der Abfluss, da die bisherige Niederschlagsmenge diesen Anfangsverlust übersteigt. Mit anhaltendem Regen steigt sowohl die Abflussmenge als auch die Wasserfilmhöhe. In Phase 3 wird ein stationärer Strömungszustand er-

reicht. Hier sind Zu- und Abfluss im Gleichgewicht, die Wasserfilmhöhe bleibt konstant. Während der Ablaufphase verringert sich der Zufluss und die Wasserfilmhöhe nimmt wieder ab. Am Ende dieses Prozesses entspricht die übrig gebliebene Wassermenge der Verlustmenge aus der Verlustphase. Dieses restliche Wasser fließt nicht ab, sondern trocknet durch Verdunstung.

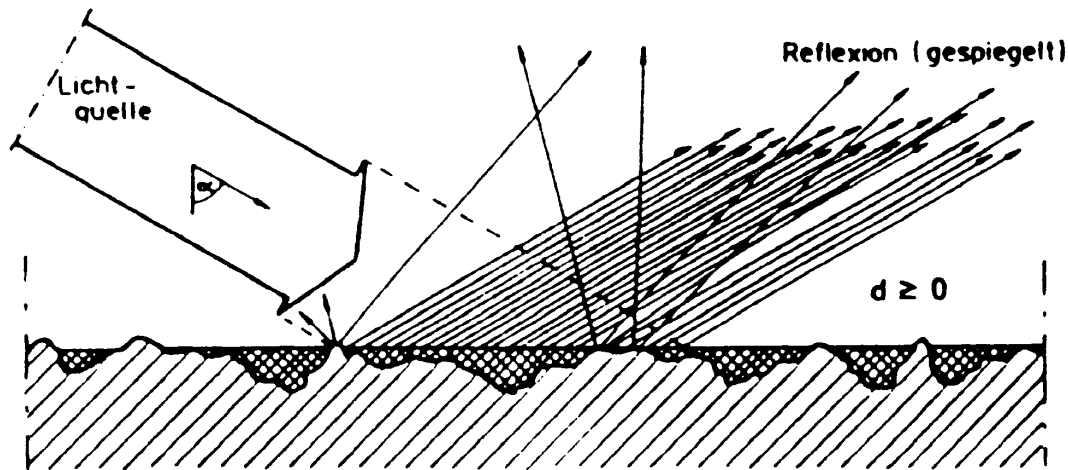
Eine weitere, naheliegende Beschreibungsmöglichkeit für den Straßenverkehr ist die Unterscheidung anhand von visuellen Merkmalen. Krebs und Böllinger [KB81] haben drei verschiedene Feuchtezustände definiert und visuelle Kriterien aufgestellt. Sie unterscheiden zwischen den Zuständen benetzt, feucht und nass. In Abbildung 2.4 sind diese und deren Einfluss auf das Reflexionsverhalten veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Feuchtegrad der Anteil der spiegelnden Reflexion zunimmt.



(a) Benetzte Fahrbahn



(b) Feuchte Fahrbahn



(c) Nasse Fahrbahn

**Abbildung 2.4:** Feuchtezustände nach Krebs und Böllinger und deren Einfluss auf das Reflexionsverhalten [KB81]

Die beiden Betrachtungsweisen von Zior sowie Krebs und Böllinger können ineinander überführt werden. Die Zustände benetzt und feucht lassen sich der Verlustphase zuordnen, der Zustand nass gilt während der Aufstau-, der stationären und der Ablaufphase.

### 2.1.5 Sensor-/Informationsfusion

In einem aus heutiger Sicht modernen Kraftfahrzeug (Kfz) ist eine Vielzahl an Sensoren verbaut. Beschränkt man sich auf umfelderfassende Sensorik, so wird diese unter anderem in Fahrerassistenzsystemen (FAS) zur Erhöhung der Sicherheit und/oder des Komforts eingesetzt. Viele dieser FAS basieren auf einem einzelnen Sensor beziehungsweise jeder Sensor dient einer einzelnen Funktion. Dadurch müssen bei solchen Assistenzfunktionen Einschränkungen durch die verwendete Sensortechnologie in Kauf genommen werden: So ist beispielsweise beim radarbasierten Adaptive Cruise Control (ACC) die laterale Auflösung des Sensors sehr gering, sodass – bedingt durch die fehlende Fahrspurerkennung bei der Auswahl relevanter Objekte – Störungen von Fahrzeugen auf Nebenspuren auftreten können [Dar12]. Dieser Nachteil kann durch die Verwendung eines weiteren Sensors, zum Beispiel einer Kamera, kompensiert werden, da in diesem Fall mithilfe der Bildverarbeitung eine Fahrspurzuordnung erfolgen kann.

Durch die Fusion der Daten heterogener Sensoren können deren individuelle Stärken vorteilhaft kombiniert und deren Schwächen neutralisiert werden. Grundsätzlich erhält man dank der Fusion verschiedener Sensoren präzisere oder neue Kenntnisse über physikalische Größen, Ereignisse und Situationen [RL07]. Aus den so gewonnenen Informationen kann ein Umfeldmodell erzeugt beziehungsweise aktualisiert werden, aus dem einzelne Fahrerassistenzsysteme die benötigten Daten beziehen können.

Eine Definition des Prozesses der Datenfusion lautet:

„Data fusion is the process of combining data or information to estimate or predict entity states.“ [SBW99, S. 431]

Unter entity (Entität) wird hier ein abstraktes Objekt verstanden. Ein anschauliches Beispiel in der Fahrerassistenz ist ein anderer Verkehrsteilnehmer, dem wichtige Informationen zugeordnet werden müssen. Bei diesen Informationen kann es sich zum Beispiel um die Geschwindigkeit, die Position oder die räumliche Ausdehnung handeln.

In den folgenden Ausführungen wird davon ausgegangen, dass die Fusion zur verbesserten Beschreibung des Fahrzeugumfeldes hinsichtlich der vorhandenen Objekte eingesetzt wird. Dafür müssen eine Objektdetektion, eine -klassifizierung und eine -verfolgung (tracking) vorgenommen werden.

### 2.1.5.1 Sensorintegration

Um Synergieeffekte mehrerer Sensoren gewinnbringend nutzen zu können, ist eine geeignete Auswahl der zu verwendenden Sensoren zu treffen. Bei einem Multi-Sensor-System ergeben sich verschiedene Integrationsmöglichkeiten der einzelnen Sensoren [Dar12, RL07]:

**Konkurrierende Integration:** Es werden gleichartige Sensoren eingesetzt, die redundante Informationen liefern. Diese Integrationsart wird gewählt, um Unsicherheiten zu reduzieren und den Rauschabstand (SNR) zu erhöhen. Gleichzeitig kann die Verfügbarkeit des Systems erhöht werden, da der Ausfall einzelner Sensoren kompensiert werden kann.

**Komplementäre Integration:** Auch bei der komplementären Integration werden gleichartige Sensoren verwendet, die diesmal allerdings unterschiedliche Daten liefern, um Informationslücken zu schließen. Ein Beispiel dieser Integration ist die Kombination von Sensoren mit unterschiedlichen Mess- beziehungsweise Sichtbereichen.

**Kooperative Integration:** Hier müssen sämtliche Messdaten der Sensoren interpretiert werden, um durch die Kombination der Daten auf die gewünschte Messgröße schließen zu können. Diese Art der Integration liegt beispielsweise vor, wenn aus Stereobildpaaren eine Tiefenkarte berechnet wird.

### 2.1.5.2 Abstraktionsebenen

Die eigentliche Datenfusion kann auf mehreren Ebenen erfolgen [Dar07, RL07]:

**Rohdatenebene:** Diese Ebene wird auch Signalebene genannt. Es werden die Signale der Einzelsensoren direkt miteinander fusioniert, wofür eine Registrierung und Synchronisierung der Daten erforderlich ist. Der größte Nachteil dieser Abstraktionsebene ist das hohe Datenaufkommen zwischen Sensoren und „Fusionseinheiten“.

**Objektebene:** Um das hohe Datenaufkommen zu reduzieren, kann die Fusion auf Objektebene, auch Entscheidungsebene oder Symbolebene genannt, erfolgen. In diesem Fall werden die Daten bereits von der jeweiligen Sensoreinheit vorverarbeitet und eine Objektdiskriminierung, das heißt die Detektion und Klassifizierung, vorgenommen. Durch das „Treffen“ von Entscheidungen direkt am Sensor wird ein hohes Abstraktionsniveau erreicht, durch das gleichzeitig eine hohe Modularität möglich wird. Allerdings muss für den Fusionsprozess ein hoher Informationsverlust in Kauf genommen werden und es ist mit einem erhöhten Risiko von Fehlinterpretationen bei den einzelnen Sensoren zu rechnen.

**Merkmalsebene:** Die Merkmalsebene ist ein Kompromiss zwischen den beiden vorher genannten Ebenen. Es wird also keine endgültige Entscheidung in der Sensoreinheit getroffen, sondern es werden lediglich Merkmale aus den Daten extrahiert. Bei Merkmalen kann es sich zum Beispiel im Falle von Bildverarbeitung um Kanten oder Ecken handeln. Die Objektdiskriminierung wird anschließend auf Basis der Merkmale aller Sensoren durchgeführt, sodass eine Fehlinterpretation aufgrund unzureichender Informationen oder falscher Annahmen am Einzelsensor verhindert werden kann.

Die Wahl der Abstraktionsebene bestimmt folglich das Datenaufkommen zwischen Sensoren und Fusionseinheiten sowie die Komplexität des Fusionsalgorithmus.

### 2.1.5.3 Fusionsarchitekturen

In der Literatur wird grundsätzlich zwischen zwei Architekturmustern unterschieden: der dezentralen und der zentralen Architektur. Darüber hinaus sind auch Mischformen der beiden Architekturen möglich, zusammenfassend als hybride Architektur bezeichnet [RL07]. Die folgenden Ausführungen sind sinngemäß entnommen aus [Dar07].

#### Dezentrale Fusionsarchitektur

Bei der dezentralen Fusion existieren mehrere lokale Entscheidungszentren. Alle Einzelsensoren führen jeweils unabhängig voneinander eine Objektdiskriminierung und eine Track-Schätzung durch, vergleiche Abbildung 2.5. Hieraus folgt, dass eine dezentrale Fusion nur auf der Objektebene durchgeführt werden kann.

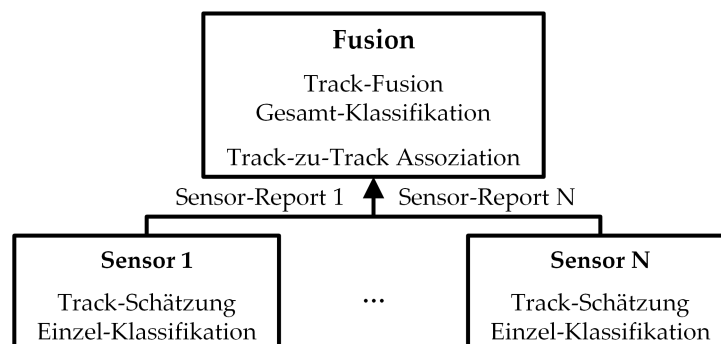


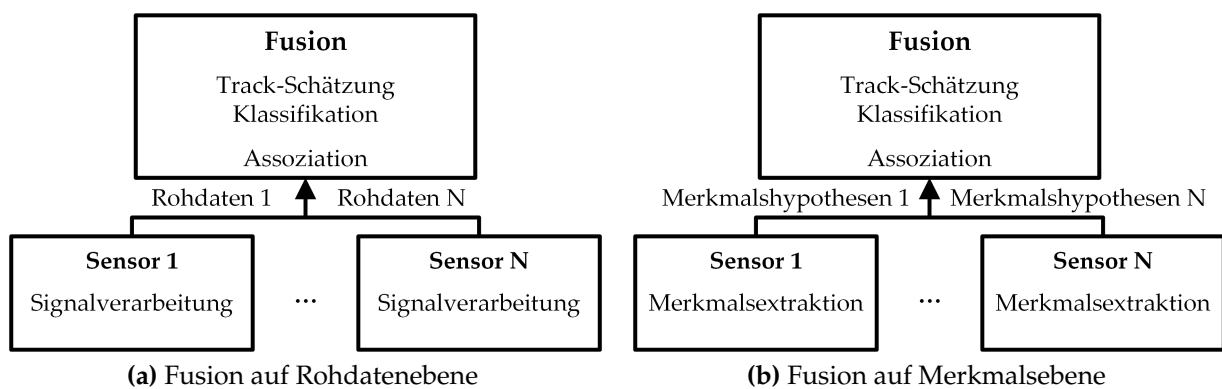
Abbildung 2.5: Darstellung der dezentralen Fusionsarchitektur nach [Dar07]



Für die Objektdiskriminierung ist diese Form der Architektur optimal, wenn orthogonale Sensoren eingesetzt werden. Unter orthogonalen Sensoren sind Sensoren zu verstehen, die hinsichtlich einer Operation unabhängig voneinander sind. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn unterschiedliche physikalische Prinzipien zur Objektdiskriminierung eingesetzt werden, „die keine Fehlerkennung aufgrund der gleichen Phänomene auslösen“ [Dar07, S. 16].

### Zentrale Fusionsarchitektur

Bei der zentralen Fusionsarchitektur gibt es im Gegensatz zur dezentralen nur ein Entscheidungszentrum, siehe auch Abbildung 2.6. Die Daten werden hier nur geringfügig vorverarbeitet, die eigentliche Objektdiskriminierung erfolgt im zentralen Fusionsbaustein. Aus diesem Grund können als Abstraktionsebene nur die Rohdaten- und die Merkmalsebene (siehe auch Abschnitt 2.1.5.2) gewählt werden.



**Abbildung 2.6:** Darstellung der zentralen Fusionsarchitektur nach [Dar07]

Diese Architektur ist in Bezug auf die Objektdiskriminierung der dezentralen zu bevorzugen, wenn die eingesetzten Sensoren nicht orthogonal zueinander sind. Im Falle einer Orthogonalität werden die gleichen Ergebnisse wie mit der dezentralen Architektur erzielt.

Bedingt durch ein einziges Entscheidungszentrum ist diese Architektur nur mit hohem Aufwand erweiterbar. Bei der Hinzunahme weiterer Sensoren müssen jedes Mal die Struktur und der Fusionsalgorithmus im zentralen Baustein modifiziert werden. Des Weiteren liegt aufgrund der eingeschränkten Wahl der Abstraktionsebene ein höheres Datenaufkommen als beim dezentralen Pendant vor.

### Hybride Fusionsarchitektur

Jegliche Kombination aus dezentraler und zentraler Architektur wird als hybride Fusionsarchitektur bezeichnet. Die Fusion erfolgt daher in der Regel auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen.

#### 2.1.5.4 Sensordatenverarbeitung

Bei einem Mehrsensorsystem müssen die Informationen der Einzelsensoren auf einen gemeinsamen Nenner gebracht werden. Die einzelnen Sensoren befinden sich an unterschiedlichen Einbauorten und können verschiedene „Blickwinkel“ haben. Aus diesen Gründen ist eine Überführung in ein einheitliches Koordinatensystem, die sogenannte Registrierung, notwendig. Bei Fehljustagen besteht hier die Möglichkeit, dass die Daten der einzelnen Sensoren einander nicht zugeordnet werden können oder systematische Fehler die Qualität der Zustandsschätzung herabsetzen [Dar12]. Des Weiteren ist der Zeitpunkt der Datenerfassung von entscheidender Bedeutung. Für eine zeitliche Zuordnung ist eine Synchronisation der Sensordaten erforderlich.

Die letztendlich aus den Daten generierten Objekthypothesen werden im System hinterlegt. Bei der Assoziation wird geprüft, ob die aus einem späteren Erfassungsschritt neu gewonnenen Daten bereits existenten Objekthypothesen zugeordnet werden können. Ist dies nicht möglich, werden neue Objekthypothesen erzeugt. Dieser Prozess nimmt wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Schätzung [Dar07].

Mit der Datenassoziation muss auch eine Objekthypothesenverwaltung einhergehen. Hier werden neue Objekthypothesen erzeugt, weiterhin gültige Hypothesen beibehalten und veraltete oder für die vorliegende Situation irrelevante Hypothesen wieder entfernt.

Einem Objekt zugewiesene Merkmals-hypothesen werden meist von einem Filter weiterverarbeitet, um die vorliegenden Informationen zu verbessern oder auch aus den gemessenen Daten neue Informationen zu erhalten. Die in dem Anwendungsfall Fahrerassistenz eingesetzten Schätzer dienen zum Beispiel zur Trennung von Nutz- und Störsignal sowie zur Schätzung (Rekonstruktion) von Zustandsgrößen, die nicht direkt gemessen werden können [Dar07, Lun08]. Detaillierte Informationen über übliche Schätzalgorithmen sind beispielsweise bei Bar-Shalom und Li [BL95], Challa et al. [Cha+11] oder Klaus [Kla99] nachzuschlagen. Unter Umständen kann es sinnvoll sein, mehrere Schätzalgorithmen mit unterschiedlichen Bewegungsmodellen parallel zu verwenden, um zum Beispiel die Güte der Schätzung bei häufig wechselnden Fahrmanövern zu erhöhen. In diesem Fall können Multi-Modell-Schätzfilter wie das Interacting Multiple Model Filter (IMM-Filter) eingesetzt werden, siehe auch [Cha+11].

Beide Verarbeitungsschritte, also die Datenassoziation und die Datenfilterung (Schätzung), werden unter dem Begriff Objekttracking oder Objektverfolgung zusammengefasst.

#### 2.1.5.5 Umfeldmodellierung

Es existieren zwei grundlegende Verfahren zur Modellierung des Fahrzeugumfelds: das kartenbasierte und das objektbasierte Umfeldmodell.

Das kartenbasierte Umfeldmodell wird vor allem in der Robotik zur Bahnplanung verwendet. Bei diesem Verfahren wird das Umfeld des Fahrzeuges in einer digitalen Umfeld-

karte beschrieben. Das Umfeld selbst wird dabei in gleichmäßige Zellen eingeteilt, denen Informationen über den zu repräsentierenden Umfeldbereich zugewiesen werden. Eine mögliche Implementierung dieses Verfahrens ist das sogenannte Belegungsgitter (engl. Occupancy Grid) [Elf90]. Für die einzelnen Zellen wird zur Abbildung des Umfeldes ein binärer Merkmalsraum verwendet, der nur die beiden Zustände frei und belegt beinhaltet.

Für Fahrerassistenzsysteme ist das objektbasierte Umfeldmodell Mittel der Wahl. Hier wird das Umfeld durch die Beschreibung einzelner Objekte abstrahiert. Es werden einzelne Klassen im Umfeldmodell definiert, denen die detektierten Objekte zugeordnet werden. Die einzelnen Objekte werden durch ein Objektmodell beschrieben, in dem zum Beispiel Eigenschaften und Zustände berücksichtigt werden. Die Komplexität des Umfeldmodells wird maßgeblich durch die Dimensionen der Zustandsvektoren beeinflusst [Eff09].

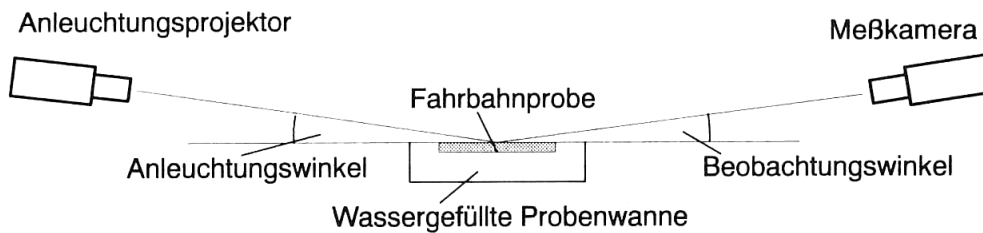
## 2.2 Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird ein Überblick zu bisherigen Forschungsarbeiten zum Thema Schlechtwettersituationen und Schlechtwetterlichtverteilungen gegeben. Darüber hinaus erfolgt eine Darstellung der für diese Arbeit in Betracht zu ziehenden Umfeldsensorik. Abschließend wird auf die Thematik der Sensorfusion eingegangen, mit deren Hilfe aus den Daten der Einzelsensoren eine Beschreibung des Fahrzeugumfelds generiert werden kann.

### 2.2.1 Untersuchungen zu Schlechtwettersituationen

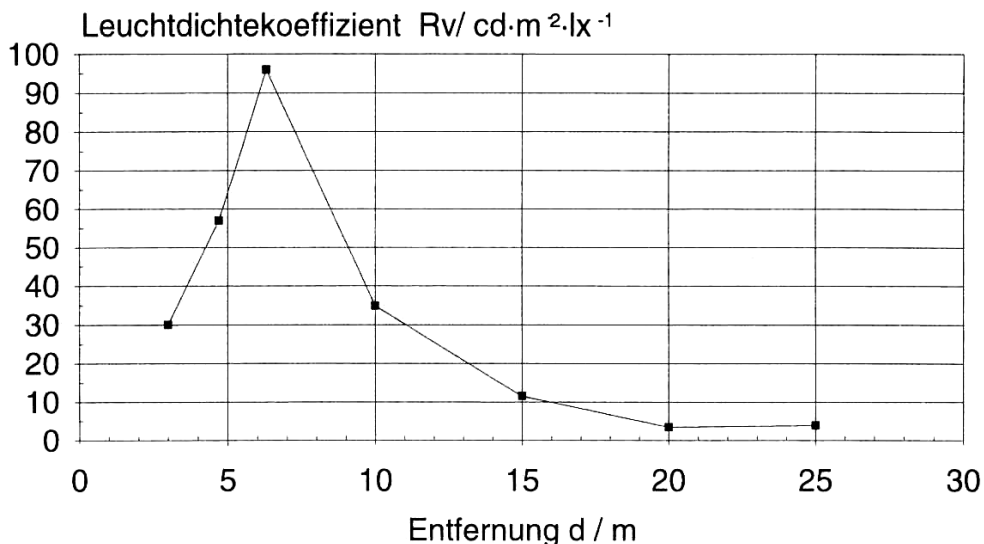
Damasky [Dam95] beschäftigte sich mit der Optimierung der Lichtverteilung für verschiedene Verkehrssituationen. Dabei wurden Empfehlungen für Lichtverteilungen in unterschiedlichen Situationen erarbeitet: Stadtlicht, Landstraßenlicht, Autobahnlicht, Fernlicht und Schlechtwetterlicht. Von Interesse sind hier die Untersuchungen zum Schlechtwetterlicht, wobei Damasky die Witterungseinflüsse Nässe und Nebel betrachtet hat. Auf eine Darstellung der Ergebnisse zu den Nebeluntersuchungen wird an dieser Stelle verzichtet, da sie für diese Arbeit nicht relevant sind. Zur Evaluierung des Einflusses von Nässe wurden Laborversuche durchgeführt, deren Messaufbau prinzipiell in Abbildung 2.7 skizziert ist. Mit diesem Messaufbau wurde die Vorwärtsreflexion einer nassen Straßenprobe für verschiedene Begegnungssituationen ermittelt. Um die Geometrien für verschiedene Begegnungsabstände nachzubilden, konnten Diaprojektor und Leuchtdichtkamera in Höhe und Abstand zur Probe variiert werden. Zur Verkürzung der benötigten Entfernungen wurde die Messkamera abweichend von der Prinzipskizze ebenfalls auf der Seite des Projektors positioniert. Die Messung der Vorwärtsreflexion erfolgte durch einen justierbaren Spiegel. Als besonders problematisch haben sich hierbei

die Reproduzierbarkeit der Anleuchtungs- und Beobachtungswinkel sowie die Einhaltung der exakten Wasserstandshöhe erwiesen.



**Abbildung 2.7:** Versuchsaufbau von Damasky zur Messung der Vorwärtsreflexion bei nassen Fahrbahnoberflächen [Dam95]

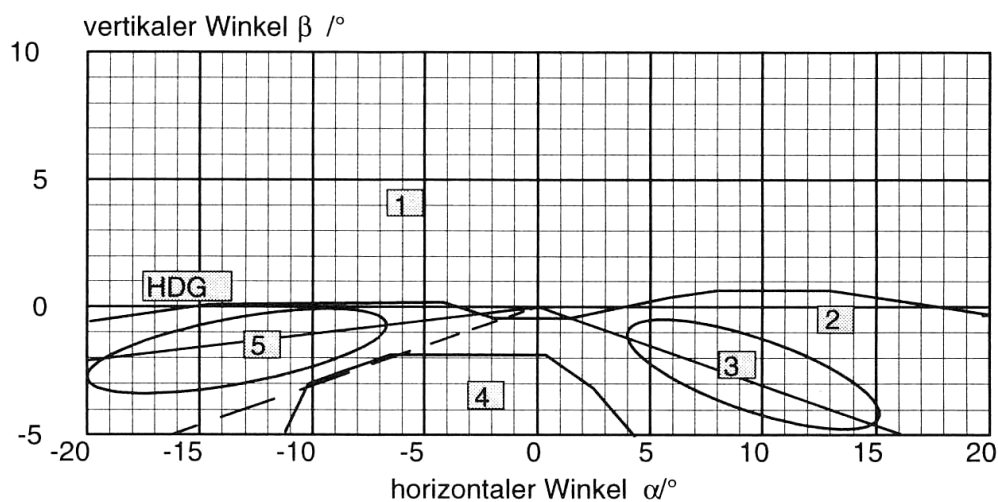
Die Ergebnisse einer beispielhaften Messung für einen nachgebildeten Abstand von  $d = 30\text{ m}$  zwischen Anleuchtung und Beobachter sind in Form des Leuchtdichtekoeffizientenverlaufes in Abbildung 2.8 dargestellt. Der Leuchtdichtekoeffizient  $R_v$  ist hier der Quotient aus der Leuchtdichte  $L$  der Fahrbahnoberfläche und der orthogonal zur Lichteinfallrichtung gemessenen Beleuchtungsstärke  $E_{\perp}$  in Probenebene. Aus diesem Verlauf ist ersichtlich, dass der maximale Leuchtdichtekoeffizient circa  $6,5\text{ m}$  vor der Anleuchtung auftritt. Damit ist das gemessene Maximum im Vergleich zum über das Reflexionsgesetz „Anleuchtungswinkel gleich Beobachtungswinkel“ berechneten, das circa  $10\text{ m}$  vor der Anleuchtung liegt, etwas näher zur Anleuchtung hin verschoben. Damasky merkt allerdings kritisch an, dass die exakte Bestimmung des Reflexionsmaximums mit diesem Aufbau nicht möglich war.



**Abbildung 2.8:** Leuchtdichtekoeffizientenverlauf bei einer nassen Fahrbahn für die Vorwärtsreflexion (Begegnungsabstand  $d = 30\text{ m}$ ) [Dam95]

Aus den durchgeführten Untersuchungen schlussfolgert Damasky, dass die erhöhte Vorwärtsreflexion einer nassen Fahrbahn zu einer verstärkten Blendung entgegenkommender Fahrer führt. Das Maximum der Vorwärtsreflexion ist dabei meist dichter zum Blend-

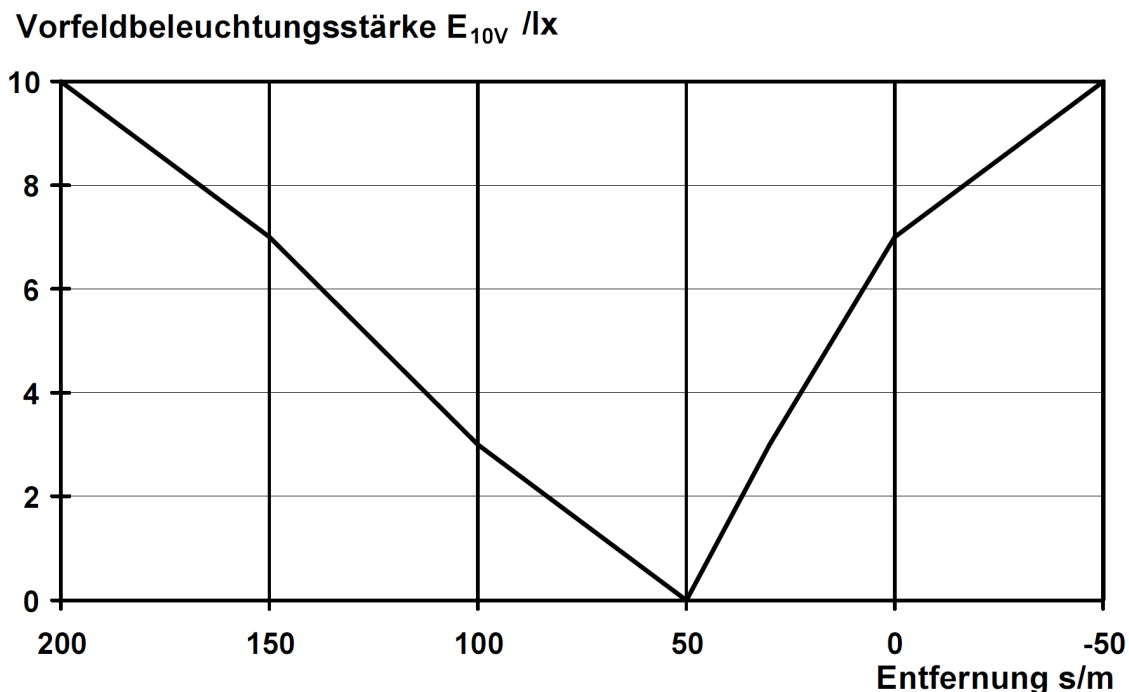
fahrzeug hin gelegen. Durch die gleichzeitig verringerte Rückwärtsreflexion sinkt das Adaptationsniveau des Fahrers, wodurch die Blendung zusätzlich ansteigt, da diese in einem direkten Zusammenhang zu der Vorfeldleuchtdichte steht. Bei einer nassen Fahrbahn soll demnach zur Reduzierung der Blendung entgegenkommender Fahrer die Beleuchtungsstärke im Reflexblendbereich reduziert werden. Dies ist möglich, da diese Bereiche „für die Orientierung eine untergeordnete Rolle spielen“ [Dam95, S. 114]. Gleichzeitig gilt es, in anderen Bereichen eine Mindestleuchtdichte zu erreichen, um durch die damit verbundene Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte die Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge zu reduzieren. Auf Basis dieser Überlegungen zum Einfluss von nassen Fahrbahnen und weiterer Untersuchungen zu Nebelsituation hat Damasky die in Abbildung 2.9 gezeigte Schlechtwetterlichtverteilung erarbeitet.



**Abbildung 2.9:** Vorschlag für eine Schlechtwetterlichtverteilung nach Damasky [Dam95]

Bereich 1 entspricht dem Blend- und Eigenblendbereich, der gleichmäßig mit einer Beleuchtungsstärke von  $E < 0,3 \text{ lx}$  auszuleuchten sei. Das Vorfeld (Bereich 2) soll mit  $5 \text{ lx} < E < 25 \text{ lx}$  beleuchtet werden, um eine gleichmäßige Leuchtdichte zu erreichen. Zur Führung des Fahrers falle die Ausleuchtung der Fahrbahnmarkierungen und Leiteinrichtungen durch Bereich 3 mit  $E > 30 \text{ lx}$  stärker aus. Auf der linken Seite ist diese im Bereich 5 mit  $E > 10 \text{ lx}$  bewusst kleiner gehalten, da der Fahrer sich bei Blendung an der rechten Seite orientieren soll, um durch die erhöhte Adaptationsleuchtdichte das Blendgefühl zu verringern. In Bereich 4 sei die Beleuchtungsstärke auf  $E < 5 \text{ lx}$  zu begrenzen, wobei diese in Richtung des Fahrzeuges abzufallen habe. Dieser Bereich soll die Vorwärtsreflexion reduzieren. Alle genannten Beleuchtungsstärkewerte entsprechen den Messwerten auf einer 25 m entfernten Messwand.

Huhn [Huh99] beschäftigte sich mit den Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kfz-Scheinwerfer. Auch er untersuchte den Einfluss einer nassen Fahrbahn auf die Blendung eines entgegenkommenden Fahrers. Dafür führte er Versuche in einem Lichtkanal durch, der 48 m lang und 11 m breit ist. Bei dem Straßenbelag handelte es sich um Gussasphalt der Klasse R2. Die Besonderheit des Lichtkanals ist, dass dieser auf einer Länge von 35 m beregnet werden kann. Für die Versuche wurde eine Regenstärke von  $RS = 401 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  gewählt, die einem starken Schauer entsprechen soll. Die Messungen wurden bei anhaltender Beregnung durchgeführt. In den Ergebnissen spiegelt sich der Einfluss der aufschlagenden Regentropfen wieder, die im Vergleich zu Messungen bei einer nassen Fahrbahn ohne Beregnung (vergleiche [Ros99b]) geringer ausfallen, da durch die zusätzlich erzeugte Bewegung eine größere Streuung bewirkt werde. Huhn ermittelte in diesen Versuchen eine indirekte, das heißt eine ausschließlich über Reflexionen erzeugte Blendbeleuchtungsstärke von  $E = 0,31 \text{ lx}$  bei einer Messentfernung von  $d = 43 \text{ m}$ , was normiert auf eine Messentfernung von  $d = 25 \text{ m}$  der Beleuchtungsstärke  $E = 0,93 \text{ lx}$  entspricht. Der Vergleich mit den Messwerten für eine trockene Fahrbahn zeigt, dass die Beleuchtungsstärke durch den Einfluss der Nässe um einen Faktor vier bis fünf höher ausfallen kann. Huhn kommt zu dem Schluss, dass eine optimale Vorfeldausleuchtung für eine nasse Fahrbahn von der Leuchtdichte in 10 m vor dem Fahrzeug abhängt. Zu diesem Zweck erweiterte er die bestehende Messgeometrie der Economic Commission for Europe (ECE) um den neuen Messpunkt 10V, der circa bei dem horizontalen Winkel  $\alpha = 0,05^\circ$  und dem vertikalen Winkel  $\beta = -4,2^\circ$  auf dem Messschirm definiert ist. Er schlägt bei Gegenverkehr eine entfernungsabhängige Anpassung der Beleuchtungsstärke im Punkt 10V vor, wie in Abbildung 2.10 gezeigt.

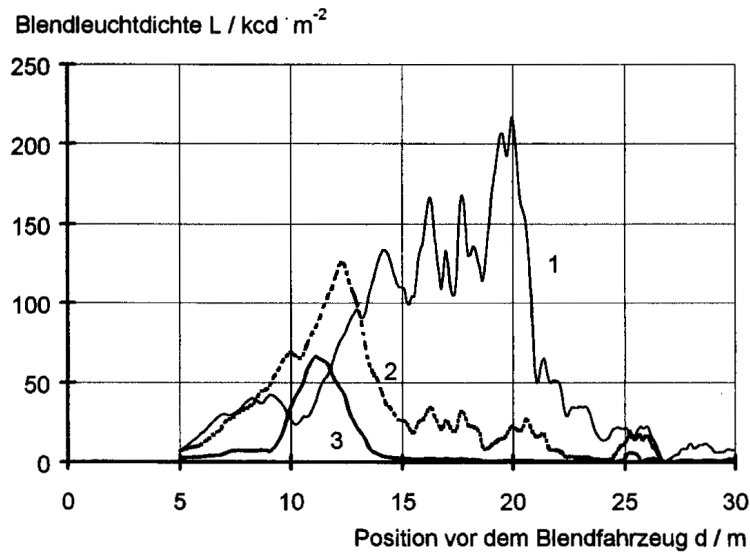


**Abbildung 2.10:** Adaptive Beleuchtungsstärke im Punkt  $E_{10V}$  bei entgegenkommendem Verkehr auf einer nassen Fahrbahn [Huh99]

Zur Detektion der nassen Fahrbahn sei die Information über den Scheibenwischerzustand ausreichend, dies könne aber durch akustische Sensoren im Radkasten, die aufschlagende Wassertropfen detektieren, ergänzt werden. Die Erkennung potenziellen Gegenverkehrs soll über ein Objektiv erfolgen, „das den kritischen Bereich in Richtung der Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge in  $d = 50$  m Entfernung auf eine Photozelle (im gereinigten Bereich der Frontscheibe) abbildet“ [Huh99, S. 109]. Zur Realisierung der adaptiven Lichtfunktion werden je nach Bauart bewegte Reflektorsegmente, eine Blendenverschiebung oder die partielle Anpassung des Reflexionsgrades des Reflektors als Lösungsmöglichkeiten vorgeschlagen.

Rosenhahn [Ros99b] befasste sich im Speziellen mit den Schlechtwetterbedingungen Regen und Nebel und erarbeitete für diese Situationen lichttechnische Anforderungen an Kfz-Scheinwerfer, wobei an dieser Stelle nicht näher auf die Anforderungen in Nebelsituationen eingegangen werden soll. Dafür führte er unter anderem lichttechnische Messungen bezüglich einer möglichen Blendung des Gegenverkehrs aufgrund der Reflexion des Scheinwerferlichts auf einer nassen Fahrbahnoberfläche durch. Im Labor wurden eine glatte und eine grobe Straßenprobe hinsichtlich ihres Vorwärts- und Rückwärtsreflexionsverhalten vermessen. Im Falle einer trockenen Fahrbahn betrug das Verhältnis zwischen Vorwärts- und Rückwärtsreflexion in etwa eine Dekade, wobei die Absolutwerte für die grobe Probe höher ausfielen. Bei einer nassen Fahrbahn nimmt dieses Verhältnis zu, für die grobe Probe ergab sich ein Faktor von 100, für die glatte sogar ein Faktor von fast 1000. Der Zustand nasse Fahrbahnprobe wird nicht näher spezifiziert. Als schwierig erwies sich die Reproduzierbarkeit einer Regensimulation, was vor allem Einfluss auf die Absolutwerte der Vorwärtsreflexion nahm.

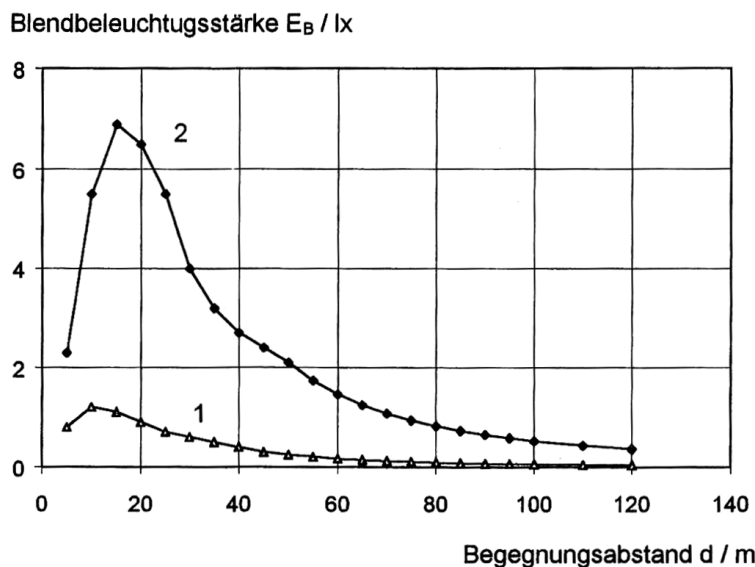
Feldmessungen führte Rosenhahn auf dem Versuchsgelände des Fachgebiets Lichttechnik der TU Darmstadt durch. Hierfür berechnete er nach eigenen Angaben eine Fläche von  $50 \text{ m} \times 6 \text{ m}$  gleichmäßig mit vier Regnern. Dabei sei ein starker Regen (mittlere Niederschlagsmenge  $N = 0,3 \text{ mm min}^{-1}$ ) simuliert worden. Der Versuchsaufbau stellt eine Begegnungssituation mit einem Abstand von 50 m dar. Aus Sicht des Gegenverkehrs wurden zur quantitativen Bewertung Leuchtdichteaufnahmen gemacht. Das Maximum der Leuchtdichte bei den sich ausbildenden „Blendkeulen“ lag bei circa  $d = 20 \text{ m}$ , was bei der gewählten Geometrie in etwa dem Spiegelwinkel entspreche. Nach Begegnungsstopp nehmen die Absolutwerte mit dem Abtrocknungsvorgang erwartungsgemäß ab, das Leuchtdichtemaximum verlässt hierbei den idealen Spiegelwinkel und rückt näher an das Blendfahrzeug heran, was in Abbildung 2.11 beispielhaft für die Blendkeule des rechten Scheinwerfers gezeigt ist.



**Abbildung 2.11:** Gemessene Leuchtdichte einer Blendkeule in Abhängigkeit der Position vor dem Blendfahrzeug (Begegnungsabstand  $d = 50$  m) [Ros99b]

- 1) 40 Sekunden nach Beregnungsstopp
- 2) 5 Minuten nach Beregnungsstopp
- 3) 10 Minuten nach Beregnungsstopp

Zusätzlich hat Rosenhahn Blendbeleuchtungsstärken in Abhängigkeit des Begegnungsabstandes für ein Halogen-Scheinwerferpaar gemessen. Die Verläufe für den Fall einer trockenen und einer nassen Fahrbahn sind in Abbildung 2.12 gezeigt. Die Messwerte setzen sich aus dem direkten und dem indirekten, von der Fahrbahnoberfläche gespiegelten Anteil des Scheinwerferlichtes zusammen. Bei Nässe überwiegt der auf die Reflexionen zurückzuführende Anteil, sodass die Beleuchtungsstärkewerte im Vergleich zur trockenen Fahrbahn um einen Faktor zwischen 6 und 7 größer sind.



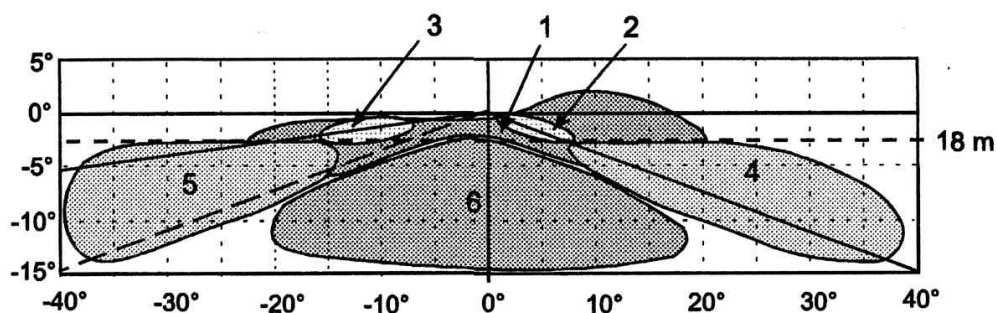
**Abbildung 2.12:** Blendbeleuchtungsstärkeverlauf am Auge eines entgegenkommenden Fahrers in Abhängigkeit der Entfernung für eine trockene (1) und eine nasse Fahrbahn (2) [Ros99b]



In Labor- und Feldstudien ermittelte Rosenhahn den Einfluss einer Begegnungssituation bei nasser Fahrbahn auf die Sehleistung, indem er die Wahrnehmungsschwelle (Schwellenleuchtdichte) der Probanden bestimmte. Bei den Untersuchungen an einer Modellstraße (Maßstab 1:10) zeigte sich für ein Sehziel in 50 m Entfernung im Vergleich zu einer trockenen Fahrbahn eine Erhöhung der Schwellenleuchtdichte um den Faktor 9 bis 10. „Ein Objekt müsste unter diesen Bedingungen bei gleichem Umfeld eine zehnmals größere Leuchtdichte aufweisen, um in gleicher Weise wahrgenommen zu werden“ [Ros99b, S. 41]. Ein Maximum der Schwellenleuchtdichteerhöhung bei nasser Fahrbahn im Vergleich zum ungeblendeten Fall liege für einen Begegnungsabstand zwischen 60 m und 80 m vor. Der Versuch unter realen Bedingungen diente der Bestätigung der Laborergebnisse und zeige eine gute Übereinstimmung.

Weiterhin untersuchte er die Readaptationszeit der Probanden bei einer transienten Blendung, wie sie bei einem Passivvorgang vorliegt. Hierfür wählte er wieder die erwähnte Modellstraße mit fest installierten Blendquellen (je eine Quelle für den direkten und den indirekten Anteil) in umgerechnet  $d = 50$  m. Der zeitliche Verlauf der dargebotenen Beleuchtungsstärkeverläufe wurde für die Begegnung zweier Fahrzeuge mit je  $100 \text{ km h}^{-1}$  berechnet und über Dimmung der Blendquellen realisiert. Zusätzlich wurde für weitere Verläufe das Maximum anteilig reduziert. Der Studie zufolge beträgt die Readaptationszeit nach einer solchen Begegnungssituation  $t_R = 2 \dots 4$  s.

Rosenhahn untersuchte insbesondere auch den Einfluss von Niederschlag in Form von Regen. Dafür realisierte er einen Versuchsaufbau mit vier modifizierten Scheinwerferpaaren, sodass eine segmentierte Lichtverteilung, siehe Abbildung 2.13, zur Verfügung stand. Bei Segment 1 handelt es sich um die Grundausleuchtung, bei 2 und 3 um die ferne Seitenausleuchtung rechts und links, bei 4 beziehungsweise 5 um die entsprechende nahe Seitenausleuchtung und bei Segment 6 um das direkte Vorfeld.



**Abbildung 2.13:** Segmentierte Lichtverteilung zur Bewertung der Ausleuchtung unter Regenbedingungen [Ros99b]

Der Versuch wurde auf einer Teststrecke mit einer Länge von 83,2 km durchgeführt. Hierbei handelte es sich um dynamische Untersuchungen auf öffentlichen Straßen, die während der Realsituation Regen stattfanden. Die fünf Teilnehmer bekamen verschiedene vorkonfigurierte Lichtverteilungen gezeigt und sollten die nahe und ferne Seitenausleuchtung sowie die Homogenität von zentralem Vorfeld zur Seitenausleuchtung bewerten. Auf Basis seiner Ergebnisse hat Rosenhahn die in Abbildung 2.14 gezeigte Lichtver-

teilung mit photometrischen Mindestanforderungen entwickelt.

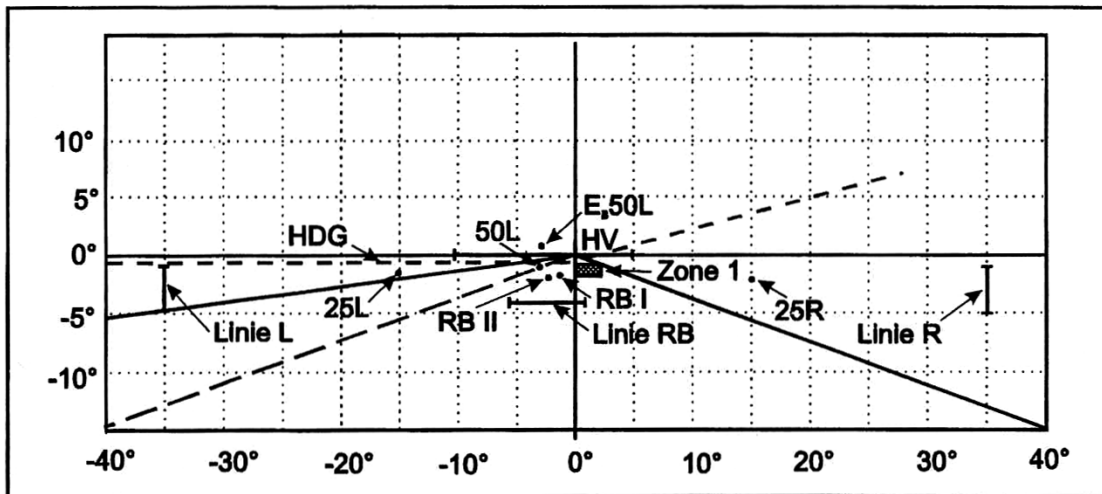
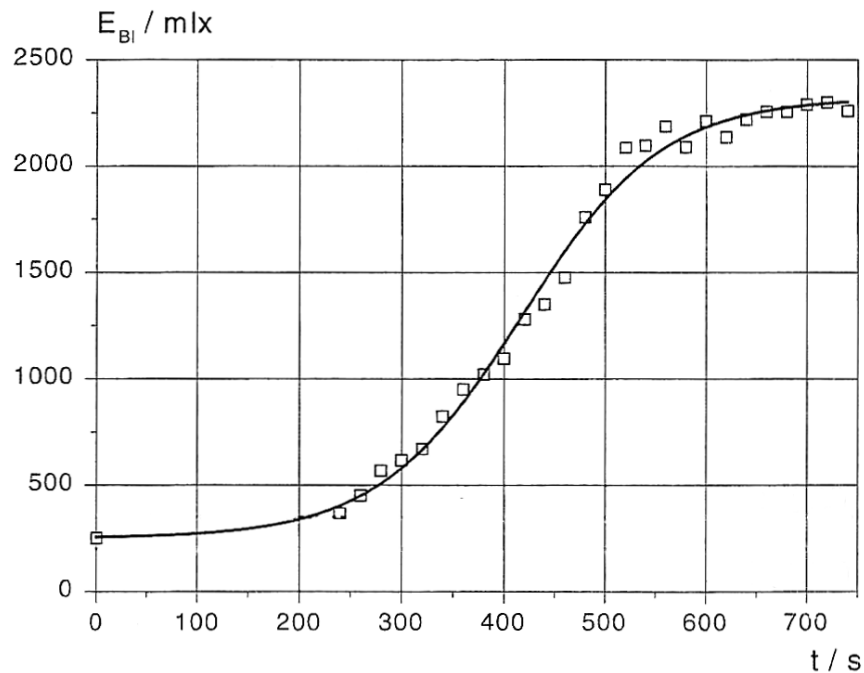


Abbildung 2.14: Vorschlag einer Schlechtwetterlichtverteilung für einen Regenscheinwerfer nach Rosenhahn [Ros99b]

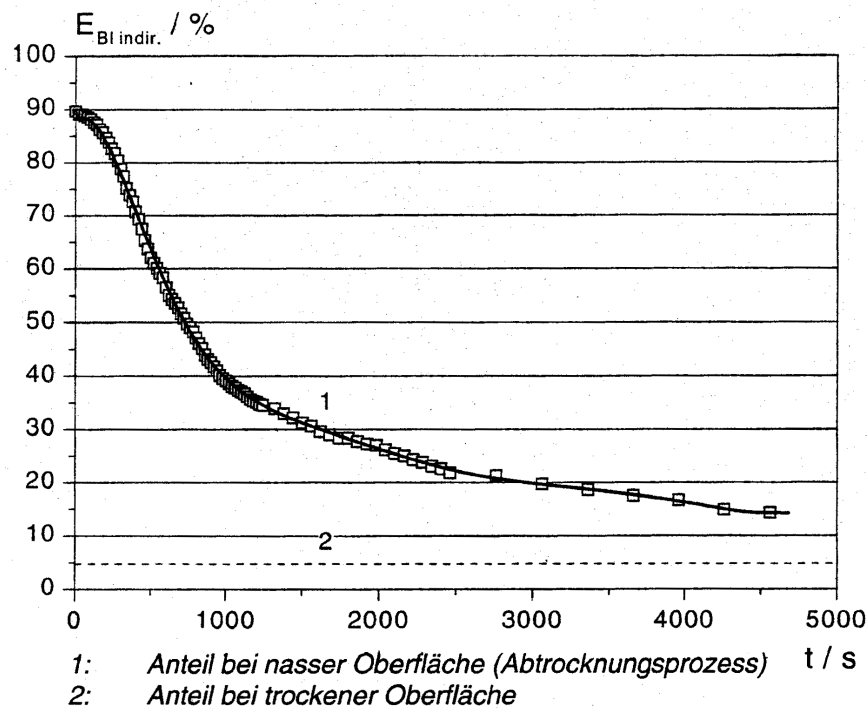
Neu eingeführt wurden unter anderem die Linie RB sowie die beiden Punkte RBI und RBII. RB steht hierbei für Reflexblendung, denn durch diese Anforderungen soll eine indirekte Blendung aufgrund von Reflexionen an der nassen Fahrbahnoberfläche reduziert werden. Die Lage der Punkte/Linie wurde mithilfe einer aufgestellten Bewertungsfunktion zur Abschätzung der Blendbeleuchtungsstärke einer Scheinwerferlichtverteilung für einen Begegnungsabstand von  $d = 70$  m ermittelt, da bei einem Abstand zwischen 60 m und 80 m der Sehleistungsverlust am stärksten sei. Diese fußt auf der aus [SDW92] abgeleiteten Annahme, dass sich die Position der Augen eines entgegenkommenden Fahrers mit fünfzigprozentiger Wahrscheinlichkeit in einem horizontalem Winkelbereich von  $\alpha = -2,1 \dots -1,4^\circ$  befinden. Durch die Reduktion des Vorfeldes verkürze sich außerdem die Readaptationszeit. Für eine sicherere Orientierung und bessere Erkennbarkeit sollten die maximale Lichtstärke sowie die Ausleuchtung der Seitenbereiche erhöht werden.

Auch Schmidt-Clausen und Schwenkschuster [SS01] haben sich mit dem Einfluss von Nässe auf die Blendung des Gegenverkehrs beschäftigt. Dafür haben sie auf dem Versuchsgelände der TU Darmstadt eine Begegnungssituation statisch nachgebildet, die einem Abstand von  $d = 50$  m entspricht. In einem der Fahrzeuge wurde die Beleuchtungsstärke am Auge des Fahrers gemessen, die durch die Scheinwerferlichtverteilung des „entgegenkommenden“ Fahrzeuges erzeugt wurde. Die Strecke wurde künstlich beregnet und die Messwerte während der Beregnungsdauer protokolliert. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Demnach übertreffe die gemessene Beleuchtungsstärke für den Fall einer nassen Fahrbahn den gesetzlich zugelassenen Grenzwert im Punkt B50L ( $E \leq 0,2$  lx) um einen Faktor von  $F \geq 10$ .



**Abbildung 2.15:** Gemessene Blendbeleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Beregnungsdauer, angelehnt an [SS01]

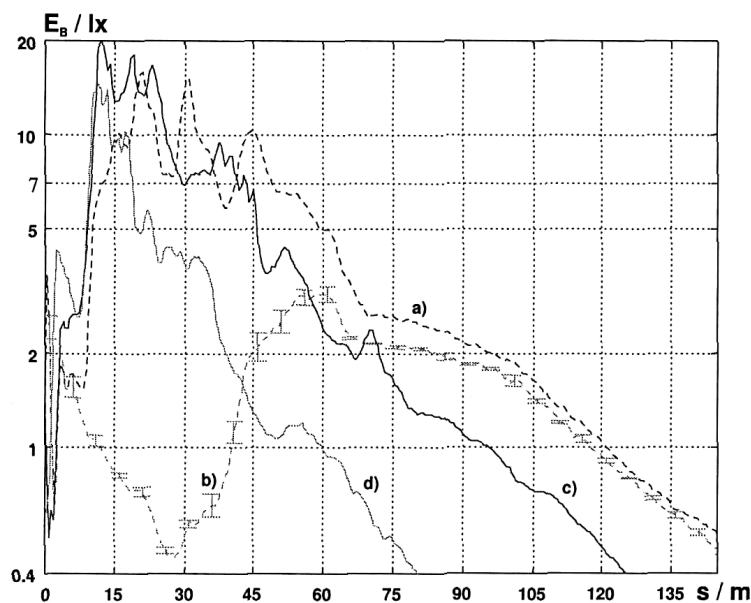
Die gemessenen Werte setzen sich aus einem direkten und einem indirekten Anteil zusammen. In Abbildung 2.16 ist für diese Messung der prozentuale Anteil der indirekten an der insgesamt gemessenen Blendbeleuchtungsstärke über der Zeit aufgetragen.



**Abbildung 2.16:** Für einen Abtrocknungsvorgang ermittelter Anteil der indirekten Blendbeleuchtungsstärke an der gesamt gemessenen Blendbeleuchtungsstärke [SS01]

Hieran wird deutlich, wie groß der Einfluss der Nässe ist. Der indirekte Anteil beträgt für eine trockene Fahrbahn lediglich 5 %, wächst für eine nasse Fahrbahn jedoch auf bis zu 90 % an. Trägt man die indirekte Beleuchtungsstärke außerdem über der mittleren Leuchtdichte der Blendkeulen auf, so erkennt man einen linearen Zusammenhang zwischen beiden Größen. Deswegen seien die Reflexionsbilder der Scheinwerfer auf der Fahrbahn „als zusätzliche Blendquelle zu betrachten“ [SS01, S. 38].

Von Hoffmann [Hof03] analysierte das Blendverhalten adaptiver Scheinwerfer. Gemeint sind Scheinwerfer, deren Abblendlichtverteilung sich an den Straßenverlauf, den Straßentyp und den Straßenzustand anpassen kann. Beim Straßenzustand wird zwischen trockener und nasser Fahrbahn unterschieden. Zur Ermittlung der Blendung  $E_B$  bei einer nächtlichen Begegnungssituation rüstete von Hoffmann zwei Versuchsträger mit unterschiedlichen Scheinwerfersystemen aus. Die Ergebnisse seiner Untersuchung sind in Abbildung 2.17 dargestellt. Eine gute Wiederholbarkeit der Messungen sei gegeben. Bei dem ersten Versuchsfahrzeug wurde die Schlechtwetterlichtfunktion nach Rosenhahn über eine Vorfeldblende umgesetzt [Ros99a]. Zum Vergleich konnte alternativ zu dem Schlechtwetterlicht (Verlauf b) auch das Landstraßenlicht (Verlauf a) eingeschaltet werden. Die beiden Verläufe c und d wurden dementsprechend mit dem zweiten Fahrzeug erzeugt. Bei diesem ist die Schlechtwetterfunktion durch ein Auseinanderschwenken der Module, auch als divergentes Schwenken bezeichnet, realisiert, was auf den Vorschlag von Kalze [Kal01] zurückgeht.



**Abbildung 2.17:** Verlauf der Blendbeleuchtungsstärke für verschiedene Scheinwerfersysteme nach von Hoffmann [Hof03]:

- a) Landstraßenlicht I
- b) Schlechtwetterlicht I
- c) Landstraßenlicht II
- d) Schlechtwetterlicht II

Durch die Vorfeldblende wird die Beleuchtungsstärke für einen Begegnungsabstand von  $s < 60$  m merklich reduziert. Auch bei der Untersuchung des Blendniveaus in Kurvensituationen mit konstantem Radius  $R = 100$  m konnte die Wirksamkeit der Blende bei der Kopplung mit einer Kurvenlichtfunktion grundsätzlich bestätigt werden. Allerdings müsse der Schwenkwinkel geeignet gewählt werden, wofür von Hoffmann Empfehlungen gibt. Über alle Straßenverläufe gesehen sei die Realisierung der Schlechtwetterlichtfunktion über die Vorfeldblende nach Rosenhahn der Lösung basierend auf divergentem Schwenken zu bevorzugen.

In die Regelung Nr. 123 der ECE [ECE123] ist im Rahmen der adaptiven Frontbeleuchtungssysteme (AFS) eine sogenannte Schlechtwetterlichtverteilung aufgenommen worden. Es handelt sich hierbei um die Abblendlichtklasse W „für die Verwendung unter ungünstigen Bedingungen, wie z. B. bei nassen Straßen“ [ECE123, S. 3]. In Abbildung 2.18 ist der Messschirm mit definierten Winkelpositionen, für die vorgegebene photometrische Werte eingehalten werden müssen, zu sehen.

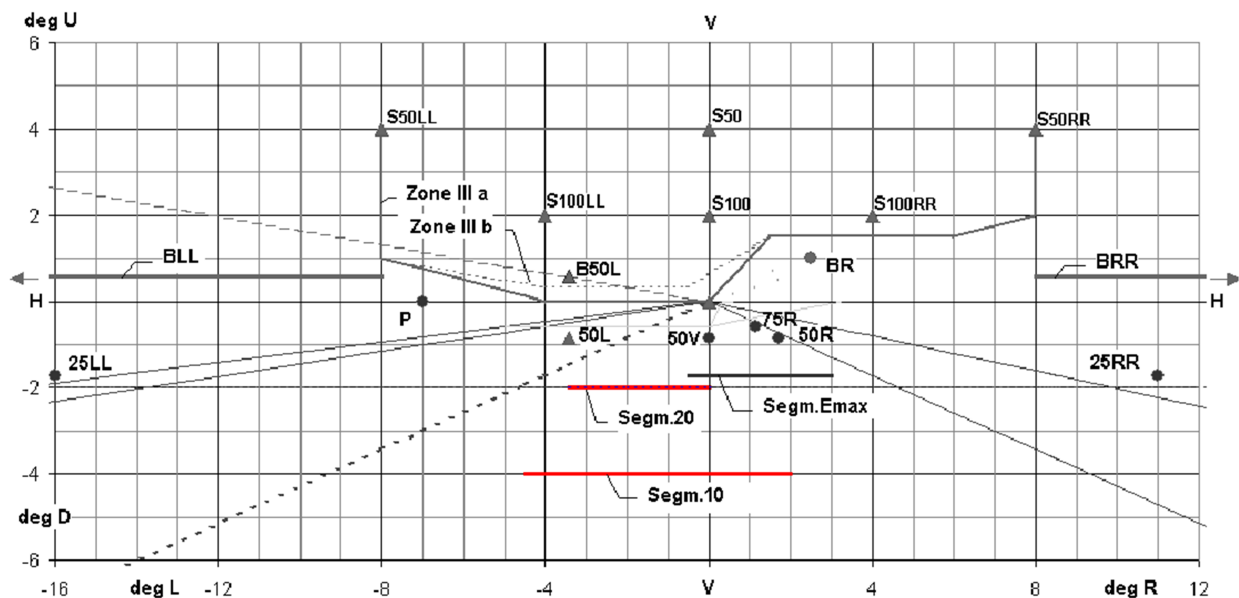


Abbildung 2.18: Messschirm der ECE-Regelung 123 [ECE123]

Es wurden die beiden Segmente 10 und 20 eingeführt, in denen die maximalen photometrischen Werte für die Klasse W im Vergleich zu den anderen Abblendlichtklassen stärker begrenzt sind. Dadurch soll eine Reduktion der indirekten Blendung des Gegenverkehrs erzielt werden. Die Lage der Segmente geht auf die Untersuchungen von Rosenhahn zurück, vergleiche Abbildung 2.14. Gleichzeitig ist im Punkt B50L die maximal zulässige Beleuchtungsstärke erhöht, die ein Maß für die direkte Blendung ist.

Das technische Komitee TC-4-45 [TC10] hat standardisierte Bewertungsverfahren für Scheinwerfersysteme entwickelt und validiert. Demnach könne die durch die Scheinwerfer hervorgerufene Blendung anderer Verkehrsteilnehmer nicht nur durch eine statische Situation ermittelt werden, da sich in dynamischen Situationen die relative Position des Augenpaares eines entgegenkommenden Fahrers zur Lichtverteilung ändere. Dadurch

falle die Blendung in einer realen Begegnungssituation für verschiedene Scheinwerferpaare unterschiedlich aus. Für die Bewertung der direkten Blendung wurde für eine Entfernung von 50 m nach Damasky [Dam95] ein rechteckiger Bereich definiert, in dem sich das Augenpaar eines entgegenkommenden Fahrers befinden könne. Dieser Bereich ist in mehrere Zonen aufgeteilt. Für jede Zone sei der korrespondierende Lichtstrom zu berechnen, der dann in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Augenposition gewichtet wird. Eine Berücksichtigung von Reflexionen an der Fahrbahn erfolgt nicht.

## 2.2.2 Umfeldsensorik

### 2.2.2.1 Verkehrsteilnehmer

**RADAR** steht für *Radio Detection and Ranging*, also die Ortung von Objekten durch Funkwellen [Win12]. Die von einem Radargerät ausgesendeten elektromagnetischen Wellen werden von in der Ausbreitungsrichtung befindlichen Objekten reflektiert. Diese Echos können dann von der Empfangseinheit aufgenommen werden. Die Entfernung eines Objektes ergibt sich aus der Zeit vom Aussenden bis zum Empfang der reflektierten Wellen. Dieses Verfahren wird Laufzeitverfahren oder auch Time-of-Flight (ToF)-Verfahren genannt.

Gleichzeitig kann auch eine Messung der Relativgeschwindigkeit des Objektes erfolgen. Hierfür wird der sogenannte Doppler-Effekt berücksichtigt: Durch ein sich relativ zum Sensor bewegendes Objekt erfährt das Empfangssignal eine Frequenzverschiebung, die proportional zur relativen Radialgeschwindigkeit ist [Rei10, Win12].

Zur Bestimmung des Winkels zwischen einem Objekt und der Sensorlängsachse sind mindestens zwei Radarwellen notwendig, die in verschiedene Richtungen abgestrahlt werden. Aufgrund der Abstrahlcharakteristik kann durch den Vergleich der Amplitude und der Phase der gemessenen Echosignale auf die Sichtwinkel geschlossen werden. Diese Abstrahlcharakteristik wird durch den Einsatz einer Antenne erreicht, durch die eine gebündelte Abstrahlung der elektromagnetischen Wellen erfolgt. Gängige Methoden sind beispielsweise das mechanische Scanning oder die Verwendung von Mehrstrahlern [Rei10, Rei12, Win12, WR06].

Aufgrund der großen Wellenlängen – das Frequenzband um 76 GHz entspricht einer Wellenlänge von circa 4 mm – werden Radarstrahlen kaum von Witterungseinflüssen wie Nebel, Schnee oder Regen geschwächt [Sti05, Win07]. Der hohen Robustheit hinsichtlich Witterungseinflüssen steht eine geringe Winkelauflösung gegenüber, die durch die benötigte Größe der Antenne beschränkt wird. Abhilfe könnte hier in Zukunft die „Terahertz-Technik“ schaffen, mit der sich Keulbreiten von 1° realisieren ließen. Die Entwicklung dieser Technologie als Radar-Anwendung steht allerdings noch am Anfang [Win12].

**LIDAR** (*Light Detection and Ranging*) ist ein optisches Messverfahren zur Abstandsmessung von Objekten im Umfeld [Ged12]. Die Funktionsweise gleicht weitestgehend der

eines Radarsensors, was sich auch aus der Wahl des Akronyms ableiten lässt. Lidarsensoren nutzen anstelle von Mikrowellen im Allgemeinen Strahlung aus dem ultravioletten, infraroten oder sichtbaren Bereich. In der Regel wird im Automobilbereich eine Laserquelle gewählt, die Strahlung einer Wellenlänge zwischen 850 nm und 1000 nm emittiert.

Neben der Abstandsmessung wäre prinzipiell auch eine Geschwindigkeitsbestimmung über den Dopplereffekt möglich, jedoch wird aus Kostengründen wegen der damit verbundenen sehr hohen Anforderungen darauf verzichtet. Stattdessen wird bei Lidarsensoren eine Geschwindigkeitsbestimmung über die zeitliche Veränderung des Abstandes vorgenommen [Ged12].

Die maximale Reichweite wird durch die Forderung nach Augensicherheit und der damit verbundenen begrenzten Leistungsdichte des Laserstrahls mitbestimmt. Eine Erhöhung der Reichweite ist nur mit einer größeren Apertur möglich, sodass hier der Bauraum eine entscheidende Limitierung darstellt [Sti05]. Zusätzlich wird die Reichweite durch den Transmissionsgrad der Atmosphäre bestimmt. Dieser weist grundsätzlich eine spektrale Abhängigkeit auf, wird aber auch durch meteorologische Bedingungen beeinflusst. Bei sichteinschränkenden Verhältnissen, zum Beispiel Regen oder Nebel, kann somit anhand der beeinflussten Ausbreitung auf die vorherrschenden Sichtverhältnisse geschlossen werden.

Neuere Generationen von Lidarsensoren, wie zum Beispiel der ibeo LUX [IAS10], verwenden mehrere Messebenen. Dadurch werden vor allem Fehlinterpretationen bei Nickbewegungen reduziert. Zusätzlich ist aber auch eine Unterscheidung zwischen Fahrzeugen und Umgebungshindernissen wie Büschen oder Leitplanken möglich, da mit den verschiedenen Ebenen eine Art Höhenprofil erstellt werden kann.

**Kamerasensoren** ermöglichen das sogenannte *Maschinelle Sehen*, das der menschlichen visuellen Wahrnehmung am nächsten kommt. Das wichtigste Element ist der Bildsensor. Hierbei handelt es sich grundsätzlich um eine zweidimensionale Matrix von Fotodioden. Diese wandeln den einfallenden Photonenstrom in einen Ladungsstrom um (Fotoeffekt) [HM06]. Die analogen Signale werden durch einen Analog-Digital-Umsetzer (ADU) quantisiert und können dann durch einen Rechner weiterverarbeitet werden. Die strahlungsempfindliche Fläche der Fotodioden wird auch als Pixel bezeichnet. Je nach Prinzip der Auslesung der Pixel wird zwischen zwei verschiedenen Sensoren unterschieden, dem Charge Coupled Device (CCD) und dem Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS). Im Gegensatz zur CCD-Technik werden bei der CMOS-Variante die Pixel nicht seriell ausgelesen. Vielmehr sind diese jeweils um eine aktive Elektronik ergänzt, sodass sie einzeln angesteuert werden können [Rei10]. Dadurch sind sie im Gegensatz zum CCD-Sensor unempfindlich gegenüber Blooming- und Schmiereffekten, siehe auch [HM06].

Durch die Projektion einer dreidimensionalen Szene auf einen zweidimensionalen Bildsensor gehen die Tiefeninformationen verloren. Deswegen kann man einzelnen Pixeln lediglich Winkelinformationen entnehmen. Eine Schätzung von Objektabständen kann

durch die Annahme von Standardlängen, zum Beispiel der Abstand zwischen zwei Scheinwerfern oder Rückleuchten eines Kfz, vorgenommen werden. Durch die Hinzunahme eines zweiten Kamerasensors, auch als Stereo-Kamera oder Stereovision bezeichnet, können die Tiefeninformationen mittels Stereometrie bestimmt werden. Verwendet man anstelle einer zweiten Kamera einen Projektor, kann man Tiefeninformationen mittels der sogenannten Moirétechnik ermitteln. Hierfür wird die Szene mit einem bekannten Muster beleuchtet. Über Triangulation können dann Entfernungsdaten aus dem Bild extrahiert werden [HM06].

**Photomischdetektoren** (PMD, engl. Photonic Mixer Device) kombinieren vereinfacht ausgedrückt das Prinzip eines Kamerasensors mit einer ToF-Messung. Dafür wird neben der Empfangseinheit eine Strahlungsquelle zur aktiven, modulierten Bestrahlung der Szenerie benötigt. Durch dieses Verfahren beinhaltet jedes Pixel neben der Helligkeitsinformation unter anderem auch eine Abstandsinformation. Aktuell erzielbare Reichweiten der Systeme im Kfz betragen zwischen 50 m und 70 m bei einer Framerate von 100 Hz. Die Wahl der Auflösung impliziert immer einen Kompromiss zwischen erreichbarer Tiefengenauigkeit und lateraler Auflösung des Sensors. Durch die Verwendung kleinerer Pixel erhöht sich zwar die Auflösung, dies führt aber gleichzeitig zu einer reduzierten Empfindlichkeit eines jeden Pixels, wodurch die Reproduzierbarkeit der Tiefeninformationen abnimmt. Typische Auflösungen liegen im Bereich zwischen einigen wenigen 1000 und 100 000 Pixeln. Für detailliertere Informationen sei auf Buxbaum et al. [Bux+12] verwiesen.

#### 2.2.2.2 Straßenverhältnisse

Die Idee zu einem Straßenzustandssensor gab es bereits vor einigen Jahrzehnten, wie mehrere Patentanmeldungen belegen [Dec81, Gri99, HCK96, HE93]. Das Sensorprinzip beruht auf dem spektral abhängigen Absorptionsverhalten von Wasser – genauer dessen Aggregatzuständen flüssig und fest. Je nach Anzahl der verwendeten, charakteristischen Wellenlängen im Infrarot-Bereich (Spektroskopie) lässt sich so zwischen den Zuständen trocken, nass, schneeig und vereist unterscheiden und darüber hinaus auch die Dicke einer Wasser- beziehungsweise Eisschicht bestimmen. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts INVENT (Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik) beschäftigte sich die Firma *HELLA KGaA Hueck & Co.* mit der Umsetzung eines Straßenzustandserkennungssystems [Boe06]. Neuere Systeme nutzen als zusätzliche Information den Polarisationszustand der reflektierten Strahlung, da hierdurch eine zuverlässigere Unterscheidung zwischen Eis und Wasser möglich ist [Bre+11, Cas07].

Um den Fahrbahnzustand vorausschauender erkennen zu können, wurden kamerabasierte Systeme entwickelt. Auch hier kommen zusätzlich Polarisationsfilter zum Einsatz. Diese Sensorsysteme unterscheiden sich in der spektralen Empfindlichkeit der Bildsensoren [Kos10, KP09, RS11].



Die Detektion von Wasser oder Eis kann ebenfalls durch einen kapazitiven Sensor erfolgen, wie es zum Beispiel von Mesin, Troiano und Pasero [MTP10] aufgezeigt wird. Diese Sensoren sind in der Regel in den Fahrbahnbelag eingelassen, eine Übertragung dieses Konzepts auf eine Messung am Fahrzeug ist jedoch denkbar.

Eine weitere Variante zur Detektion von Nässe auf der Fahrbahn stellen Sensoren im Radkasten dar, wie von Huhn [Huh99] vorgeschlagen. Diese Sensoren nutzen zum Beispiel das durch den Aufprall hochgewirbelter Wassertropfen entstehende Geräusch [RZB93] oder die elektrische Leitfähigkeit des Wassers bei der Benetzung des Sensors [Fal04]. Akustische Sensoren können außerdem dazu eingesetzt werden, anhand des Abrollgeräusches der Reifen auf die Witterungsbedingungen zu schließen [Alo+14].

Die Witterungsbedingungen haben ebenfalls Einfluss auf die Reibung zwischen Fahrbahn und Reifen. Deswegen existieren bereits Verfahren aus dem Bereich der Fahrdynamikregelung, um kritische Situationen durch einen zu niedrigen Reibungskoeffizienten zu erkennen und damit ein unkontrollierbares Rutschen des Kfz zu verhindern. Hierbei besteht ein Zusammenhang zwischen dem Reibungskoeffizienten und den Straßenverhältnissen [FS88, MT08a]. Eine Abschätzung der Reibung kann auf verschiedene Arten erfolgen. Einen Überblick über mögliche Sensoren im Reifen und deren Prinzipien bieten Matsuzaki und Todoroki [MT08b].

Auch die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn lassen Rückschlüsse auf die Witterungsbedingungen zu. Zur Messung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn existieren mobile Feldmessgeräte, um für definierte Winkelkombinationen von Anleucht- und Messwinkel die Reflexionsindikatrix (r-Tabelle) der Fahrbahnoberfläche zu berechnen. Dafür wird das Gerät direkt auf der Fahrbahn positioniert. Vertreter dieser Geräteklasse sind zum Beispiel in [Eck93, Lau08, Sch07] beschrieben.

Messgeräte zur Detektion der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn während der Fahrt existieren bisher nicht. Lediglich zur dynamischen Bestimmung der Nachtsichtbarkeit von Fahrbahnmarkierungen hat die Firma *Zehntner GmbH Testing Instruments* das Reflektometer ZDR 6020 entwickelt. Dieses System wird am Fahrzeug befestigt und funktioniert bis zu einer Geschwindigkeit von 150 km/h.

### 2.2.3 Sensorfusion

Bisher existiert im Automobilbereich keine einheitliche Fusionsarchitektur, die als Standard definiert wurde. Vielmehr finden sich in der Literatur zumeist anwendungsspezifische Lösungen.

Darms [Dar07] hat bereits eine Basisarchitektur erarbeitet, die als Grundlage für die Realisierung einer Standardarchitektur dienen könnte. Sie ist in drei verschiedene Ebenen unterteilt: „eine Anwendungsebene, eine sensorunabhängige Fusionsebene und eine sensorspezifische Sensorebene“ [Dar07, S. 91]. Auf diese Weise ist es möglich, Veränderun-

gen sowohl in der Anwendungsebene, zum Beispiel das Hinzufügen neuer FAS, als auch in der Sensorebene, zum Beispiel die Erweiterung durch neue oder der Austausch von älteren Sensoren, vorzunehmen, ohne die Fusionsstruktur selbst anpassen zu müssen. Eine erste Implementierung der Fusionsarchitektur erfolgte im Forschungsprojekt „Proreta 2“ für die Fusion eines Laserscanners und eines Kamerasensors zur Realisierung eines Assistenten für Notbrems- und Notausweichmanöver [Ben+07, Dar07].

Die auf diesem Gebiet durchgeführten Arbeiten unterscheiden sich in erster Linie in der Auswahl der Sensorik, die entsprechend der Aufgabenstellung differiert. Die jeweils ausgearbeitete Architektur stellt zunächst eine anwendungsspezifische Lösung dar. Aufgrund der vielseitigen Möglichkeiten in der Bildverarbeitung wird häufig ein Kamerasensor verwendet. Dieser wird mit Radar- und/oder Lidarsensoren oder auch mit einem weiteren Kamerasensor (Stereovision) fusioniert, um eine Umfeldwahrnehmung nach dem 4D-Ansatz – also die Lage eines Objektes im dreidimensionalen Raum und deren zeitliche Veränderung – zu realisieren. Beispiele für eine Fusion auf Basis dieser Sensorik finden sich in [Dar07, Eff09, Hof04, Hol04, Liu09, Pra10, Spe09, Stü04, Wei11, Wen08]. Zur Erkennung von Fußgängern, zum Beispiel für Nachtsichtsysteme, werden Infrarotkameras eingesetzt, wobei hier zwischen Nah- und Ferninfrarotkameras zu unterscheiden ist. Für eine möglichst geringe Fehldetektionsrate haben Honsel und Schweiger die Daten beider Kamerasensoren fusioniert [Hon12, Sch12]. Um darüber hinaus auch detailliertere Informationen über die Infrastruktur zu erhalten, kann zusätzlich digitales Kartenmaterial und ein (D)GPS-Sensor zur Positionierung in den Fusionsprozess integriert werden [Wen08].

Neben dem Einsatz in der Fahrerassistenz bildet die Sensorfusion auch die Grundlage für das „autonome Fahren“. Hier gilt es vor allem, das gesamte Umfeld (360°) zu überwachen, um auf Basis der Umfeldmodellierung sinnvolle Pfad- und Manöverplanungen vornehmen zu können. Aktuell liegt der Fokus auf urbanen Umgebungen, da sie die höchste Komplexität aufweisen. Die Realisierung eines öffentlichen automatischen Fahrbetriebes ist für die nahe Zukunft noch nicht absehbar, der technische Fortschritt auf diesem Forschungsgebiet in Bezug auf Sensorik, Fahrzeugregelung beziehungsweise -führung und Umfelderkennung bildete jedoch bereits die Grundlage für mehrere Fahrerassistenzsysteme: zum Beispiel das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), die automatische Abstandsregelung (ACC), der Spurwechsel- oder Einparkassistent [Eff09].

## 2.3 Beitrag dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein adaptives Schlechtwetterlicht für nasse Fahrbahnen entwickelt. Im Gegensatz zu den bisherigen Vorschlägen zu einer Schlechtwetterlichtverteilung von Damasky [Dam95] und Rosenhahn [Ros99b] erfolgt hier keine generelle Reduzierung der Vorfeldlichtstärke, sondern eine an die Fahrsituation angepasste partielle Abdunkelung. Diese bietet den Vorteil, dass die restliche Lichtverteilung völlig indi-

viduell gestaltet werden kann, sofern die technische Umsetzung des Scheinwerfers dies zulässt. Eine Abdunkelung des gesamten Vorfeldes würde zu einer niedrigeren Leuchtdichte auf der Fahrbahn führen, die für nasse Fahrbahnen ohnehin schon geringer ausfällt (vergleiche [SF04]). Bedingt durch die reduzierte Leuchtdichte verringert sich das Adaptationsniveau des Fahrers, was ebenfalls zu einer Abnahme der Sehleistung und zu einer erhöhten Blendempfindlichkeit führt [SS01]. Wenn es durch die partielle Reduktion der Lichtstärke gelingt, eine Blendung des Gegenverkehrs sicher und zuverlässig zu vermeiden, ist eine Erhöhung der Lichtstärke in anderen Bereichen denkbar. Dies hätte einen höheren Adaptationszustand und somit auch eine verbesserte Sehleistung bei geringerer Blendempfindlichkeit zur Folge.

Da für die Realisierung dieser Lichtfunktion nicht eine einzelne, statische Lichtverteilung zielführend ist, müssen zunächst die in der ECE-Regelung 123 festgelegten Winkelbereiche, in denen eine Reduzierung der photometrischen Werte zur Minderung der Blendung entgegenkommender Fahrer vorgenommen wird, entsprechend für dynamische, individuelle Situation erarbeitet und erweitert werden. Daraus lassen sich anschließend die Anforderungen an den Winkelbereich des Scheinwerfersystems ableiten, in dem zur Realisierung dieser Lichtfunktion eine Veränderung der Lichtstärke vorgenommen werden muss. In Hinblick auf die mögliche Verwendung eines Matrix-Scheinwerfers ist darüber hinaus die Anforderung an die benötigte Auflösung von Bedeutung. Aufschluss soll diesbezüglich eine erstmals durchgeführte Probandenstudie zur Wahrnehmung dieser Lichtfunktion geben. Dafür wurde ein Demonstrator aufgebaut, mit dem sich die vorgeschlagene Lichtfunktion für eine statische Begegnungssituation umsetzen lässt.

Eine derartige adaptive Schlechtwetterlichtfunktion sollte nur bei einer zu hohen Vorwärtsreflexion aktiviert werden. Dafür ist es unabdingbar, einen ebensolchen Zustand erkennen zu können. Für das angestrebte Ziel eines volladaptiven Scheinwerfers, siehe auch [HHS13] und [Sch11], ist neben der Kenntnis der aktuellen Vorwärts- auch die Rückwärtsreflexion von Bedeutung. Daher wurde ein Sensorsystem zur dynamischen Messung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn entwickelt. Die mit diesem System ermittelten Werte lassen sich in die Beleuchtungsstrategie einbeziehen. Anhand der Rückwärtsreflexion kann eine Schätzung des Adaptationszustandes des Fahrers erfolgen und der ausgesendete Gesamtlichtstrom entsprechend variiert werden. Über die Vorwärtsreflexion kann das Blendrisiko geschätzt werden.

Für dynamische Betrachtungen wurde das Gesamtkonzept in Form eines Prototyps umgesetzt. In abschließenden Untersuchungen konnte so die Wirkungsweise des Schlechtwetterlichtes anhand von nachgestellten Passiervorgängen geprüft und bewertet werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse zeigen, welche Entwicklungsschritte noch für eine mögliche Serienanwendung vorzunehmen sind. Darüber hinaus können diese Ergebnisse als Grundlage zur Erarbeitung neuer gesetzlicher Regelungen herangezogen werden. Durch eine Reglementierung der Lichtfunktion für nasse Fahrbahnen könnte eine deutliche Erhöhung der Verkehrssicherheit erwirkt werden.

---

## 3 Systemfunktionsanalyse

---

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an das Gesamtsystem definiert und dargestellt. Sie bestimmen unter anderem die Wahl der benötigten Sensorik. Bisher nicht existente Sensorik muss, basierend auf diesen Vorgaben, konzipiert und entwickelt werden. Neben der Sensorik nimmt vor allem der Scheinwerfer eine entscheidende Rolle ein. Für die Umsetzung der Schlechtwetterlichtfunktion ist eine situative Anpassung der Lichtverteilung in sich ständig ändernden Winkelbereichen erforderlich. Prädestiniert für diese Anwendung sind Matrix- oder Pixellichtsysteme, die eine hinreichend hohe Auflösung im Abblendlichtbereich aufweisen.

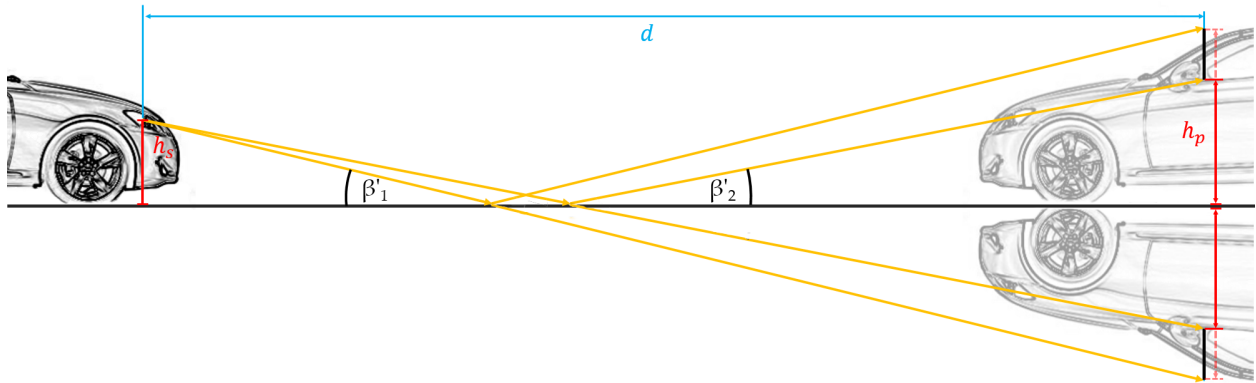
Ziel der zu realisierenden Lichtfunktion ist die Vermeidung einer indirekten Blendung entgegenkommender Fahrer. Diese Blendung entsteht durch Reflexionen an der Fahrbahnoberfläche. Je nasser diese ist, desto spiegelnder ist das Reflexionsverhalten und desto höher fällt daher die Vorwärtsreflexion aus. Um nun den witterungsbedingten, vorwärts reflektierten Anteil wieder zu reduzieren, soll die Lichtstärke in dem Winkelbereich verringert werden, der für diese Reflexionen „verantwortlich“ ist. Dieser gewählte Ansatz basiert auf der Hypothese, dass bei nasser Fahrbahn die Rückwärtsreflexion sehr niedrig ist und daher der Fahrer diese Anpassung der eigenen Lichtverteilung im Abblendlichtbereich selbst nicht wahrnimmt.

Zuerst werden geometrische Zusammenhänge betrachtet, mit denen eine Begegnungssituation beschrieben und der relevante Winkelbereich, den es abzudunkeln gilt, bestimmt werden kann. Anschließend wird auf erste Versuche eingegangen, in denen objektive Messdaten und subjektive Bewertungen von Probanden zur Wahrnehmung der Lichtfunktion gewonnen wurden. Abschließend werden die Anforderungen an das Gesamtsystem definiert. Betrachtet wird im Folgenden ausschließlich die „Entblendung“ entgegenkommender Verkehrsteilnehmer im Personenkraftwagen (Pkw). Die hier verwendeten Methoden lassen sich jedoch auf den Fall vorausfahrender Fahrzeuge (Blendung über Rück- und Seitenspiegel) oder auch Eigenblendung durch die indirekte Beleuchtung von Verkehrsschildern übertragen. Eine Berücksichtigung von Zweiradfahrern (Motorrad oder Fahrrad) ist ebenfalls möglich.

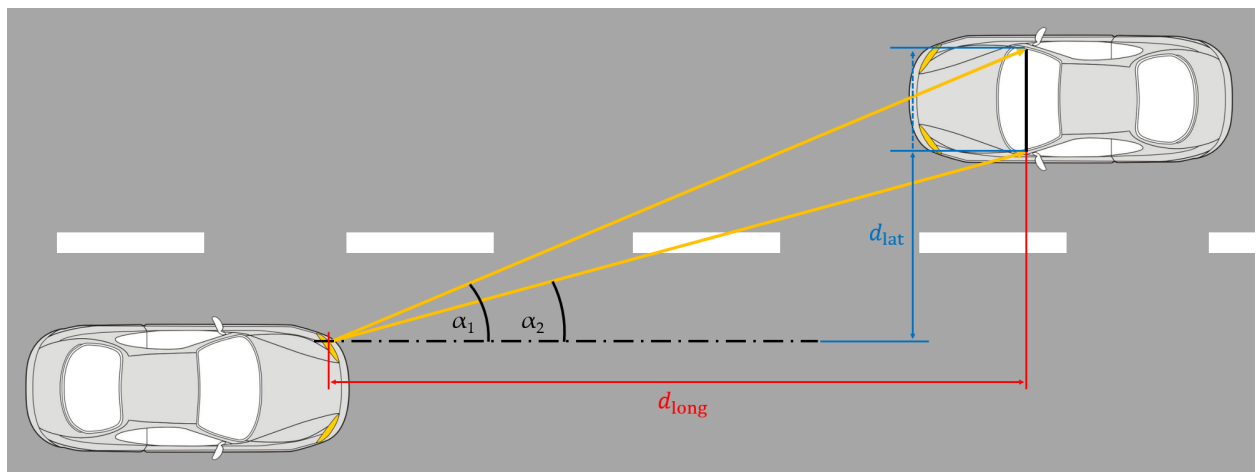
### 3.1 Geometrische Betrachtungen

Für die folgenden Ausführungen wird von einem spiegelnden Reflexionsverhalten ausgegangen, für das Eintritts- und Austrittswinkel betragsmäßig gleich sind. Der Scheinwerfer wird dabei als Punktlichtquelle betrachtet. Aufgrund des Verhältnisses zwischen sinnvollen Messentfernungen und der Ausdehnung der Lichtaustrittsfläche ist hier das

photometrische Entfernungsgesetz anwendbar [Hen02]. Als potenzieller Blendbereich wird die vertikal projizierte Windschutzscheibe des entgegenkommenden Fahrzeuges definiert. Über geometrische Zusammenhänge können die korrespondierenden Horizontal- und Vertikalwinkel der Lichtverteilung berechnet werden, die den besagten Winkelbereich aufspannen. Diese Zusammenhänge sind schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt.



(a) Bestimmung der Vertikalwinkel



(b) Bestimmung der Horizontalwinkel

**Abbildung 3.1:** Geometrische Verhältnisse zur Bestimmung der korrespondierenden Winkel

Demnach berechnet sich der Spiegelwinkel  $\beta'$  für einen Punkt auf der Windschutzscheibe wie folgt:

$$\beta' = -\beta = \arctan\left(\frac{h_s + h_p}{d}\right) \quad (3.1)$$

wobei  $d$  der horizontale Abstand zwischen dem Scheinwerfer und dem gewählten Punkt auf der projizierten Windschutzscheibe,  $h_s$  die Anbauhöhe des Scheinwerfers und  $h_p$  die Höhe des Punktes sind. Zur Bestimmung des vertikalen Winkelbereiches genügt es, die obere und die untere Kante der Windschutzscheibe zu betrachten. Hierbei handelt es sich um die beiden in Abbildung 3.1a eingezeichneten Winkel  $\beta'_1$  und  $\beta'_2$ . Um den Spiegelwinkel in den entsprechenden Vertikalwinkel  $\beta$  der Lichtverteilung zu transformieren, muss

dieser lediglich negiert werden.

Der Horizontalwinkel wird im Scheinwerfer-Koordinatensystem (Scheinwerfer-KOS) angegeben. Dieses ist gegenüber dem Fahrzeug-KOS lediglich verschoben, siehe Kapitel 4. Die x-Achse zeigt in Fahrtrichtung und die y-Achse nach links. Ein positiver Winkel entspricht demnach einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn. Der Horizontalwinkel zu einem Punkt auf der projizierten Windschutzscheibe berechnet sich wie folgt:

$$\alpha = \arctan \left( \frac{d_{\text{lat}}}{d_{\text{long}}} \right) \quad (3.2)$$

wobei  $d_{\text{lat}}$  der laterale Abstand und  $d_{\text{long}}$  der longitudinale Abstand zwischen dem jeweiligen Scheinwerfer und dem gewählten Punkt auf der Windschutzscheibe ist. In diesem Fall ist es ausreichend, nur die Winkel für die linke und die rechte Kante der Windschutzscheibe zu betrachten, um den relevanten, durch diese aufgespannten Bereich zu ermitteln. Dies ist beispielhaft in Abbildung 3.1b für den linken Scheinwerfer anhand der eingezeichneten Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  gezeigt. Für Lichtstärkeverteilungen ist die Vorzeichenkonvention für den Horizontalwinkel ebenfalls gegenteilig, sodass zur Umrechnung eine Negierung erforderlich ist.

## 3.2 Pilotversuche zur Festlegung der Anforderungen

Zu Beginn der Entwicklung der adaptiven Schlechtwetterlichtfunktion für nasse Fahrbahnen standen zwei ungeklärte Fragen im Mittelpunkt:

1. Wie stark wirkt sich eine Abschattung im relevanten Winkelbereich auf die messtechnische Bewertung des Systems im Vergleich zu einem herkömmlichen Abblendlicht aus?
2. Wie wird diese Maßnahme sowohl vom Fahrer selbst als auch vom entgegenkommenden Verkehr wahrgenommen und bewertet?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurde in ersten Versuchen zunächst der Einfluss einer nassen Fahrbahn auf die Beleuchtungsstärkewerte am Auge eines entgegenkommenden Fahrers quantifiziert. Zusätzlich erfolgte die Überprüfung der Wirksamkeit des gewählten Ansatzes zur Reduzierung dieses Einflusses. Wenn das Potenzial nur sehr gering ausfallen sollte, wäre der Aufwand einer Funktionsumsetzung nicht gerechtfertigt. Anschließend wird anhand einer Probandenstudie die subjektive Wahrnehmung der Lichtfunktion aus Sicht von beiden an dem Versuch beteiligten Fahrzeugen erläutert. Diese Untersuchungen und deren Ergebnisse wurden bereits teilweise in [Fis14] vorgestellt.

### 3.2.1 Quantifizierung der Wirksamkeit des Ansatzes

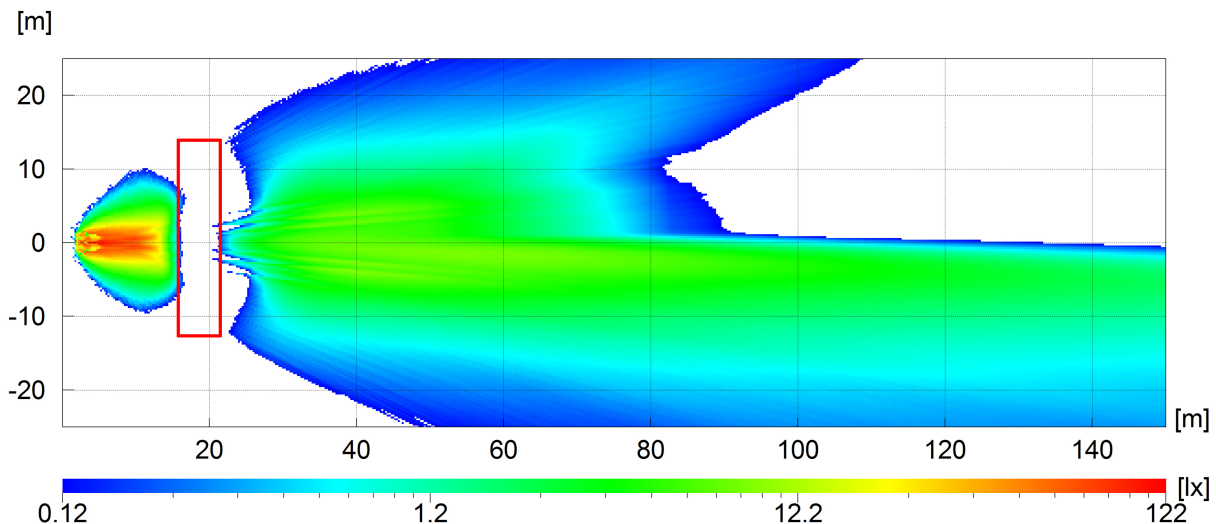
Es wurden zunächst statische Messungen auf der Fahrtrainingsanlage des *ADAC Ostwestfalen-Lippe e.V.* in Paderborn durchgeführt. Diese bietet die Möglichkeit, durch in die Straße eingelassene Fächerstrahldüsen eine ca. 40 m lange Fahrbahn zu bewässern. Die Düsen sind entlang des Mittelstreifens so angeordnet, dass alternierend der rechte und der linke Fahrstreifen bewässert werden kann. Ein solcher Bewässerungsvorgang ist beispielhaft in Abbildung 3.2 gezeigt, wobei in diesem Fall nur ein Fahrstreifen beregnet wird.



**Abbildung 3.2:** Bewässerung einer Fahrbahn auf der Fahrtrainingsanlage des *ADAC Ostwestfalen-Lippe e.V.*

Wichtigste Voraussetzung für die zu betrachtenden Vergleiche ist neben einer bewässerbaren Fahrbahn eine Anpassung der verwendeten Scheinwerfermodule. Zur Reduktion der Beleuchtungsstärkewerte am Auge eines entgegenkommenden Fahrers ist daher eine Blende ausgelegt und angefertigt worden. Die horizontalen und vertikalen Spiegelwinkel für den gewählten Versuchsaufbau ergeben sich für das linke beziehungsweise rechte Modul zu  $\alpha_l = 3,6^\circ$  beziehungsweise  $\alpha_r = 4,9^\circ$  und  $\beta_l \approx \beta_r = -2,1^\circ$ . Dies entspricht jeweils einem longitudinalen Abstand zwischen Reflexionspunkt und Modul von  $d = 17,6$  m. Durch die Blende soll ein annähernd rechteckiger Streifen aus der Lichtverteilung „herausgenommen“ werden. Die Form der Blende wurde simulativ durch eine Strahlrückverfolgung ermittelt. Aufgrund der konstruktiven Verwendung von vereinfachten Geometrien weicht der tatsächlich abgeschattete Bereich von der ursprünglich gewählten Form ab, siehe Abbildung 3.3. Die zugehörige Lichtstärkeverteilung ist im Anhang in Abbildung A.2 zu finden. Die Blende wurde aus mehreren Gründen vorsichtshalber großzügiger dimensioniert: Zunächst ist der zur messbaren Beleuchtungs-

stärke beitragende Lichtstrom nicht auf einen einzelnen Reflexionspunkt zurückzuführen, denn zum einen weist das Beleuchtungsstärkemessgerät eine Detektorfläche in Form eines Kreises mit einem Durchmesser von 30 mm auf und zum anderen handelt es sich bei den Modulen nicht um Punktlichtquellen. Außerdem gilt es das Streulicht im System und die Beugungseffekte an den zusätzlich eingebrachten Kanten zu berücksichtigen, die die Wirkung der Blende reduzieren. Aufgrund des daraus resultierenden größeren „Entblendungsbereiches“ können zusätzlich auch Abweichungen im Rahmen von Messungenauigkeiten für Anbauhöhen und Neigungswinkel ausgeglichen werden.

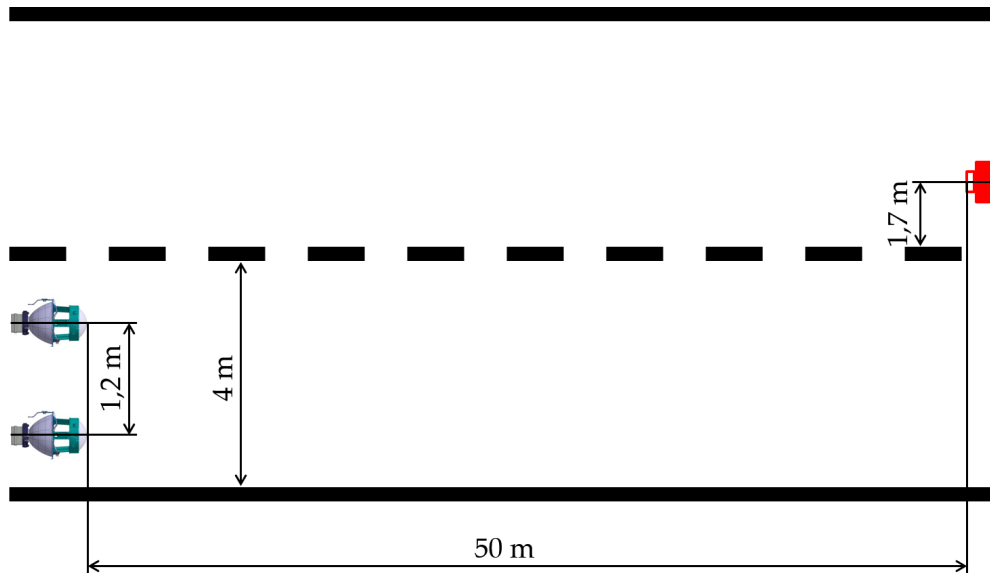


**Abbildung 3.3:** Visualisierung der resultierenden Lichtverteilung als Strahlendiagramm. Rot ist der ursprünglich angestrebte Entblendungsbereich dargestellt

Für den Versuch wurden HELLA Konzern Module (HKM) eingesetzt. Diese existieren für verschiedene Lichtquellen, zum Einsatz kamen die Varianten für H7, Xenon und HB3. Das besondere an den verwendeten Modulen ist die Ausführung der einzelnen Linsen. Diese sind ohne das sogenannte OS-Fenster (engl. overhead sign) gefertigt. Das OS-Fenster wird eingesetzt, um die gesetzlich geforderten Mindestwerte oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) in den Zonen A und B zu erfüllen, siehe zum Beispiel [ECE123]. Diese Mindestwerte werden gefordert, damit eine ausreichende Beleuchtung von Verkehrsschildern gewährleistet ist. Vor allem die häufig auf Autobahnen eingesetzte Überkopfbeschilderung mittels Verkehrszeichenbrücken ist ohne diese Mindestbeleuchtung nicht erkennbar. Fehlt nun dieses OS-Fenster, tritt oberhalb der HDG, abgesehen von unerwünschten Effekten (zum Beispiel Streuung), kein Licht auf. In Abbildung A.1 sind zur Verdeutlichung der Wirkungsweise eines OS-Fensters die Lichtstärkeverteilungen für die beiden unterschiedlichen Ausführungen mit und ohne OS-Fenster dargestellt. Durch den gezielten Verzicht auf das OS-Fenster ist es möglich, näherungsweise nur den indirekten, durch Reflexionen an der Fahrbahn hervorgerufenen Beitrag zu messen. Eine Ausnahme bilden hier die HB3-Module, die nur noch als SAE-Variante (Society of Automotive Engineers) mit OS-Fenster zu bekommen waren. Deswegen wird auf deren Messdaten im Folgenden nicht weiter eingegangen, diese finden sich im Anhang D.1.



Die ersten Messungen erfolgten auf trockener Fahrbahn und dienen somit als Referenz für eine „Schönwettersituation“. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.4 schematisch dargestellt. Es ist eine Begegnungssituation für eine Entfernung von  $d_{\text{long}} = 50 \text{ m}$  statisch nachgestellt worden. Auf dem Gegenfahrstreifen befindet sich ein in Augenhöhe positioniertes Beleuchtungsstärkemessgerät.



**Abbildung 3.4:** Versuchsaufbau zur Quantifizierung der Wirksamkeit des Ansatzes. Links befinden sich die jeweiligen Module, rechts das Beleuchtungsstärkemessgerät [Fis14]

Für diese Untersuchung wurde das digitale Beleuchtungsstärkemessgerät B 510 der Firma LMT mit der Genauigkeitsklasse L (vergleiche [DIN85]) verwendet. Es wurden nacheinander alle Modul-Varianten, das heißt sowohl mit als auch ohne Blende, vermessen. Aufgrund der Wechsel zwischen den verschiedenen Modulen wurde jedes Mal deren Neigung und Ausrichtung neu eingestellt und die jeweilige Einbrenndauer der Lichtquelle beachtet, um für reproduzierbare Verhältnisse zu sorgen. Für die Halogen-Module wurde zum einen die vorgeschriebene Spannung von  $U = 12 \text{ V}$  verwendet, siehe auch [ECE8] und [ECE112]. Zum anderen wurde der Einfluss höherer Lichtströme untersucht, indem die Spannung auf  $U = 14,5 \text{ V}$  angehoben wurde. Verwendung fanden hierfür H7-Glühlampen der Firma *General Electric* mit der Bezeichnung 58520. Zur Vergleichbarkeit wurde die Kennlinie einer solchen Glühlampe aufgenommen. Diese ist im Anhang B zu finden.

Zur Nachbildung einer Schlechtwettersituation wurde die Fahrbahn beregnet. Anfangs erfolgte die Bewässerung für eine Dauer von  $t = 30 \text{ min}$ , um für die nachfolgenden Messdurchläufe die Zeit zur Erreichung eines quasistationären Zustands zu reduzieren. Der Ablauf der Vermessung der einzelnen Varianten gleicht dem für die Trockensituation. Allerdings erfolgte diesmal vor jedem Durchgang eine neue Bewässerung für  $t = 2 \text{ min}$ , um systematische Einflüsse auf die abhängige Variable auszuschließen und somit gleichbleibende Bedingungen zu gewährleisten.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 3.1, jeweils für die trockene und die nasse Fahrbahn, zusammengefasst. Von den angegebenen Beleuchtungsstärken sind bereits die Ergebnisse der durchgeführten Dunkelmessungen subtrahiert worden. Unter einer Dunkelmessung ist in diesem Fall eine Messung bei ausgeschalteten Modulen zu verstehen. Dadurch lassen sich Einflüsse durch die Umfeldhelligkeit (Umfeldleuchtdichte) bestimmen und die Messwerte entsprechend bereinigen.

Ausführung	Beleuchtungsstärke [mlx]	
	trocken	nass
ohne Blende	71	1475
mit Blende	35	90

(a) H7-Module bei  $U = 12\text{ V}$

Ausführung	Beleuchtungsstärke [mlx]	
	trocken	nass
ohne Blende	123	2275
mit Blende	58	135

(b) H7-Module bei  $U = 14,5\text{ V}$

Ausführung	Beleuchtungsstärke [mlx]	
	trocken	nass
ohne Blende	134	2675
mit Blende	51	285

(c) Xenon-Module

**Tabelle 3.1:** Ergebnisse der Beleuchtungsstärkemessungen für die verschiedenen Modulvarianten auf einer trockenen und einer nassen Fahrbahn

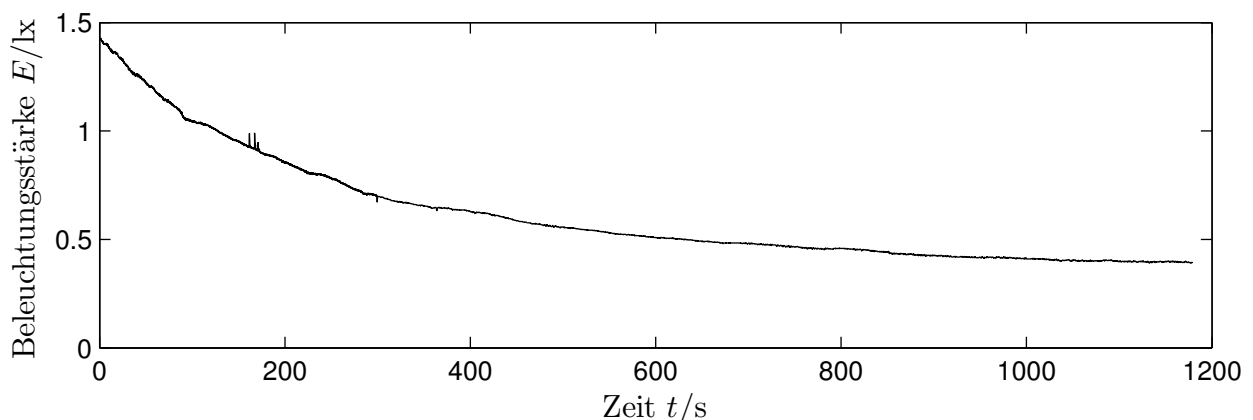
Bei der Betrachtung der Werte fällt zunächst auf, dass diese für die Xenon-Module wie erwartet größer ausfallen, da Gasentladungslampen insgesamt einen höheren Lichtstrom auf der Fahrbahn erzeugen. Deutlich wird zudem das enorme Blendrisiko, das durch die nassen Fahrbahnverhältnisse hervorgerufen wird: Die Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers in 50 m Entfernung steigt durchschnittlich um den Faktor 20 im Vergleich zur Referenz einer trockenen Fahrbahn. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Versuchsparameter decken sich diese Ergebnisse mit denen anderer Untersuchungen, zum Beispiel von Kleinert [Kle13], Rosenhahn [Ros99b] sowie Schmidt-Clausen und Schwenkschuster [SS01].

Es gibt in den gesetzlichen Regelungen keine Begrenzung für die gemessenen Werte, da für die Zulassung von Scheinwerfern nach der jeweils anzuwendenden ECE-Regelung nur der direkte Strahlengang mittels Goniophotometer betrachtet wird. In den Regelungen ist allerdings der Messpunkt B50L auf einem 25 m entfernten Messschirm defi-

niert, der der Augenposition eines 50 m entfernten, entgegenkommenden Fahrers entsprechen soll. Dieser Messpunkt ist gesetzlich reglementiert, für Scheinwerfer mit Halogen-Glühlampen ergibt sich laut [ECE112] ein Grenzwert von  $E_{H25,direkt} = 0,4 \text{ lx}$ , bei Scheinwerfern mit Gasentladungslampen beträgt dieser  $E_{X25,direkt} = 0,5 \text{ lx}$  [ECE98]. Diese Werte gelten für eine Messentfernung von 25 m und für ein einzelnes Modul. Setzt man voraus, dass der gemessene direkte Anteil auf einer trockenen Fahrbahn 95 % beträgt (siehe Abbildung 2.16), ergeben sich umgerechnet auf eine Distanz von 50 m und durch die Hinzunahme eines zweiten Moduls die beiden Grenzen  $E_{H50} = 0,21 \text{ lx}$  und  $E_{X50} = 0,26 \text{ lx}$ . Legt man diese Werte als Vergleich zugrunde, so erhöht sich die gemessene Beleuchtungsstärke unter diesen Voraussetzungen auf über 700 % (Halogen 12 V) beziehungsweise 1000 % (Xenon) des angenommenen, erlaubten Grenzwertes.

Gleichzeitig ist aber auch der positive Einfluss der Blende ersichtlich. Durch diese Maßnahme kann die Beleuchtungsstärke gegenüber der Ausgangssituation deutlich reduziert werden. Für die H7-Module beträgt diese Reduktion circa 94 %, für die Xenon-Module sind es knapp 90 %. Daraus ist eine hohe Wirksamkeit des gewählten Ansatzes abzuleiten und eine Umsetzung der vorgeschlagenen Lichtfunktion als grundsätzlich sinnvoll zu erachten.

In einer zusätzlichen Untersuchung wurde über einen längeren Zeitraum von knapp 20 Minuten der Beleuchtungsstärkeverlauf für diesen Versuchsaufbau betrachtet, um das Abtrocknungsverhalten der Fahrbahn zu charakterisieren. Zu diesem Zweck wurden die H7-Module ohne Blende mit einer Betriebsspannung von  $U = 12 \text{ V}$  verwendet. Über den gesamten Zeitraum erfolgte eine Protokollierung der Messwerte, die in Abbildung 3.5 dargestellt sind. Zu erkennen ist ein exponentieller Verlauf der Abtrocknungskurve. Auch nach der betrachteten Zeitspanne von 20 Minuten sind die Beleuchtungsstärkewerte immer noch knapp doppelt so hoch wie der oben angenommene Grenzwert von  $E_{H50} = 0,21 \text{ lx}$ .



**Abbildung 3.5:** Durch Reflexionen an einer abtrocknenden Fahrbahn erzeugte Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers in 50 m Entfernung, aufgetragen über der Zeit

### 3.2.2 Probandenversuch zur Wahrnehmung der Lichtfunktion

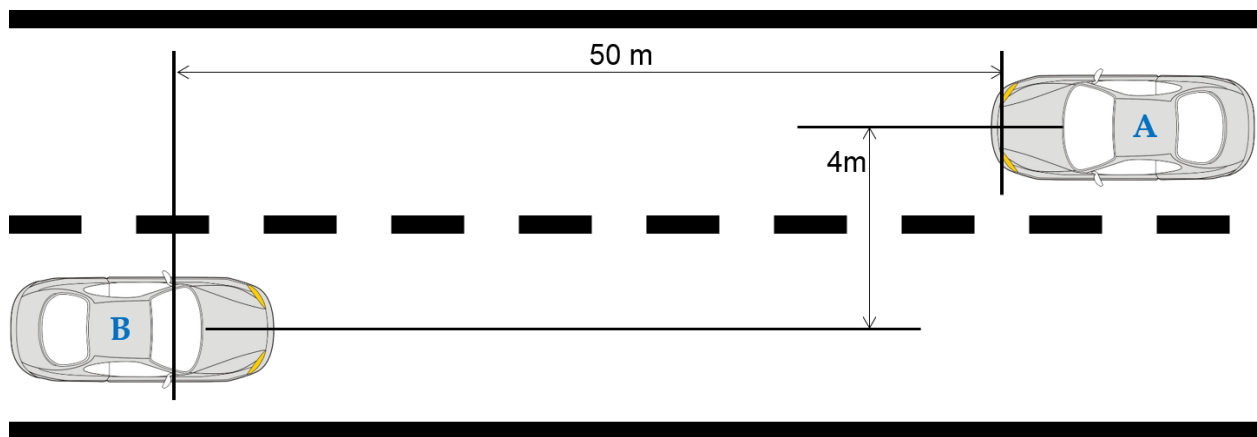
Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Wirksamkeit einer partiellen Abdunkelung der Lichtverteilung zur Reduzierung einer indirekten Blendung untersucht. Hierbei handelte es sich um objektive Messdaten. Interessant ist bei der Bewertung einer Lichtfunktion aber vor allem die subjektive Wahrnehmung der Fahrer selbst, denn durch die Anpassung der Lichtverteilung wird ihnen in bestimmten Bereichen Licht „weggenommen“. In einem solchen Fall ergeben sich unter anderem folgende Fragestellungen:

1. Nimmt der Fahrer die Anpassung der eigenen Lichtverteilung bei einer nassen Fahrbahn wahr?
2. Inwieweit fühlt er sich dadurch gestört?
3. Wie stark wirkt sich die Lichtstärkereduzierung auf das Blendgefühl eines entgegenkommenden Fahrers aus?
4. Entsteht durch diese Entblendung ein störender Eindruck für den Gegenverkehr?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde eine Probandenstudie durchgeführt. Hierfür sollte der Entblendungsbereich möglichst klein gehalten werden, weshalb die bereits verwendeten Blenden in dieser Form nicht zielführend waren. Dafür hätten diese deutlich verkleinert werden müssen. Da sich der Entblendungsbereich allerdings isoliert im Vorfeld befindet, ergibt sich hier die Schwierigkeit der Befestigung der Blende, ohne zusätzliche, ungewollte Abschattungen in der Lichtverteilung zu erzeugen. Die Verwendung von Blenden ist aber nur eine Möglichkeit zur konstruktiven Umsetzung der angestrebten Lichtfunktion. Aufgrund der rasanten Entwicklung der LED-Technologie erscheinen Matrix-Scheinwerfer als attraktive Alternative zum Einsatz von Blenden und werden daher im Folgenden als Lösungskonzept weiter verfolgt. Bis dato existieren allerdings keine Matrix-Scheinwerfer, die das Vorfeld mit einer hinreichend hohen Anzahl an LEDs ausleuchten. Vielmehr sind alle bisher entwickelten Systeme für die Lichtfunktion blendfreies Fernlicht ausgelegt, die eine hohe Auflösung nur im Reichweite-/Fernlichtbereich besitzen. Das für die Studie verwendete System besteht aus drei Zeilen: eine für das Vorfeld, eine für die Asymmetrie und eine für das Fernlicht. Der Aufbau des Moduls und beispielhafte Lichtverteilungen sind in Anhang C zu finden. Das Vorfeld wird durch ein zusätzliches Basismodul aufgefüllt und verbreitert. Die mittlere Zeile zur Erzeugung der Asymmetrie weist als einzige horizontal und vertikal eine Auflösung von  $1^\circ$  auf. Daher wird diese zur Anpassung der Lichtfunktion genutzt. Das gesamte Modul wurde mit der Basis geneigt, um eine Anpassung in dem benötigten vertikalen Bereich vornehmen zu können. Die Bestromung der übrigen LEDs wurde so angepasst, dass sich eine konforme Abblendlichtverteilung ergab. Ursprünglich war angedacht, die aufgrund der stärkeren Neigung verringerte Reichweite durch ein zusätzliches Reichweitemodul zu erhöhen. Davon wurde aus mehreren Gründen wieder abgesehen: Zum einen wirkte das Erscheinungsbild mit insgesamt sechs eingeschalteten Modulen aus Sicht des Gegenverkehrs sehr befremdlich. Zum anderen hat sich in einem Vorversuch gezeigt, dass der

Fahrer den Unterschied zwischen ein- und ausgeschalteter Reichweite nicht wahrnimmt.

Der Versuchsaufbau weicht nur geringfügig von dem zur Messung der Beleuchtungsstärken ab, siehe Abbildung 3.6, und fand ebenfalls auf der Fahrtrainingsanlage des ADAC statt. Es wurde wieder eine Begegnungssituation in 50 m Entfernung statisch nachempfunden. In diesem Fall stehen sich allerdings zwei Fahrzeuge gegenüber, die mittig auf ihrem Fahrstreifen positioniert sind. Fahrzeug A ist mit den Matrix-Scheinwerfern ausgerüstet, nachfolgend auch *Fahrzeug mit adaptivem Lichtsystem* genannt, Fahrzeug B mit einem LED-Scheinwerfer, nachfolgend auch als *entgegenkommendes Fahrzeug* bezeichnet.



**Abbildung 3.6:** Versuchsaufbau zur Durchführung der Probandenstudie

Entblendet wurde die Windschutzscheibe des entgegenkommenden Fahrzeuges. Die maximale Breite der Windschutzscheibe beträgt 1,49 m, die projizierte Höhe 0,51 m. Der vertikale Abstand zwischen Straße und Mittelpunkt der projizierten Windschutzscheibe misst 1,1 m. Resultierend aus den gewählten Geometrien und der begrenzten Auflösung ergibt sich für jeden Scheinwerfer ein zu dimmender Winkelbereich von  $\Delta\alpha = 3^\circ$  (horizontal) und  $\Delta\beta = 1^\circ$  (vertikal). Die horizontale Lage des Bereiches unterscheidet sich jedoch aufgrund der unterschiedlichen Positionen der beiden Scheinwerfer leicht.

Die einzelnen Gruppen bestanden aus Gründen der Durchführungsökonomie aus jeweils vier Probanden, mit denen gleichzeitig die Fahrer- und Beifahrersitze beider Fahrzeuge besetzt wurden. Jede Gruppe absolvierte sechs Durchgänge, wobei nach dreien die Fahrzeuge und die jeweilige Sitzposition innerhalb des „Pärchens“ getauscht wurde. In jedem Durchgang wurde mit drei verschiedenen Lichtverteilungen gearbeitet, die für jeweils 10 Sekunden aktiv waren. Der Übergang zwischen den einzelnen Verteilungen erfolgte nahtlos:

**LV 1:** Normale Abblendlichtverteilung

**LV 2:** Relevante Winkelbereiche der Abblendlichtverteilung auf 50 % gedimmt

**LV 3:** Relevante Winkelbereiche der Abblendlichtverteilung auf 0 % gedimmt

Die Reihenfolge der drei Lichtverteilungen in einem Durchgang ist für jede Gruppe zufällig bestimmt worden, wobei eine zusätzliche Einschränkung galt: Die Bewertung einer Lichtverteilung sollte nicht durch einen möglichen Einfluss des Abtrocknungsvorganges verfälscht werden. Aus diesem Grund wurden den Probanden insgesamt drei aufeinanderfolgende Durchgänge pro Fahrzeug gezeigt. In diesen aufeinanderfolgenden Durchgängen musste jede Lichtverteilung jeweils einmal in jedem der drei möglichen Zeiträume aktiv sein. Vor jedem Durchgang erfolgte eine Bewässerung der Fahrbahn, um gleichbleibende Bedingungen zu gewährleisten. Diese Pause wurde von den Probanden zur Beantwortung der Fragen bezüglich des vorherigen Durchganges genutzt. Die anschließende Auswertung des Versuchs hat ergeben, dass es innerhalb der 30 Sekunden eines Durchganges zu keinem Einfluss durch die Abtrocknung der Fahrbahn kam. Da jede Versuchsperson somit jeden der drei Zustände jeweils dreimal in beiden Fahrzeugen bewertet hat, kann durch eine nachträgliche Mittelung die Streuung des Fehleranteils verringert werden. Die zu bearbeitenden Aufgabenstellungen werden im Folgenden näher beschrieben.

### 3.2.2.1 Aufgabenstellungen an die Probanden

Zu Beginn jedes Versuchs gab es für jede Gruppe eine Einführung, in der unter anderem der Aufbau und der Ablauf erklärt wurden. Der genaue Wortlaut der Instruktion ist im Anhang E.1 dokumentiert.

Die Fragebögen waren in drei Abschnitte unterteilt. Die ersten beiden Teile sind fahrzeugspezifische Aufgabenstellungen, die sich je nach Reihenfolge der Fahrzeuge des jeweiligen Probanden in der Anordnung unterscheiden. Der letzte Abschnitt behandelt allgemeine Fragen und Angaben. Der Originalfragebogen für eine spezifische Fahrzeurreihenfolge ist in Anhang E.1 zu finden. Im Folgenden werden die wichtigsten Aufgaben und Fragen herausgegriffen, auf deren Auswertung anschließend eingegangen wird.

#### **Aufgabenstellung für das Fahrzeug mit adaptivem Lichtsystem**

Die Ausführungen beziehen sich auf die an die Probanden gestellten Aufgaben, die im Fahrzeug mit dem adaptiven Lichtsystem sitzen. In diesem Fall ist es entscheidend, ob die Teilnehmer einen Unterschied zwischen den oben genannten, unterschiedlichen Lichtverteilungen erkennen. Falls ja, könnten sie sich durch die partielle Abschattung gestört fühlen, was eine Akzeptanz der Lichtfunktion negativ beeinflussen würde. Aus diesem Grunde sollte eine Bewertung der Ausleuchtung für alle drei Verteilungen vorgenommen werden:

*„Als wie gut empfanden Sie die Straße bei den einzelnen Lichtverteilungen jeweils ausgeleuchtet?“*

Die Beurteilung der Ausleuchtung einer Lichtverteilung erfolgte zwischen den Ankerpunkten „sehr schlecht“ (1) und „sehr gut“ (5) auf einer gleichabständigen, fünfstufigen Skala. Bei drei Lichtverteilungen pro Durchgang und drei Durchgängen waren folglich neun Bewertungen vorzunehmen. Abschließend sollte einmalig das subjektive Blend-

empfinden aufgrund des entgegenkommenden Fahrzeuges bewertet werden:

*„Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des „entgegenkommenden“ Fahrzeugs auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich)“*

Hierfür wurde die neunstufige de-Boer-Skala verwendet. In ihrer ursprünglichen Form erfolgt die Bewertung einer Blendung von 1 („unerträglich“) bis 9 („kaum merklich“). Dies ist allerdings kontraintuitiv, da man eine höhere Zahl unwillkürlich mit einer stärkeren Blendung verbindet. Aus diesem Grund wurde die Skala für den Fragebogen invertiert.

### **Aufgabenstellung für das entgegenkommende Fahrzeug**

Aus Sicht des entgegenkommenden Fahrzeuges ist vor allem die psychologische Blendung der Insassen in Abhängigkeit der jeweiligen Lichtverteilung von Interesse. Daher wurde auch hier nach dem subjektiven Blendempfinden gefragt, wofür ebenfalls die invertierte de-Boer-Skala herangezogen worden ist.

Zusätzlich erfolgte eine Beurteilung der Sichtverhältnisse:

*„Bitte bewerten Sie die Sichtverhältnisse bei den jeweiligen Lichtverteilungen.“*

Diese Bewertung wurde auf der bereits genannten fünfstufigen Skala vorgenommen. Sie diente der Absicherung der vorherigen Blendbewertung und sollte darüber hinaus Hinweise auf einen möglichen Störeinfluss durch die Schlechtwetterlichtfunktion auf den Gegenverkehr geben.

### **Allgemeine Fragen**

Der allgemeine Teil des Fragebogens umfasste „Basisinformationen“ über die einzelnen Probanden wie Alter, Geschlecht und das Tragen einer Sehhilfe. Außerdem gab es drei Aussagen, die bewertet werden sollten:

*„Bei widrigen Bedingungen fühle ich mich häufig von entgegenkommenden Fahrzeugen geblendet“*

*„Es ist mir wichtig, andere Fahrer bei widrigen Wetterbedingungen nicht zu blenden“*

*„Ich würde mir ein solches System als Sonderzubehör kaufen, wenn es mein Budget erlaubt“*

Die Bewertung wurde über eine fünfstufige Skala zwischen den Ankerpunkten „Stimme gar nicht zu“ (1) und „Stimme vollkommen zu“ (5) vorgenommen.

### 3.2.2.2 Auswertung der Studie

An der Studie nahmen insgesamt 21 Probanden teil. Das Verhältnis zwischen Männern und Frauen betrug 2:1. Der älteste Proband war 65 Jahre, der jüngste 24 Jahre alt. Das Durchschnittsalter belief sich auf 31 Jahre. Vorab wurden die Einflüsse Sitzposition, Reihenfolge der Fahrzeuge und Sehhilfe kontrolliert, eine signifikante Abhängigkeit konnte mit statistischen Tests nicht nachgewiesen werden. Die Unabhängigkeit der Blendung von der Sitzposition wurde ebenfalls schon von Zydek et al. [Zyd+14] mittels des Klett-witz-Levelling-Tests [ZHK13] aufgezeigt.

In Tabelle 3.2 sind die Ergebnisse der Bewertung der eigenen Ausleuchtung aus Sicht des Fahrzeuges mit adaptivem Lichtsystem zusammengefasst. Die Mittelwerte der Beurteilungen der einzelnen Lichtverteilungen unterscheiden sich nur geringfügig. Eine Varianzanalyse belegt, dass diese Abweichungen nicht signifikant sind ( $p = 0.83$ ).

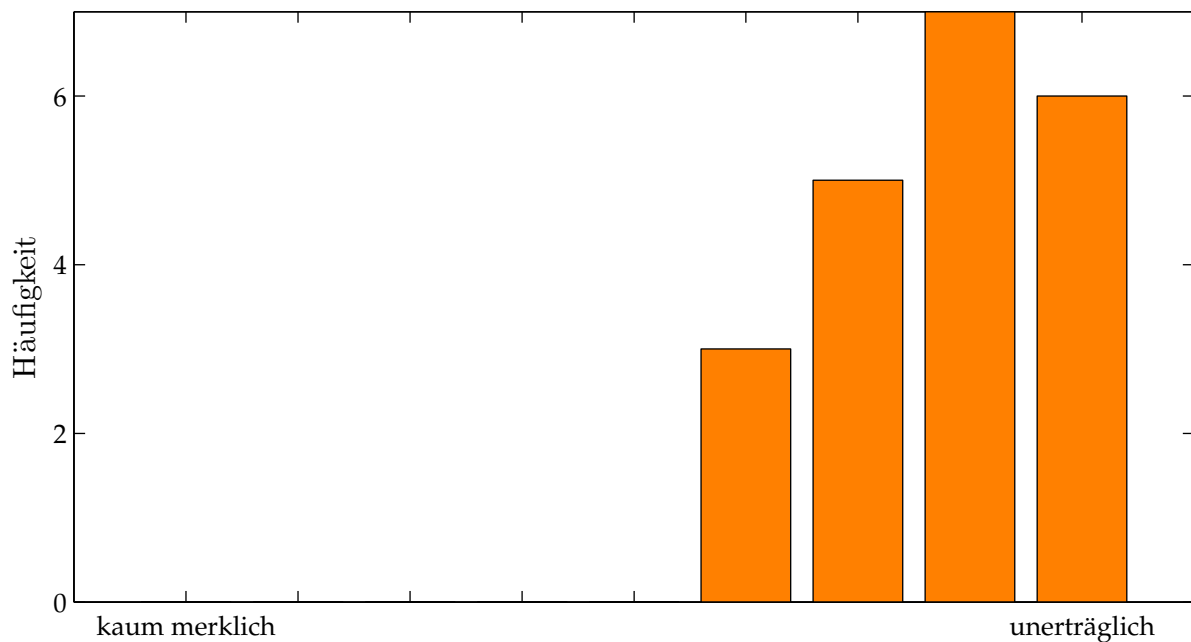
Lichtverteilung	Mittelwert	Standardabweichung
LV 1	2,68	0,89
LV 2	2,67	0,97
LV 3	2,65	0,96

**Tabelle 3.2:** Bewertung der eigenen Ausleuchtung (1: sehr schlecht, 5: sehr gut)

Für die Probanden war der Unterschied zwischen den einzelnen Lichtverteilungen nicht zu erkennen. Auffällig war, dass einige Probanden, die zuerst in dem entgegenkommen- den Fahrzeug saßen, versucht haben, die dort wahrgenommenen Unterschiede (s.u.) auch im Fahrzeug mit dem adaptiven System wiederzuerkennen. Da ihnen dies nicht möglich war, haben sich die in der Bewertung angegebenen, kleinen Differenzierungen zwischen den einzelnen Verteilungen im Mittel über alle drei Durchgänge wieder aufgehoben. Neben der relativen ist auch die absolute Betrachtung der Werte aufschlussreich. Demnach liegt die durchschnittliche Zufriedenheit mit der eigenen Ausleuchtung der Fahrbahn für diese nächtliche Begegnungssituation auf einer nassen Fahrbahn in der unteren Hälfte der eingesetzten Skala. Daraus ließe sich der Wunsch nach einer Verbesserung der Lichtverteilung unter diesen Bedingungen ableiten.

Gleichzeitig stuften die Probanden die Blendung durch das entgegenkommende Fahrzeug, die hauptsächlich durch Reflexionen auf der nassen Fahrbahn hervorgerufen wurde, als sehr hoch ein, wie das Histogramm in Abbildung 3.7 belegt.





**Abbildung 3.7:** Histogramm zur Bewertung der Blendung aus dem Fahrzeug mit adaptivem System

In der Bewertung aus dem entgegenkommenden Fahrzeug spiegeln sich deutlich wahrnehmbare Unterschiede zwischen den einzelnen Lichtverteilungen wider, die für die psychologische Blendung in Tabelle 3.3 zusammengefasst sind. Hierbei wurde die im Fragebogen verwendete inverse de-Boer-Skala wieder auf die ursprüngliche Skalierung umgerechnet. Für die normale Abblendlichtverteilung (LV 1) sind diese im Vergleich zu den Angaben aus dem anderen Fahrzeug fast identisch, was auf vergleichbare Sichtverhältnisse in beiden Fahrzeugen schließen lässt.

Lichtverteilung	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
LV 1	1	5	2,2	1,14
LV 2	1	6	3,9	1,26
LV 3	5	9	7,0	1,24

**Tabelle 3.3:** Bewertung der psychologischen Blendung (1: unerträglich, 9: kaum merklich)

Mit einer Varianzanalyse kann gezeigt werden, dass sich die Mittelwerte signifikant unterscheiden ( $p = 0.000$ ) und somit vom Gegenverkehr das Umschalten der Lichtverteilungen deutlich erkannt wurde. Diese subjektiven Absolutwerte untermauern noch einmal den in Abschnitt 3.2.1 messtechnisch nachgewiesenen Nutzen. Bei einer Dimmstufe von 0% (LV 3), also der kompletten Ausschaltung der entsprechenden LEDs, geht das durchschnittliche Blendgefühl der Probanden deutlich zurück. Eine Dimmstufe von 50% hat keinen so spürbaren Einfluss, auch wenn die Bewertung im Mittel um fast 2 Skalenstufen abnimmt. Darüber hinaus empfanden einige Probanden die Blendung auch bei dieser Lichtverteilung noch als unerträglich, sodass sich für die Realisierung der Licht-

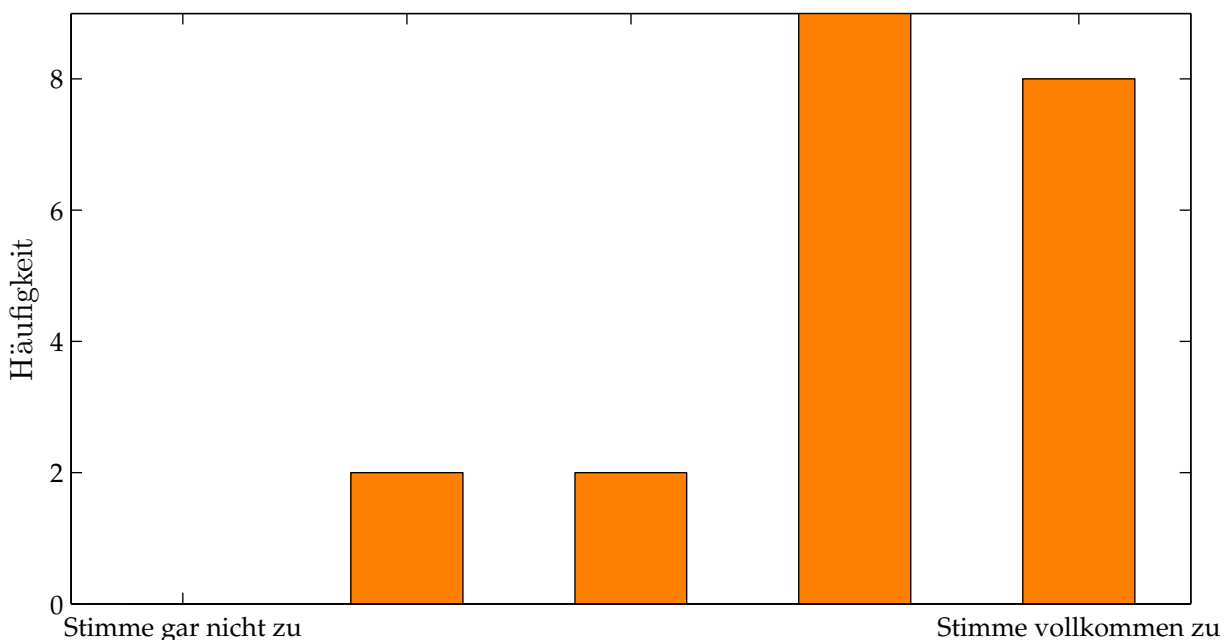
funktion eine komplette Abschattung des relevanten Winkelbereiches (LV 3) empfiehlt.

Auch die Bewertung der Sichtverhältnisse weist signifikante Unterschiede ( $p = 0.000$ ) zwischen den einzelnen Lichtverteilungen auf, siehe Tabelle 3.4. Die relativen Angaben korrelieren wie erwartet mit dem Blendgefühl der Probanden. Hier bestätigt sich ebenfalls der geringere Nutzen einer Dimmstufe von 50 %, da die Sicht als nur geringfügig besser empfunden wurde. Die Mittelwerte liegen für LV 1 und LV 2 in der unteren Hälfte der eingesetzten Skala, was auf eine Unzufriedenheit mit den Sichtbedingungen unter diesen Verhältnissen schließen lässt. Durch die vorgeschlagene Lichtfunktion lässt sich dieser Zustand klar verbessern.

Lichtverteilung	Mittelwert	Standardabweichung
LV 1	1,9	0,94
LV 2	2,4	0,85
LV 3	3,6	0,71

**Tabelle 3.4:** Bewertung der Sichtverhältnisse (1: sehr schlecht, 5: sehr gut)

Unter den allgemeinen Fragen ist in erster Linie die Bewertung der Aussage interessant, ob man sich unter widrigen Bedingungen häufig von entgegenkommenden Fahrzeugen geblendet fühlt. Das entsprechende Ergebnis ist in Abbildung 3.8 als Histogramm dargestellt. Demnach fühlt sich der Großteil der Probanden in diesen Situationen geblendet, was den Nutzen einer solchen Lichtfunktion unterstreicht.



**Abbildung 3.8:** Histogramm zur Bewertung der Aussage „Bei widrigen Bedingungen fühle ich mich häufig von entgegenkommenden Fahrzeugen geblendet“

Die Probanden wurden weiterhin nach ihrer altruistischen Einstellung befragt, da es sich bei diesem adaptiven Schlechtwetterlicht für nasse Fahrbahnen um eine Funktion handelt, die in erster Linie einen Vorteil für den Gegenverkehr und nicht für den Fahrer selbst bringt. Der überwiegenden Mehrheit ist es demnach wichtig, den Gegenverkehr nicht zu blenden und der Großteil wäre darüber hinaus auch dazu bereit, sich ein solches System als Sonderzubehör zu kaufen, vorausgesetzt das Budget erlaubt diese zusätzliche Anschaffung. Die hierzu gehörenden Histogramme sind in Anhang E.2 in den Abbildungen E.1 und E.2 zu finden.

### 3.3 Anforderungen an das Gesamtsystem

Im Folgenden wird auf die Anforderungen eingegangen, die an die einzelnen Komponenten des Gesamtsystems gestellt werden. Bei diesen Komponenten handelt es sich um die benötigten Sensoren und einen Scheinwerfer, mit dem die eigentliche Lichtfunktion realisiert werden kann. In den weiteren Ausführungen wird vom Einsatz eines Matrix-Scheinwerfers ausgegangen, der im Abblendlichtbereich eine hinreichend hohe Auflösung zur Manipulation der Lichtverteilung aufweist.

#### 3.3.1 Sensorik

##### 3.3.1.1 Detektion anderer Verkehrsteilnehmer

Zur Umsetzung der Lichtfunktion sind Informationen über andere Verkehrsteilnehmer essenziell, da auf diese reagiert und die Lichtverteilung entsprechend angepasst werden soll. Die notwendigen Stellgrößen sind die sich aus der Situation ergebenden horizontalen und vertikalen Winkelbereiche, die den Entblendungsbereich für ein entgegenkommendes Fahrzeug aufspannen. Aus den Gleichungen (3.1) und (3.2) ist abzuleiten, dass hierfür der longitudinale und laterale Relativabstand zum Fahrzeug oder alternativ der relative Abstand und der entsprechende Horizontalwinkel benötigt werden.

Da nicht nur ein einziger Punkt zu entblenden ist, sondern vorzugsweise die gesamte Windschutzscheibe, wird eine Angabe zu deren Breite und Höhe benötigt. Dadurch kann der abzuschattende Bereich sinnvoll und situationsabhängig (fahrzeugabhängig) abgesteckt werden. Dafür ist es vorteilhaft, die relative Orientierung des anderen Fahrzeuges zu kennen. Diese kann zum Beispiel aus der absoluten Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung des entgegenkommenden Fahrzeuges berechnet werden, siehe auch Kapitel 4.1.

Erforderlich ist weiterhin, dass eine Detektion der Bewegungsrichtung des Objektes erfolgt, da zwischen entgegenkommenden und vorausfahrenden Fahrzeugen differenziert werden muss. Außerdem ist eine Klassifizierung der Fahrzeugart sinnvoll, da sich beispielsweise die Anbauhöhen und die Abmessungen einer Windschutzscheibe für Pkw und Lastkraftwagen (Lkw) voneinander unterscheiden.

Um die benötigten Sicherheiten (Vorhalte) und damit den Entblendungsbereich so gering wie möglich zu halten, sollten die jeweiligen Messwerte sehr präzise sein. Um den zeitlichen Einfluss zu minimieren, ist auf eine möglichst kurze Zykluszeit der Sensorik zu achten.

Das benötigte horizontale Sichtfeld der Sensorik wird durch den kürzesten Begegnungsabstand bestimmt. Nach Rosenhahn [Ros99b] steigt die Beleuchtungsstärke am Auge des Fahrers mit abnehmendem Abstand deutlich an und erreicht ihr Maximum bei circa 15 m, vergleiche Abbildung 2.12. Eine Detektion bis zu diesem longitudinalen Abstand ist also mindestens erforderlich, besser sogar sind kürzere Abstände. Bei der Annahme einer Landstraße mit einer Breite von 8 m kann die maximale laterale Entfernung zwischen Sensor und linker Seite des entgegenkommenden Fahrzeuges – für diese Betrachtung soll sich das Fahrzeug folglich vollständig im Sichtfeld befinden – annähernd auf  $d_{\text{lat,max}} = 7$  m festgelegt werden. Eine symmetrische Ausrichtung zur longitudinalen Achse vorausgesetzt, ergibt sich das notwendige Sichtfeld  $\omega_{\text{max}}$  dann zu

$$\omega_{\text{max}} = 2 \cdot \arctan \left( \frac{d_{\text{lat}}}{d_{\text{long}}} \right) = 2 \cdot \arctan \left( \frac{7}{15} \right) = 50,03^\circ \quad (3.3)$$

Das benötigte Sichtfeld nimmt für kürzer werdende Abstände schnell zu. Bei einem Abstand von  $d_{\text{long}} = 10$  m beträgt dieses bereits fast  $70^\circ$ . Das Sichtfeld begrenzt also, wie lange Objekte verfolgt und damit auch sicher entblendet werden können.

Die maximale Reichweite des Sensors kann theoretisch über die geometrischen Faktoren Anbauhöhe des Scheinwerfers  $h_s$ , Vorneigung des Scheinwerfers und minimale Höhe der projizierten Windschutzscheibe  $h_{\text{pmin}}$  bestimmt werden. Die übliche Vorneigung eines Scheinwerfers beträgt 1 %, was einem vertikalen Winkel von  $\beta_{\text{max}} = -0,57^\circ$  entspricht. Mit diesem Winkel kann der letztmögliche Reflexionspunkt bestimmt werden, der von einer Abblendlichtverteilung über die Fahrbahn zur Windschutzscheibe gelangt, sodass sich hieraus die benötigte Reichweite  $r_{\text{max}}$  des Sensors berechnen lässt. Diese beträgt für eine Anbauhöhe von  $h_s = 0,65$  m und einer minimalen Höhe der Windschutzscheibe von  $h_{\text{pmin}} = 1$  m

$$r_{\text{max}} = \frac{h_s + h_{\text{pmin}}}{\tan(-\beta_{\text{max}})} = 165,85 \text{ m} \quad (3.4)$$

Bis zu dieser Entfernung kann dementsprechend eine Entblendung der gesamten Windschutzscheibe gewährleistet werden.

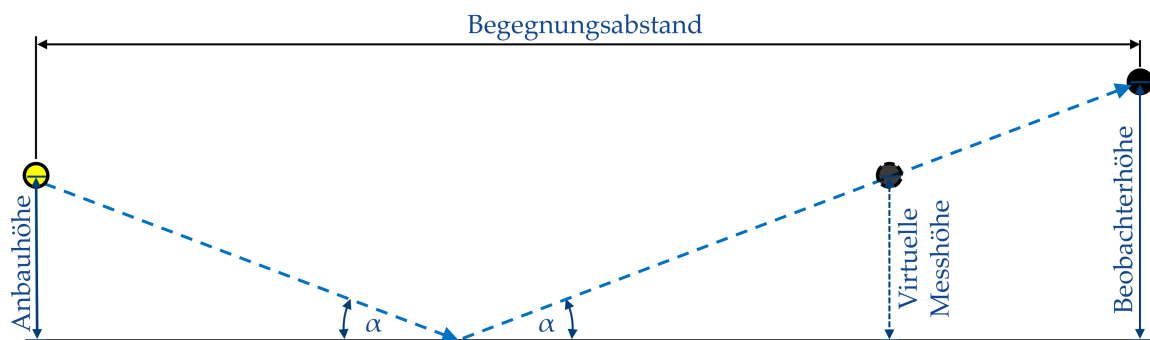
### 3.3.1.2 Witterungsverhältnisse

Für die Umsetzung des Schlechtwetterlichtes wird ein Sensorsystem zur dynamischen Messung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn genutzt, das Kordt [Kor13] entwickelt hat und bereits in [FK14] kurz beschrieben wurde.

An dieser Stelle wird auf die an das System gestellten Anforderungen näher eingegangen. Das System selbst ist im Bereich des Fahrzeugunterbodens angebracht und besteht

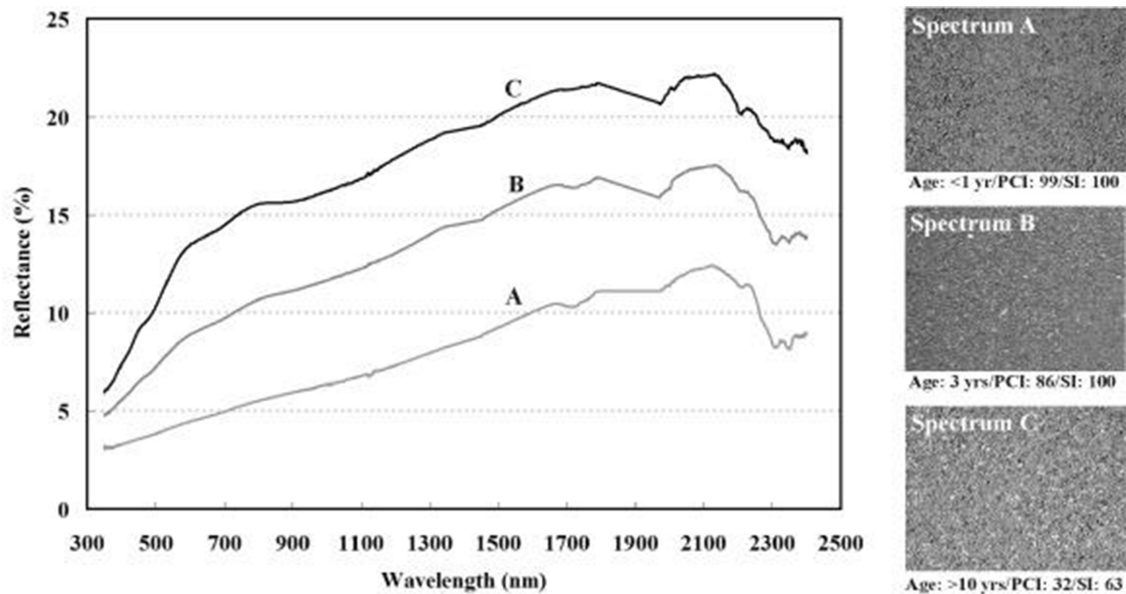
aus einem Lichtmodul sowie zwei Sensoreinheiten zur Messungen der Vorwärts- und der Rückwärtsreflexion. Daher ist es wichtig, für genügend Abstand zum befahrenen Untergrund zu sorgen. Eine Norm zur minimalen Bodenfreiheit gibt es nicht, im Merkblatt 751 des VdTÜV [VdT08] wird allerdings die Empfehlung gegeben, die Bodenfreiheit so ausulegen, dass Hindernisse mit einer Höhe von 110 mm ohne Beschädigung überfahren werden können.

Die Messgeometrie soll auf reale Beleuchtungssituationen im Straßenverkehr übertragen werden können. Eine solche Situation ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Einflussgrößen Anbauhöhe der Scheinwerfer, Beobachterhöhe beziehungsweise Augenhöhe eines entgegenkommenden Fahrers und Entfernung zwischen Scheinwerfer und Beobachter bestimmen die für die jeweilige Begegnungssituation charakteristischen Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel, die es für das Sensorsystem umzusetzen gilt. Die äquivalenten Größen im System sind dementsprechend die Anbauhöhen der Lichtquelle und der Sensoren sowie die Fahrzeuglänge. Bei einer Integration des Systems in den Unterboden eines Fahrzeuges ist es zweckmäßig, alle Anbauhöhen gleich zu wählen. Die Übertragbarkeit auf eine reale Situation ist durch die Einführung des virtuellen Messpunktes in Abbildung 3.9 gegeben. Da die Anbauhöhen durch die Fahrzeuggeometrie vorgegeben sind, ergibt sich aus dem Anbringungsort automatisch auch die nachstellbare Begegnungssituation.



**Abbildung 3.9:** Schematische Darstellung der geometrischen Zusammenhänge einer realen Begegnungssituation. Zusätzlich wurde ein virtueller Messpunkt eingezeichnet

Gemessen werden soll nur der Anteil des sichtbaren Spektrums, den ein Fahrer wahrnehmen kann. Daher ist eine Anpassung der Sensoren an die Empfindlichkeit des Auges zu fordern. Des Weiteren ist die Fahrbahn einem spektralen Reflexionsverhalten unterworfen [Her04], siehe Abbildung 3.10. Die Wahl der Lichtquelle respektive des Spektrums wirkt sich daher merklich auf das Messergebnis aus. Dieser Einfluss kann allerdings durch die Verwendung einer Lichtquelle mit einem breitbandigen Spektrum und der Betrachtung des integralen Reflexionsgrades nahezu eliminiert werden, wenn das Messgerät an die Empfindlichkeit des menschlichen Auges angepasst ist [Boe+09].



**Abbildung 3.10:** Spektrale Abhängigkeit des Reflexionsgrades von Asphalt unterschiedlichen Alters [Her04]

Die Messung darf nicht durch Störgrößen, wie sie zum Beispiel die Scheinwerfer anderer Fahrzeuge darstellen, beeinflusst werden. Dies muss durch geeignete Maßnahmen ausgeschlossen werden. Es gilt den Messbereich des jeweiligen Sensors an mögliche Witterungseinflüsse anzupassen. Nach ersten Voruntersuchungen wurde der Messbereich für den Rückwärtsreflexionssensor zu  $[0 \text{ lx}; 40 \text{ lx}]$  und der für den Vorwärtsreflexionssensor zu  $[0 \text{ lx}; 400 \text{ lx}]$  gewählt [Kor13]. Um eine Sättigung der Sensoren zu vermeiden, wurde hier der Einfluss von Störlichtquellen berücksichtigt.

### 3.3.2 Scheinwerfer

Wie bereits eingangs dieses Kapitels erwähnt, soll zur Umsetzung der Lichtfunktion ein Matrix-Scheinwerfer mit einer hinreichend hohen Auflösung respektive Anzahl an LEDs im Abblendlichtbereich eingesetzt werden. Im Folgenden werden die Anforderungen an einen solchen Scheinwerfer dargelegt. Hierbei handelt es sich um die Bestimmung der Winkelbereiche, in denen eine Anpassung der Lichtverteilung möglich sein muss. Des Weiteren wird die Frage nach der benötigten Auflösung, also dem horizontalen und vertikalen Winkelbereich, der jeweils von einem Element (LED-Chip mit entsprechender Optik) des Matrix-Scheinwerfers beeinflusst werden kann, untersucht.

#### 3.3.2.1 Winkelbereich

Eine wesentliche Anforderung an den Scheinwerfer ist der Winkelbereich, in dem eine Anpassung der Lichtverteilung zur Umsetzung der Schlechtwetterlichtfunktion erforderlich ist. Dieser ergibt sich situativ aus den Parametern Fahrbahngeometrie, Positionen der beiden am Passiervorgang beteiligten Fahrzeuge, Breite und Höhe der projizier-

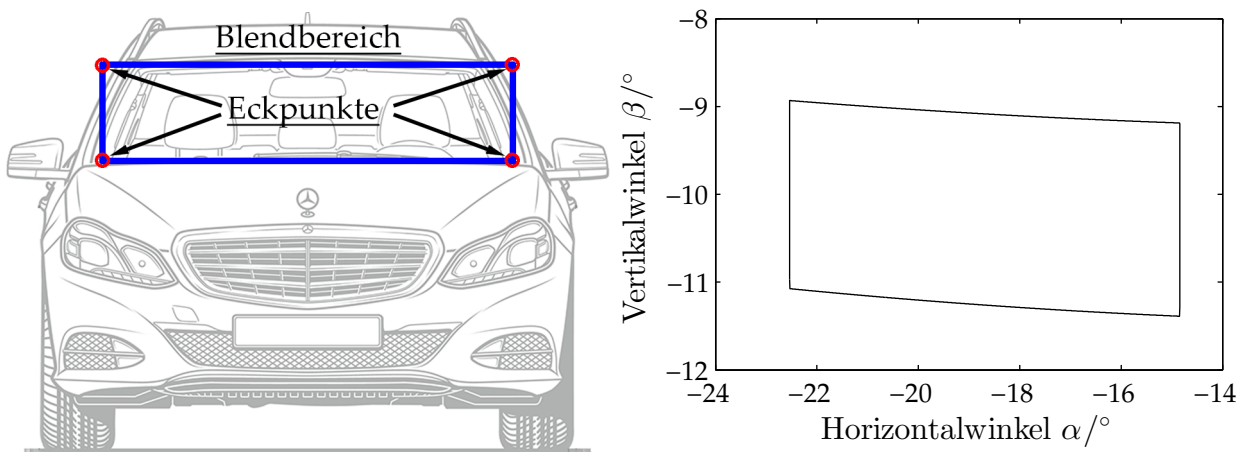
ten Windschutzscheibe des entgegenkommenden Fahrzeuges sowie die Anbaupositionen der Scheinwerfer, deren Lichtverteilungen angepasst werden sollen. Unter Fahrbahngeometrie ist hier die Unterscheidung zwischen einer Geraden, einer Links- und einer Rechtskurve sowie die Fahrbahnbreite zu verstehen.

Um einen Überblick über die auftretenden horizontalen und vertikalen Winkelbereiche für Begegnungssituationen zu bekommen, wurden diese theoretisch berechnet. Dafür sind einige Vereinfachungen vorgenommen und Annahmen getroffen worden:

- Das Fahrzeug mit der Schlechtwetterlichtfunktion wird durch zwei Punktlichtquellen modelliert, die jeweils in der Mitte der Scheinwerfermodule positioniert sind.
- Das entgegenkommende Fahrzeug wird durch eine rechteckige Windschutzscheibe modelliert, die orthogonal zur Fahrbahn ausgerichtet ist (projizierte Windschutzscheibe).
- Die Fahrbahn wird als planar angenommen, eine Berücksichtigung der Quer- und Längsneigung (Topografie) erfolgt nicht.
- Alle möglichen lateralen Positionen eines Fahrzeuges auf dem eigenen Fahrstreifen sind gleich wahrscheinlich. Diese liegen zwischen zwei „Extrempositionen“:
  - Position 1: Das Fahrzeug befindet sich mit der Außenseite an der Fahrbahngrenzung (der Außenspiegel auf der Beifahrerseite bleibt unberücksichtigt).
  - Position 2: Das Fahrzeug befindet sich mit der Innenseite an der Mittellinie der Fahrbahn (der Außenspiegel auf der Fahrerseite bleibt unberücksichtigt).
- Zur Bestimmung des zu entblendenden Winkelbereiches werden für das Fahrzeug mit der Schlechtwetterlichtfunktion ausschließlich diese beiden Positionen betrachtet, für die Definition des potenziellen Blendbereiches wird die Breite der Windschutzscheibe des entgegenkommenden Fahrzeuges auf die Breite des gesamten Gegenfahrstreifens erweitert.
- Für die Orientierung der Fahrzeuge gilt, dass die Verbindungslinie durch die beiden Scheinwerfer beziehungsweise die Kante der Windschutzscheibe orthogonal zur Mittellinie ist.
- Der Begegnungsabstand zwischen den beiden Fahrzeugen ist durch die Bogenlänge des Mittellinienabschnittes definiert, der sich jeweils aus dem Schnittpunkt zwischen der Geraden durch die beiden Scheinwerfer beziehungsweise der Geraden durch die Windschutzscheibe und der Mittellinie ergibt.
- Alle Begegnungsabstände zwischen den beiden Fahrzeugen sind gleich wahrscheinlich.
- Als Kurvensituation gilt, sobald sich eines der beiden Fahrzeuge im Kurvenabschnitt befindet.

- Dafür wird der Kurvenbereich vorher und hinterher durch eine Gerade ergänzt, dessen Länge zum jeweiligen Begegnungsabstand passend zu wählen ist.
- Auf die Verwendung einer Klothoide als Übergang zwischen Kurve und Gerade wird verzichtet.
- Die Mittellinie eines Kurvenabschnittes entspricht einem Viertelkreisbogen, sodass die relative Orientierung der beiden Fahrzeuge zueinander maximal  $90^\circ$  beträgt.

Die Berechnung der horizontalen und vertikalen Winkel erfolgt für beide Scheinwerfer analog zu den Gleichungen (3.1) und (3.2). Als Augenposition wird in diesem Fall jeweils einer der vier Eckpunkte des definierten Blendbereiches gewählt, wie in Abbildung 3.11a gezeigt. Die eigentliche Form des sich daraus ergebenden abzudunkelnden Winkelbereiches des Scheinwerfers ist in Abbildung 3.11b beispielhaft für einen Begegnungsabstand von  $d = 10$  m dargestellt, dieser wird im Folgenden jedoch näherungsweise als rechteckförmig angenommen.



(a) Definierter Blendbereich (blau) mit markierten Eckpunkten (rot), angelehnt an [DAG14] (b) Abzudunkelnder Winkelbereich des linken Scheinwerfers

**Abbildung 3.11:** Form des abzudunkelnden Winkelbereiches bei Definition eines rechteckförmigen Blendbereiches, beispielhaft für den linken Scheinwerfer bei einem Begegnungsabstand von 10 m auf einer Geraden. Beide Fahrzeuge befinden sich mittig auf ihrem Fahrstreifen

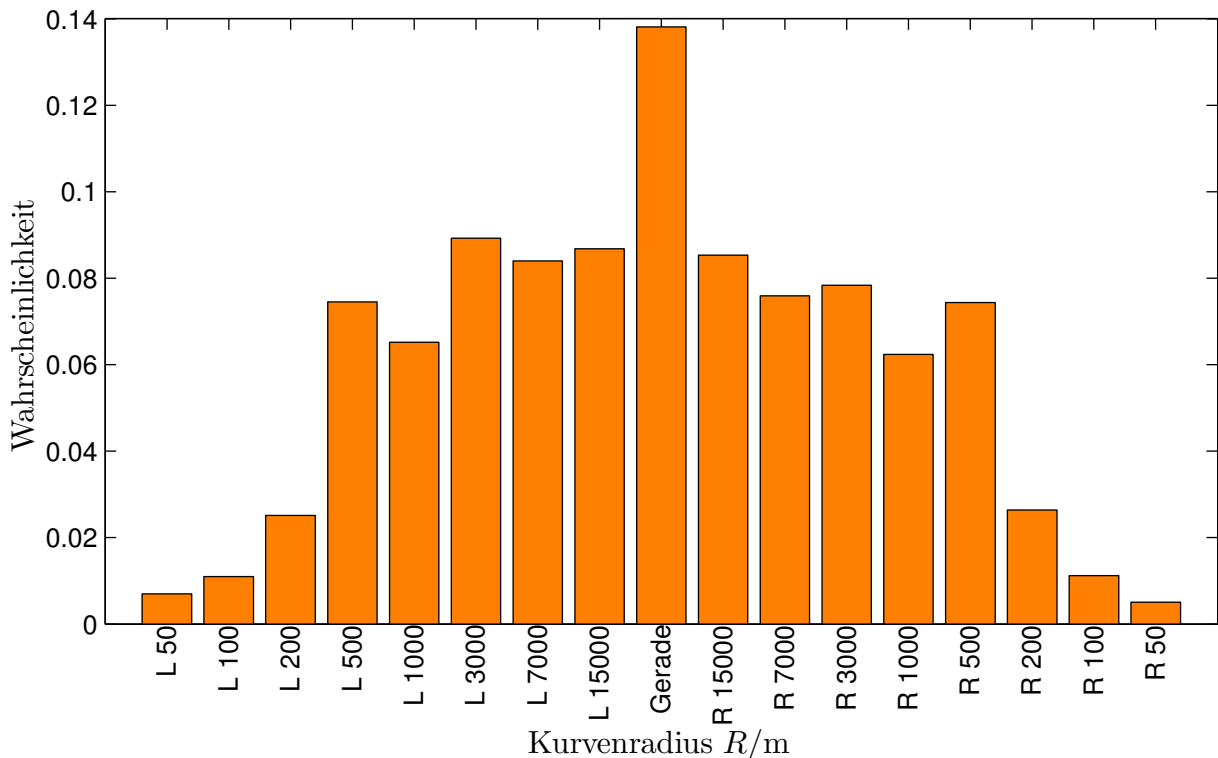
Der gesamte Winkelbereich, der in dieser gewählten Situation entblendet werden muss, ergibt sich demnach durch das kleinstmögliche Rechteck in einer durch Horizontal- und Vertikalwinkel aufgespannten Ebene, das alle für die Eckpunkte berechneten Winkel beinhaltet.

Daher ist dieser folglich immer zu groß gewählt. Grundsätzlich bleiben aber die minimalen und maximalen Vertikalwinkel, die in dieser Begegnungssituation relevant sind, unverändert. Außerdem ist es in der Entwicklung typisch, die Auflösung eines Matrix-Scheinwerfers rechteckförmig zu wählen. In diesem Falle wäre die Situation ausreichend



durch die vier Extremwerte beschrieben. Aus diesen Gründen wird der durch die Simplifizierungen verursachte Fehler für diese Betrachtungsweise toleriert.

Zur Nachbildung der Straßengeometrie werden die nach Kuhl [Kuh06] ermittelten Kurvenradien für Landstraßen in Deutschland herangezogen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die auftretenden Radien von Links- (L) sowie Rechtskurven (R) ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Für die durchgeführten Berechnungen wurden ausschließlich die hier aufgeführten Radien verwendet.

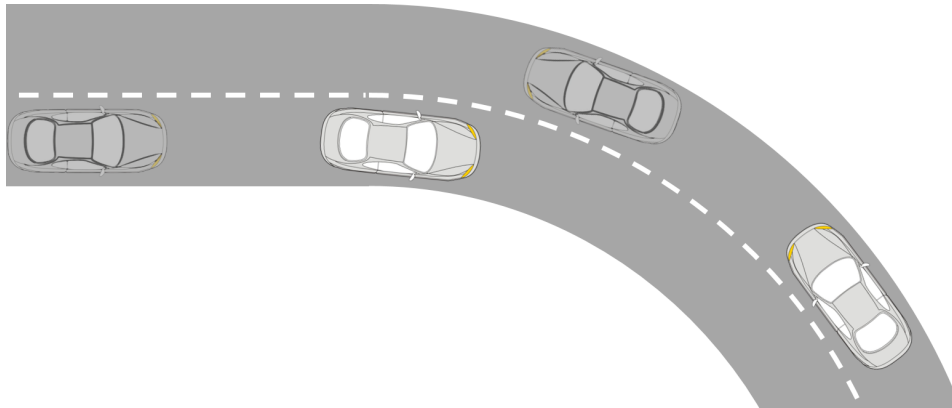


**Abbildung 3.12:** Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten eines Kurvenradiuses auf Landstraßen in Deutschland nach [Kuh06]

Die veränderbaren Parameter, die bei dieser Betrachtung eine Begegnungssituation definieren, lauten Begegnungsabstand, Kurvenradius und Fahrbahngeometrie. In einem Berechnungsvorgang wird zunächst der Kurvenradius konstant gehalten und der Begegnungsabstand zwischen  $d_1 = 1$  m und  $d_2 = 150$  m mit einer Schrittweite von  $\Delta d = 1$  m variiert. Die obere Grenze wurde in Anlehnung an den in Abschnitt 3.3.1.1 bestimmten Grenzwert gewählt. Dieser wurde allerdings etwas reduziert, da für die Festlegung der Anforderungen die minimale Höhe einer Windschutzscheibe sicherheitshalber etwas zu groß gewählt wurde, was ebenfalls zu einem größeren, maximal möglichen Begegnungsabstand führt. Bis zu welcher Entfernung eine Entblendung auf nassen Fahrbahnen sinnvoll ist, sollte in weiteren Studien erarbeitet werden. Die Schrittweite ist zunächst willkürlich gewählt worden, eine Anpassung aber ohne große Änderungen des Algorithmus möglich. Feinere Schritte führen allerdings zu keiner nennenswerten Änderung des ermittelten Winkelbereiches. Dieser wird mit einer Winkelauflösung von  $0,1^\circ$  bestimmt, die

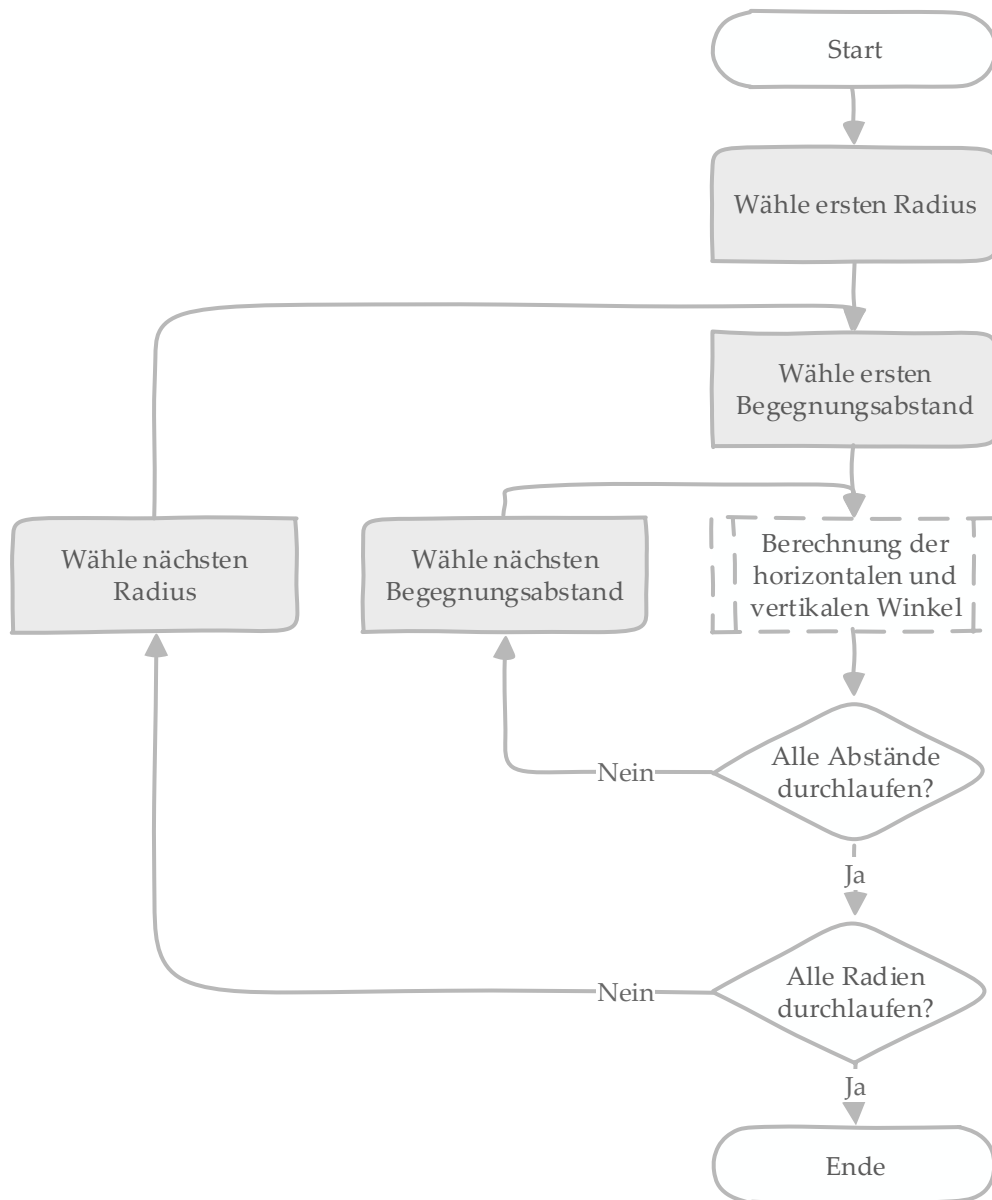
aktuell noch kein Matrix-Scheinwerfer aufweist.

Für einen festen Begegnungsabstand bei einer definierten Kurvengeometrie sind aufgrund der Kurvenein- und Kurvenausfahrt verschiedene Begegnungssituationen möglich, für die sich unterschiedliche Winkelbereiche ergeben. Zwei solcher Situationen sind beispielhaft für eine Linkskurve in Abbildung 3.13 angedeutet. Aus diesem Grund werden die Positionen der beiden Fahrzeuge auf der Fahrbahn zusätzlich bei konstantem Abstand variiert, um diese Einflüsse berücksichtigen zu können.



**Abbildung 3.13:** Verschiedene Begegnungsmöglichkeiten auf einer Fahrbahn bei festem Abstand zwischen den Fahrzeugen

Für jede einzelne Entfernung erfolgt die Berechnung des Winkelbereiches, der in der Lichtverteilung abgeschattet werden muss. Hierbei findet eine Kontrolle statt, ob und in welchem Ausmaß dieser Bereich auf die Fahrbahn trifft. Dadurch werden nur diejenigen Winkel berücksichtigt, die aufgrund einer spiegelnden Vorwärtsreflexion zur Blendung des Gegenverkehrs führen können. So werden sukzessive alle Horizontal- und Vertikalwinkel ermittelt, die zur Realisierung der Lichtfunktion in dieser Kurvensituation abzudunkeln sind. Danach findet ein Wechsel in der Fahrbahngeometrie statt und die Winkelberechnungen beginnen für alle Begegnungsabstände von neuem. Dieses Prozedere wird für jeden Kurvenradius wiederholt. Abschließend wird eine Gewichtung der resultierenden Winkelbereiche mit der Wahrscheinlichkeit der jeweiligen Kurvensituation vorgenommen und die Ergebnisse zu einer Häufigkeitsverteilung addiert. Der gesamte Ablauf des Algorithmus ist der Übersicht halber noch einmal stark vereinfacht in Abbildung 3.14 dargestellt.



**Abbildung 3.14:** Ablauf des Algorithmus zur Bestimmung der vertikalen und horizontalen Winkel einer Lichtverteilung, die zu einer indirekten Blendung des Gegenverkehrs führen

### Wahl der verwendeten Parameter

Die in dieser Arbeit verwendeten Parameter zur Berechnung der zur Realisierung der Lichtfunktion anzupassenden horizontalen und vertikalen Winkelbereiche der Lichtverteilung sind in Tabelle 3.5 aufgeführt.

Für die Wahl der Abmessungen und der Anbauposition einer Windschutzscheibe lag dem Autor keine ausführliche Datenbank vor. Hier ist grundsätzlich eine Vermessung aller Fahrzeugmodelle sinnvoll, um gesicherte Werte zu verwenden. Die Breite wird für die Berechnung nicht benötigt, da als Blendbereich der gesamte Gegenfahrstreifen definiert ist. Für die Höhe der Windschutzscheibe wurde auf eigene Daten zurückgegriffen,

Parameter	Wert
Projizierte Höhe der Windschutzscheibe	0,38 m
Projizierte Höhe des Windschutzscheibenmittelpunktes	1,17 m
Anbauhöhe der Scheinwerfer	0,65 m
Abstand der beiden Scheinwerfer zueinander	1,2 m
Abstand eines Scheinwerfers zur dichteren Fahrzeugseite	0,4 m
Breite der Fahrbahn	8 m

**Tabelle 3.5:** Verwendete Parameter zur Berechnung der anzupassenden Winkelbereiche

die aus der Vermessung des Fahrzeuges gewonnen wurden, das auch in späteren Untersuchungen Verwendung fand. Hierbei handelte es sich um ein Mercedes-Benz E-Klasse T-Modell (Baureihe S212).

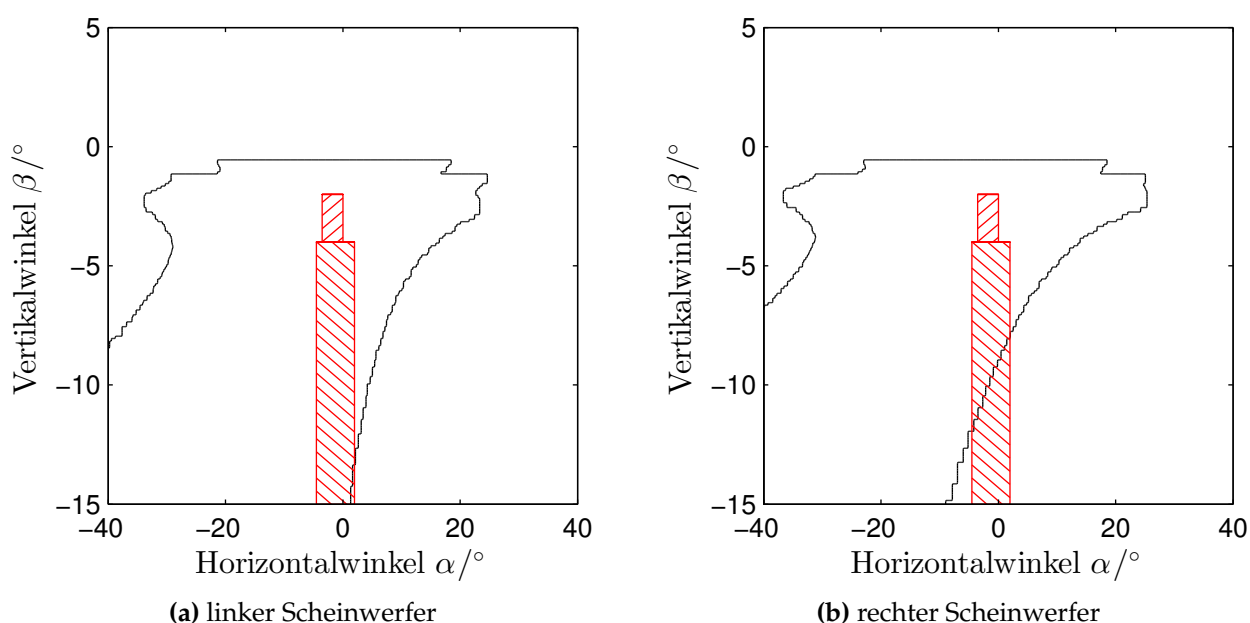
Die Anbauhöhe der Scheinwerfer ist in einem Bereich zwischen 0,5 m und 1,2 m zulässig [ECE48]. Für diese Untersuchung wurde sie zu  $h_s = 0,65$  m gewählt, was der im Rahmen dieser Arbeit für alle Untersuchungen verwendeten Anbauhöhe entspricht. In Richtung der Breite muss der Abstand zwischen den Innenseiten der beiden Abblendlichtmodule mindestens 0,6 m betragen. Der Abstand zwischen dem äußeren Rand des Moduls und der angrenzenden Fahrzeugseite darf einen Wert von 0,4 m nicht überschreiten. Eine interne Vermessung unterschiedlicher Kfz-Geometrien hat eine durchschnittliche Breite der Fahrzeuge von 1,74 m ergeben [HEL12]. Diese Studie beinhaltet die Daten zu 51 verschiedenen Fahrzeugmodellen, sodass dieser Wert einen ersten Anhaltspunkt darstellt. Davon ausgehend wird die Fahrzeugbreite auf 1,8 m festgelegt. Der Abstand zwischen den Mittelpunkten der beiden Abblendlichtmodule wird auf 1,2 m fixiert. Daraus ergibt sich ein Abstand zwischen der jeweiligen Fahrzeugseite und dem Mittelpunkt der Abblendlichtmodule von 0,3 m. Die gesetzlichen Vorgaben werden demnach durch diese Parameter eingehalten.

Die Schlechtwetterlichtfunktion ist vor allem für den Einsatz auf Land- und Stadtstraßen sinnvoll. Die Breite der Fahrbahn sollte daher der einer zweispurigen Landstraße entsprechen, eine Berücksichtigung von dreispurigen Überregionalstraßen erfolgt nicht. Für die Berechnung wurde der Regelquerschnitt 11 (RQ 11) gewählt, der eine Fahrbahnbreite von  $b = 8$  m aufweist [FGSV12] und somit auch breiter als gängige Stadtstraßen ist [FGSV07]. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen von Diem [Die04], der basierend auf den Daten von Damasky [Dam95] die verschiedenen Breiten von Landstraßen ausgewertet hat. Demnach ist die Breite aller von ihm erfassten Fahrbahnen kleiner als 8 m, sodass durch diese Konfiguration die meisten Land- und Stadtstraßen berücksichtigt werden.

### Ergebnisse der Berechnungen

Der beschriebene Berechnungsalgorithmus wurde selbst entwickelt und in *MATLAB* implementiert. Unter Verwendung der oben genannten Parameter kann derjenige Winkelbereich einer Lichtverteilung bestimmt werden, der bei einer Begegnungssituation auf einer

nassen Fahrbahn zu einer indirekten Blendung des Gegenverkehrs führt. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Abbildung 3.15 sowohl für den linken als auch für den rechten Scheinwerfer veranschaulicht. Die beiden Diagramme 3.15a und 3.15b zeigen die Kontur aller auftretenden Winkelkombinationen der Lichtverteilung, die zur Sicherstellung der Funktionalität des Schlechtwetterlichts theoretisch abgedunkelt werden müssen. Die Darstellung ist für horizontale Winkel auf  $\pm 40^\circ$  und für die vertikalen Winkel auf den Bereich zwischen  $-15^\circ$  und  $5^\circ$  begrenzt. Diese Werte werden in der Regel auch bei der Entwicklung eines Abblendlichtmoduls angestrebt. Zum Vergleich sind die beiden in der ECE R123 vorgeschriebenen Segmente für die Schlechtwetterlichtverteilung der AFS eingezeichnet.

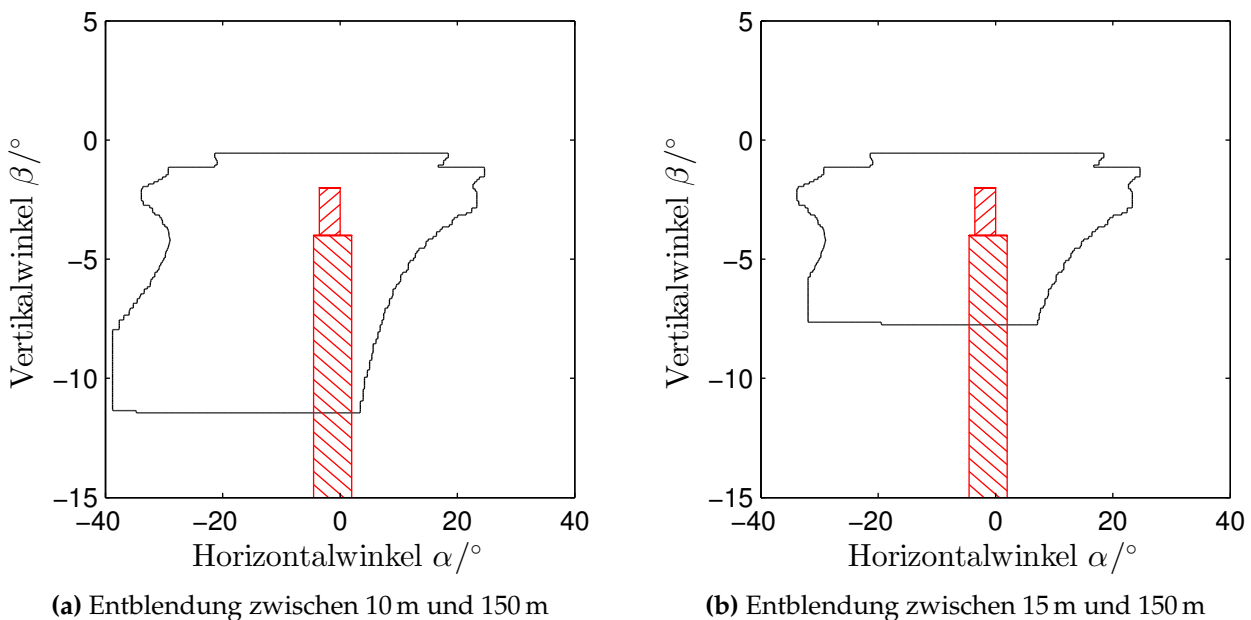


**Abbildung 3.15:** Relevanter Winkelbereich, in dem sich die Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfers verändern lassen muss. Rot schraffiert sind die Segmente der Schlechtwetterlichtverteilung aus der ECE R123

Anhand der Konturen ist der Einfluss von Kurvensituationen offensichtlich. Logischerweise weichen die resultierenden Bereiche der beiden Scheinwerfer voneinander ab, da sich aufgrund der unterschiedlichen Anbaupositionen andere Winkel ergeben. Darüber hinaus ist dieser Darstellung zu entnehmen, dass der insgesamt anzupassende Bereich weitläufig und unsymmetrisch ist. Die Realisierung partieller Abdunkelungen unterschiedlichster Ausdehnung über den gesamten Bereich hinweg ist mit herkömmlichen Systemen schlichtweg unmöglich. Konventionelle Halogen- oder Xenon-Abblendlichtmodule erzeugen die Lichtverteilung aus nur einer einzigen Lichtquelle. Eine Segmentierung kann hier nur nachträglich, zum Beispiel durch den Einsatz von Blendenelementen, erreicht werden. Bei LED-Abblendlichtmodulen müssen zur Erfüllung der gesetzlichen Mindestwerte mehrere LEDs eingesetzt werden. Wenn das Modul so ausgelegt ist, dass jede LED für ein anderes Segment genutzt wird, können diese, eine entsprechende elektronische Ansteuerung vorausgesetzt, unabhängig voneinander betrieben werden. Die

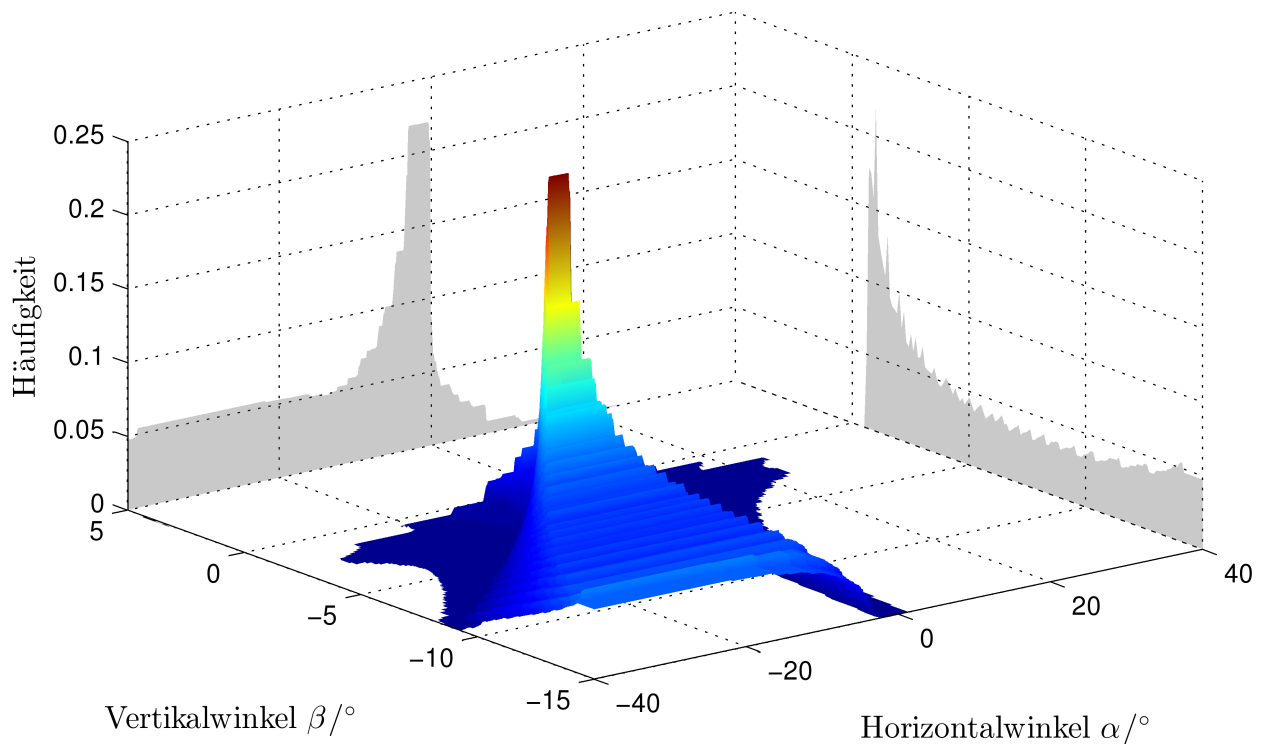
Anzahl der LEDs ist allerdings zu gering, um damit eine hinreichend feine Auflösung zu erhalten. Der durch den Einzug der LED in den Automobilscheinwerfer bedingte Trend, die Abblendlichtverteilung aus zwei Modulen, einem Basis- und einem Reichweitemodul, zu erzeugen, erschwert mögliche Konzepte zur Umsetzung einer situativen Entblendung zusätzlich, da die benötigte Segmentierung in zwei Modulen umzusetzen ist und diese exakt zueinander eingestellt werden müssen. Diese korrekte Einstellung gilt es dann über die gesamte Betriebszeit sicherzustellen. Auch die bis dato verfügbaren Matrix-Scheinwerfer sehen zurzeit keine Anpassung der Lichtverteilung in diesen Winkelbereichen vor. Der Fokus bei diesen Systemen liegt vielmehr auf dem Fernlichtbereich. Hieraus ist ersichtlich, dass für eine Realisierung der Schlechtwetterlichtfunktion zunächst Aufwand zur Entwicklung neuer Scheinwerfermodule betrieben werden muss.

Kürzere Begegnungsabstände führen schnell zu sehr großen (negativen) vertikalen und horizontalen Winkeln, wobei der Einfluss auf den Vertikalwinkel deutlicher ist. Veranschaulicht ist dieser Zusammenhang in Abbildung 3.16. In diesem Beispiel wurde der jeweils kürzest mögliche Begegnungsabstand variiert, ab dem eine Entblendung entgegenkommender Fahrzeuge vorgenommen werden soll. Hierdurch wird aufgezeigt, dass die an den Scheinwerfer zu stellenden Anforderungen klar an die Leistungsfähigkeit der Sensoren gekoppelt sind. Wenn durch die Sensorik eine sichere Objektverfolgung bis zu einem Begegnungsabstand von  $d \geq 10$  m gewährleistet ist, ergeben sich andere minimale Vertikalwinkel, als wenn dies nur bis  $d \geq 15$  m der Fall ist.

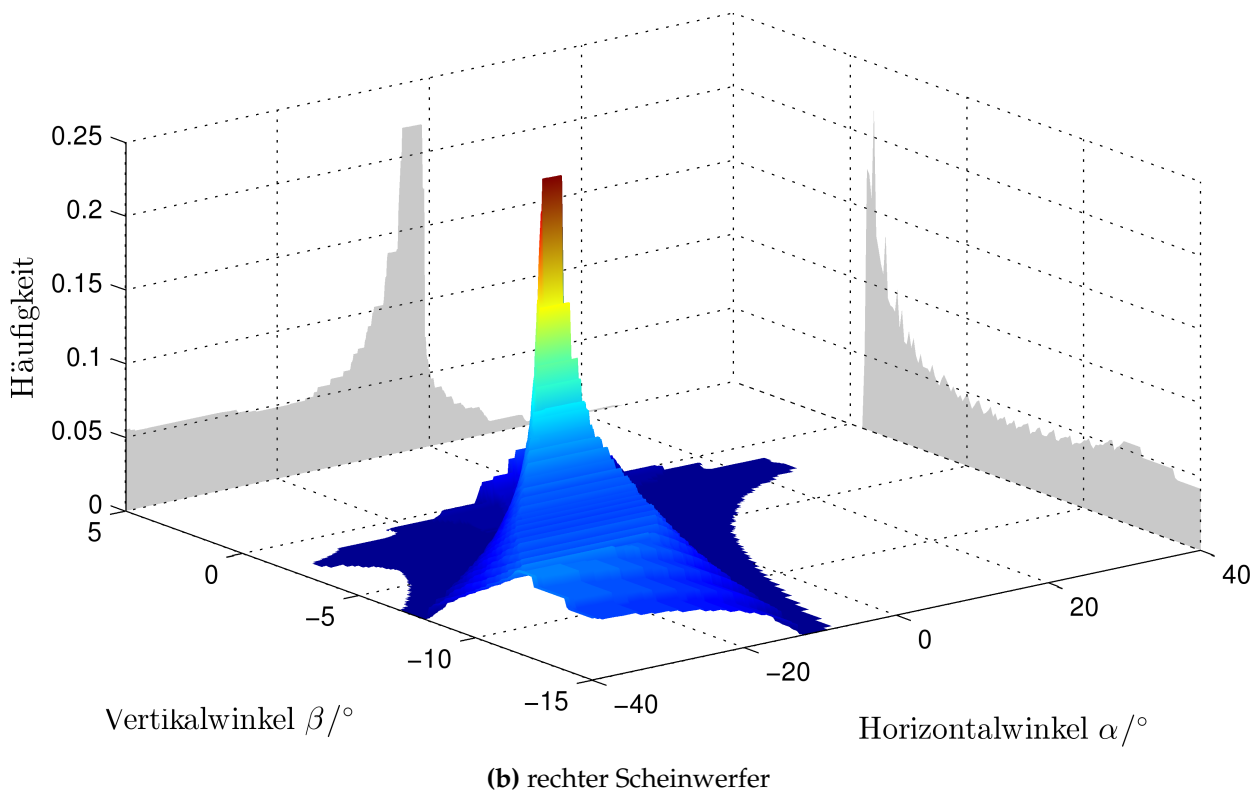


**Abbildung 3.16:** Relevanter Winkelbereich, in dem sich die Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfers verändern lassen muss, dargestellt in Abhängigkeit des kürzest möglichen Begegnungsabstandes. Rot schraffiert sind die Segmente der Schlechtwetterlichtverteilung aus der ECE R123

In Abbildung 3.17 sind die berechneten Häufigkeiten der einzelnen Winkelkombinationen aufgezeigt, aus denen die Konturen in Abbildung 3.15 abgeleitet wurden. Diese sind bisher nur in Hinblick auf die Anzahl der Begegnungsabstände normiert und mit den Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Kurvenradien gewichtet. Auffällig sind die hohen Häufigkeiten für Winkelkombinationen, die bei größeren Abständen relevant sind. Dies liegt an den kleineren Änderungen der Winkel für größere Entfernungen. Die Annahme, dass alle Begegnungsabstände bei einem Passiervorgang gleich wahrscheinlich sind, führt zu der Erhebung in diesem Bereich. Gerade in Kurvensituationen beginnt eine mögliche Begegnung sicherlich nicht immer bei dem maximalen Abstand von  $d = 150$  m. An dieser Stelle wäre eine Gewichtung mit Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Begegnungsabstände, die es allerdings erst noch zu ermitteln gilt, sinnvoll. Dadurch ließe sich dieser Einfluss reduzieren und die Verteilung realitätsnäher gestalten.



(a) linker Scheinwerfer



**Abbildung 3.17:** Häufigkeiten der relevanten Winkel, die in der Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfers abgeschattet werden müssen

Die Häufigkeitsverteilung kann bezüglich ihres Gesamtvolumens normiert werden. Über Volumenintegrale in vorgegebenen Intervallgrenzen wird die Berechnung möglich, zu wie viel Prozent alle Situationen durch die vorgegebenen Intervalle abgedeckt werden. So ließe sich bei einem Matrix-Scheinwerfer, der nur in bestimmten Winkelbereichen die Lichtstärke anzupassen vermag, prüfen, in wie vielen Begegnungssituationen die Funktionalität voraussichtlich nicht mehr gewährleistet werden kann. Für die folgende exemplarische Betrachtung wird von einem Scheinwerfer ausgegangen, der eine partielle Abdunkelung über einen horizontalen Winkelbereich von  $[-15^\circ, 15^\circ]$  und einen vertikalen Winkelbereich von  $[-5^\circ, 5^\circ]$  ermöglicht. In diesem Fall kann eine Entblendung durch den linken beziehungsweise den rechten Scheinwerfer nur noch in knapp 21 % respektive 22 % aller möglichen Situationen sichergestellt werden. Dies liegt vor allem daran, dass die bei kleinen Begegnungsabständen auftretenden Kombinationen aus betragsmäßig großen Vertikal- und Horizontalwinkeln nicht mehr abgedeckt werden können.

In Anhang D.2 sind die ermittelten Winkelbereiche und Häufigkeitsverteilungen für eine Schrittweite von 0,5 m dargestellt. Ein Vergleich zeigt, dass sich die Werte durch die höhere Auflösung kaum verändern. Diese führt lediglich zu einem glatteren Verlauf.



### 3.3.2.2 Auflösung

Die Anforderung an die Auflösung eines möglichen Scheinwerfersystems zur Umsetzung der Schlechtwetterlichtfunktion für nasse Fahrbahnen ist nicht über eine mathematische Berechnungsvorschrift zu fassen. Grundsätzlich, und das betrifft alle Lichtfunktionen gleichermaßen, hängt die Akzeptanz einer Auflösung von der subjektiven Wahrnehmung der Fahrzeugführer ab. Gleichzeitig ist hier aber auch der Aspekt der Verkehrssicherheit einzubeziehen.

Die Frage nach der idealen Auflösung eines Matrix-Scheinwerfers ist zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht abschließend beantwortet worden. Bisherige Untersuchungen beziehen sich auf Fernlichtfunktionen, wie zum Beispiel das blendfreie Fernlicht. Eine andere Betrachtungsweise der Auflösung ist die Einteilung der Lichtverteilung in Segmente, die einen bestimmten horizontalen Winkelbereich der Fernlichtverteilung abdecken und nicht zwingend gleich groß sein müssen. Zur Bestimmung der Akzeptanz verschiedener Auflösungen/Segmentgrößen haben Austerschulte, Dreier und Rosenhahn [ADR14] einen Probandenversuch durchgeführt, für den sie als Referenzsystem einen Matrix-Scheinwerfer mit einer Auflösung von  $1^\circ$  verwendeten. Für die Vergleichssysteme variierten sie die Anzahl der Segmente und auch deren individuellen Größen. Demnach sei eine Auflösung von  $1^\circ$  sehr komfortabel und bringe eine erhöhte Sicherheit. Feinere Auflösungen führen zu keinen wesentlichen Verbesserungen. Roslak et al. [Ros+13] verfolgten einen statistischen Ansatz zur Optimierung von Segmentanzahl und -größe. Es konnten allerdings keine abschließenden Empfehlungen für Segmentgrößen ermittelt werden. Sinnvoll sei eine Einteilung in einen zentralen und einen Außenbereich. Der Zentralbereich solle möglichst kleine Segmentbreiten aufweisen, während im Außenbereich gröbere Segmente gewählt werden können, da hier der Diskretisierungsfehler geringer sei.

Unter den Aspekten der Sicherheit betrachtet ist für die Schlechtwetterlichtfunktion die Auflösung so fein wie möglich zu wählen. Durch eine zu grobe Segmentgröße werden zusätzlich Bereiche entblendet, die eigentlich noch ausgeleuchtet werden könnten. Da für die Lichtfunktion Anpassungen im Abblendlichtbereich vorgenommen werden müssen, ist eine Einteilung der Lichtverteilung einzig in horizontale Segmente nicht mehr ausreichend. Es muss weiterhin auch eine Unterteilung in der Vertikalen erfolgen. Die Wahl der Auflösung ist immer mit einer Kosten-Nutzen-Analyse verbunden. Eine untere Grenze wird zudem durch zu berücksichtigende Toleranzen mitbestimmt. Hierbei kann es sich zum Beispiel um die Genauigkeiten der verwendeten Sensoren oder um Einstellungstoleranzen bei der Produktion/Montage handeln. Diese Unwägbarkeiten müssen in den Algorithmus einfließen.

Für die angedachte Lichtfunktion ist die Wahl der Auflösung im höchsten Maße sicherheitsrelevant, da hier im Gegensatz zum blendfreien Fernlicht dem eigenen Fahrer Licht weggenommen wird, das ihm vorher noch zur Verfügung stand. Ohne die Funktion blendfreies Fernlicht müsste der Fahrer das konventionelle Fernlicht deaktivieren, wenn sich andere Verkehrsteilnehmer in Reichweite befinden. So erhält man durch die Verwen-

dung des blendfreien Fernlichts grundsätzlich immer eine verbesserte Ausleuchtung, die zu einem Sicherheitsgewinn führen kann. Dies ist generell erst einmal unabhängig von der Wahl der Auflösung. Durch sie kann hier der Sicherheitsgewinn allerdings noch weiter gesteigert werden. Bei einer Anpassung der Abblendlichtverteilung sollte der abgeschattete Bereich hingegen so gering wie möglich ausfallen, um dem Fahrer nicht zu viel Licht wegzunehmen, da hierdurch das Risiko eines Sicherheitsverlustes steigt.

Abschließende Empfehlungen für eine Auflösung oder Anzahl und Größe von Segmenten können nicht gegeben werden. Bisher ist noch kein Zusammenhang zwischen Scheinwerferauflösung, menschlicher Wahrnehmung und Sicherheitseinfluss für Anpassungen im Abblendlichtbereich bekannt. Eine erste Probandenstudie, siehe Abschnitt 3.2.2, hat allerdings gezeigt, dass die Anpassung der eigenen Lichtverteilung in einem statischen Versuch von den Teilnehmern nicht zu erkennen war. Der eingesetzte prototypische Matrix-Scheinwerfer weist eine Auflösung von  $1^\circ$  auf. Es wurde in dieser statischen Situation zwar nur eine Entfernung von 50 m betrachtet, dennoch kann diese Auflösung als ein erster Richtwert angesehen werden, mit dem eine Umsetzung der Funktion ohne wahrnehmbare oder störende Eingriffe in die Lichtverteilung möglich sein könnte. Wenn in Zukunft ein geeigneter Scheinwerfer zur Verfügung steht, gilt es diese Zusammenhänge in weiteren Studien zu untersuchen. Mögliche Lösungsansätze hierfür sind hochauflösende Scheinwerfer, zum Beispiel LCD- und DMD-Module oder Solid-State Lichtquellen, die sich allerdings noch in der Entwicklung befinden [SW14]. Eine bereits existente Möglichkeit stellt das sogenannte Propix (Projektor-Pixellicht) dar [MN14]. Hierbei handelt es sich um einen aus sechs Digitalprojektoren bestehenden Scheinwerfer, bei dem jeder einzelne Projektor etwa zwei Millionen schaltbare Pixel aufweist. Dadurch ließen sich weitaus geringere Auflösungen als  $1^\circ$  realisieren. Auf dieser Basis wäre eine Simulation verschiedener Auflösungen möglich, sodass eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden könnte. Für die Bewertung der Sicherheit im Rahmen dieser Analyse sind zwei Sichtweisen relevant. Zum einen ein möglicher Sicherheitsverlust für den Fahrer, dessen Lichtverteilung angepasst wird und zum anderen der Sicherheitsgewinn für einen entgegenkommenden Fahrer, dessen Blendrisiko durch diese Maßnahme deutlich reduziert werden kann. Bei der Betrachtung des Sicherheitsverlustes gilt es vor allem zu überprüfen, ob der abgeschattete Bereich wahrgenommen wird und ob dem Fahrer entscheidende Informationen „vorenthalten“ bleiben. Außerdem muss untersucht werden, ob ein möglicher Informationsverlust nicht durch die Lichtverteilung des entgegenkommenden Fahrzeuges kompensiert werden kann.

---

## 4 Realisierung der Umfelderkennung

---

In diesem Kapitel wird auf die Erzeugung des Umfeldmodells auf Basis der verwendeten Sensorik eingegangen. Eine Fusion erfolgt dabei auf der Objektebene, siehe auch Abschnitt 2.1.5. Für die umzusetzende Lichtfunktion sind hier vor allem die beiden Aspekte Verkehrsteilnehmererkennung und Detektion der Straßenverhältnisse entscheidend, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Abschließend erfolgt eine kurze Darstellung des erzeugten Umfeldmodells, auf das nicht nur die in dieser Arbeit entwickelte Schlechtwetterlichtfunktion, sondern auch andere Fahrerassistenzsysteme zur Umsetzung ihrer jeweiligen Funktionalität zurückgreifen können.

### 4.1 Detektion anderer Verkehrsteilnehmer

In Kapitel 3.3.1 wird definiert, welche Informationen über Verkehrsteilnehmer für die Realisierung des Schlechtwetterlichtes erforderlich sind. Diese sind nachfolgend noch einmal zusammengefasst:

- relative Position
- relative Orientierung
- Breite der Windschutzscheibe
- Höhe der Windschutzscheibe
- Fahrtrichtung des Fahrzeuges
- Art des Fahrzeuges

Die Abstandssensorik muss eine ausreichend hohe Reichweite besitzen, um die Positionen anderer Verkehrsteilnehmer erfassen zu können. Für diese Aufgabe haben sich vor allem Radar- und Lidarsensoren bewährt, die zum Beispiel zur Realisierung der Assistenzfunktion ACC genutzt werden. Für eine Schlechtwetterlichtfunktion sollten jedoch Hydrometeore in der Atmosphäre, zum Beispiel Regen- oder Nebeltropfen, nicht dazu führen, dass die Qualität der Daten negativ beeinflusst wird. Daher wird ihm Rahmen dieser Arbeit ein Radarsensor eingesetzt. Aufgrund der geringen lateralen Auflösung eines Radarsensors ist mit Ungenauigkeiten in der Mittelpunkt- und Breitenbestimmung zu rechnen. Aus diesem Grund ist zu prüfen, ob die Fusion mit einem bereits vorhandenen Mono-Kamerasensor vorteilhaft ist.

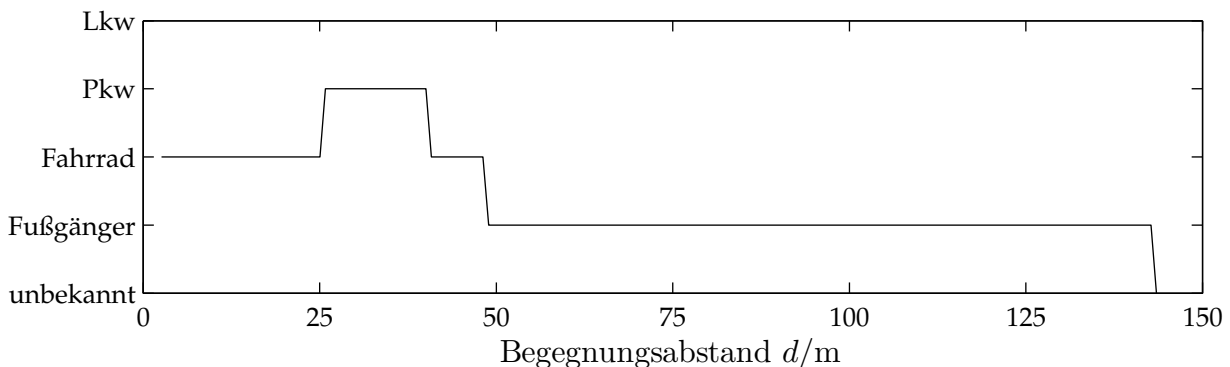
### 4.1.1 Analyse der Sensordaten

In dieser Arbeit wird ein Radarsensor der Firma *A.D.C. GmbH* verwendet, auf dessen Spezifikationen in Kapitel 5.1 näher eingegangen wird. Die Umfeldbeschreibung erfolgt anhand von Objekten. Der Radarsensor liefert die in Tabelle 4.1 zusammengefassten Daten bezüglich anderer Verkehrsteilnehmer. Alle Größen werden im eigenen Sensor-Koordinatensystem (Sensor-KOS) angegeben.

Merkmal	Beschreibung	Einheit
$d_{\text{long}}$	Longitudinaler Abstand zum Objektmittelpunkt	[m]
$d_{\text{lat}}$	Lateraler Abstand zum Objektmittelpunkt	[m]
$v_{\text{long}}$	Longitudinale Relativgeschwindigkeit des Objektes	[m s <sup>-1</sup> ]
$v_{\text{lat}}$	Laterale Relativgeschwindigkeit des Objektes	[m s <sup>-1</sup> ]
Breite	Breite des Objektes	
Dynamik	Vorausfahrendes, entgegenkommendes oder stehendes Objekt	

**Tabelle 4.1:** Durch den Radarsensor generierte Beschreibung von Objekten

Auf den ersten Blick scheinen fast alle Anforderungen durch den Radarsensor erfüllt zu werden. Selbst die Klassifizierung der Fahrzeugart soll laut technischer Dokumentation [Con12] indirekt anhand der Breiteninformation möglich sein. In der Realität hat sich dies allerdings als nicht praxistauglich erwiesen. Die Breite wird in diskreten Stufen angegeben, die einer bestimmten Objektart zugewiesen wird: Fußgänger, Fahrrad, Pkw, Lkw und größer. Durch Versuchsfahrten konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die Qualität der Daten zu gering ist und diese daher nicht zu einer sicheren Unterscheidung der Fahrzeugart herangezogen werden können. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.1 beispielhaft für eine Passierfahrt mit einem entgegenkommenden Pkw dargestellt. Die Daten gehören ausdrücklich zu ein und demselben Objekt. Dem Graphen ist zu entnehmen, dass lediglich für eine Strecke von circa 15 m zwischenzeitlich eine korrekte Klassifizierung als Pkw erfolgt. Hieran wird deutlich, dass die laterale Auflösung des Radarsensors selbst für eine grobe Breitenbestimmung zu gering ist.



**Abbildung 4.1:** Vom Radarsensor ermittelte Objektart für ein entgegenkommendes Objekt

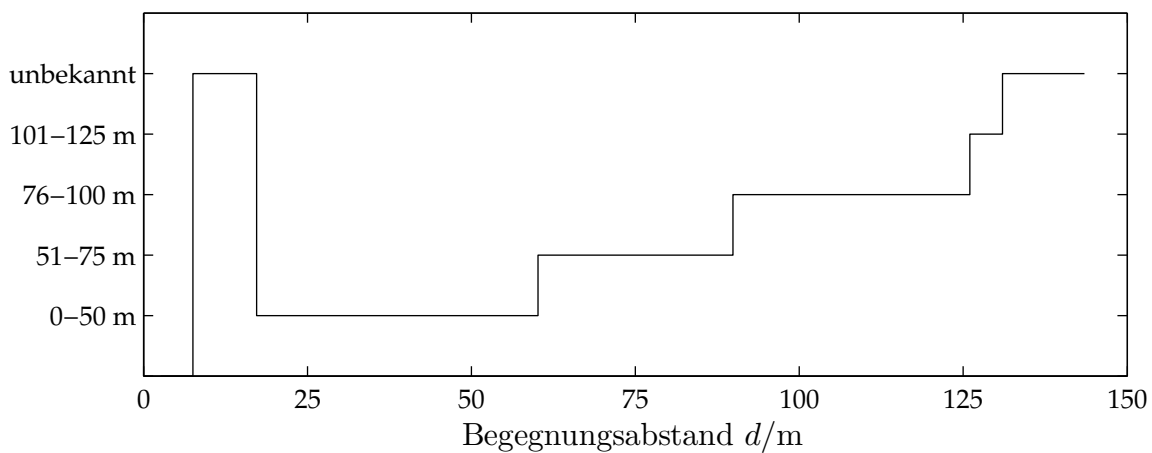
Die Breite eines Objektes dient jedoch nicht nur der Klassifizierung der Objekte. Vielmehr stellt sie die einzige Größe dar, die Aufschluss über die Breite der Windschutzscheibe geben kann. Da die Windschutzscheibe als Blendbereich definiert wird, ist eine Bestimmung der Breite unabdingbar. Da der Radarsensor allein diese Information nicht liefern kann, wird ein weiterer Sensor hinzugezogen.

Bei dem zusätzlichen Sensor handelt es sich um die angesprochene Mono-Kamera. Die Beschreibung des Umfeldes bezüglich anderer Verkehrsteilnehmer erfolgt hier ebenfalls über Objekte. Die darin enthaltenen relevanten Eigenschaften sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Alle Größen beziehen sich auf das Sensor-KOS. Die Objekterkennung beruht auf der Detektion von Scheinwerfern und Rückleuchten sowie deren Paarbildung. Dazu werden, ausgehend vom hellsten Pixel einer Lichtquelle, alle benachbarten Pixel, die einen gewissen Schwellwert nicht unterschreiten, zu einem „Lichtblob“ zusammengefügt. Aufgrund von Streuungen kann so unter Umständen sogar die gesamte Abschlusscheibe als Lichtquelle erkannt werden. Die äußeren Kanten zweier als zusammengehörend erkannter Lichtquellen werden zur Breitenbestimmung des Fahrzeuges herangezogen. Aus der Symmetrie zweier Scheinwerfer/Rückleuchten ergibt sich dementsprechend der Fahrzeugmittelpunkt. Dieser wird als Paar des Horizontal- und Vertikalwinkels ausgegeben, wobei zur Ermittlung des Vertikalwinkels die untere Kante der Blobs als Mittellinie fungiert.

Merkmals	Beschreibung	Einheit
$H_{\text{pos}}$	Horizontaler Winkel zum Objektmittelpunkt	[°]
$V_{\text{pos}}$	Vertikaler Winkel zum Objektmittelpunkt	[°]
$H_{\text{dim}}$	Horizontale Ausdehnung des Objektes	[°]
Typ	Scheinwerfer- oder Rückleuchtenpaar	

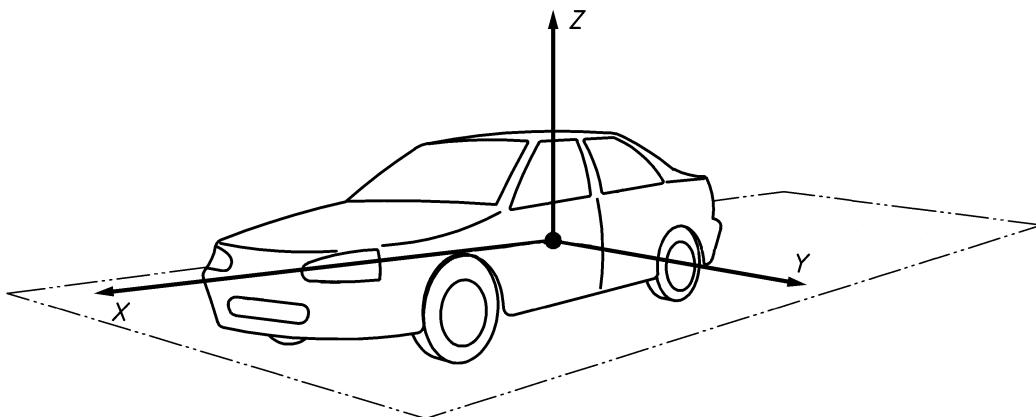
**Tabelle 4.2:** Durch den Kamerasensor generierte Beschreibung von Objekten

Hieraus ist ersichtlich, dass durch die Kamera nur die benötigte Eigenschaft „Fahrtrichtung des Fahrzeuges“ aus dem klassifizierten Lichtquellentyp abgeleitet werden kann. Bei allen anderen Informationen handelt es sich um Winkelangaben, die ohne zugehörige Abstandsinformationen nicht umgerechnet werden können. Der Sensor liefert prinzipiell eine hier nicht aufgeführte Entfernungsschätzung, deren Verlauf in Abbildung 4.2 für die bereits zur Breitenermittlung verwendete Beispielfahrt dargestellt ist. Daraus lässt sich ableiten, dass die Qualität dieser Entfernungsschätzung nicht ausreichend ist, um die Winkelinformationen in ein kartesisches Koordinatensystem zu transformieren. Darüber hinaus ist die Einteilung der einzelnen Entfernungsbereiche zu grob, gerade für wichtige Begegnungsabstände von  $d < 50$  m erfolgt keine weitere Unterteilung mehr. Insgesamt kann daher keine Bestimmung der Blendwinkel auf Basis dieser Daten erfolgen, sodass eine Fusion beider Sensoren die logische Konsequenz ist.



**Abbildung 4.2:** Die vom Kamerasensor ermittelten Abstandsinformationen über einen entgegenkommenden Pkw, aufgetragen über den tatsächlichen Begegnungsabstand

Durch die Kombination der Daten beider Sensoren kann ein Objekt im Verkehrsraum nahezu vollständig gemäß den Anforderungen beschrieben werden. Für einen besseren Überblick wird nachfolgend darauf eingegangen, wie die Daten beider Sensoren fusioniert werden können, um die benötigte Beschreibung von Objekten zu erhalten. Alle Größen werden, falls nötig und möglich, in das allgemeingültige, fahrzeugfeste Koordinatensystem (Fahrzeug-KOS) transformiert. Dieses entspricht dem in [DIN91] definierten KOS, siehe Abbildung 4.3. Der Koordinatenursprung ist laut Norm frei wählbar, empfohlen wird der Massenschwerpunkt. In diesem Fall wurde der Ursprung des  $x$ - $y$ -Achsen-systems zum Mittelpunkt der Vorderachse gewählt. In der Höhe wurde der Ursprung des Fahrzeug-KOS auf die Fahrbahnoberfläche verlegt. Die  $x$ -Achse zeigt in Fahrtrichtung, die  $y$ -Achse nach links und die  $z$ -Achse dementsprechend nach oben. Die Gierrate nimmt daher für Drehungen gegen den Uhrzeigersinn positive Werte an.



**Abbildung 4.3:** Definition eines fahrzeugfesten KOS, angelehnt an [DIN12]

## 4.1.2 Realisierung der Datenfusion

### 4.1.2.1 Position anderer Verkehrsteilnehmer

Der relative Abstand zwischen dem Egofahrzeug und einem sich im Fahrzeugumfeld befindlichen Objekt kann direkt mit dem Radarsensor erfasst werden. Dieser ermittelt die longitudinale  $d_{\text{long}}$  und die laterale Entfernung  $d_{\text{lat}}$  zu einem Objekt und gibt diese im Sensor-KOS an. Die longitudinale Richtung entspricht der x-, die laterale der y-Achse. Fahrzeug- und Sensor-KOS sind nicht zueinander verdreht.

Allerdings ist die laterale Auflösung eines Radarsensors begrenzt. Zur genaueren Bestimmung des Objektmittelpunktes werden daher die Daten des Kamerasensors miteinbezogen. Durch dessen höhere Auflösung kann eine Korrektur der Radardaten erfolgen. Hierfür muss der Horizontalwinkel  $H_{\text{pos}}$  zum Fahrzeugmittelpunkt in einen longitudinalen und einen lateralen Abstand umgerechnet werden. Winkelinformationen lassen sich ohne eine zugehörige Entfernung nicht in andere KOS transformieren. Aus diesem Grund werden die Radardaten zunächst in das Kamera-KOS verschoben.

Um die Winkel- und Entfernungsdaten miteinander verknüpfen zu können, werden die beiden lineare Funktionen  $f_1$  und  $f_2$  gebildet [Sch13]:

$$f_1(x) = \tan(H_{\text{pos}}) \cdot x \quad (4.1)$$

$$f_2(x) = (x - d_{\text{long}}) \cdot \tan(90 + \varphi) + d_{\text{lat}} \quad (4.2)$$

$f_1(x)$  beschreibt im Horizontalen die Gerade vom Koordinatenursprung des Kamera-KOS in Richtung des Fahrzeugmittelpunktes. Über  $f_2(x)$  wird die Fahrzeugfront ebenfalls durch eine Gerade beschrieben. Diese wird durch den Radarmesspunkt und die relative Orientierung  $\varphi$  des Objektes zum Kamera-KOS (s.u.) bestimmt. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 4.4 schematisch dargestellt.

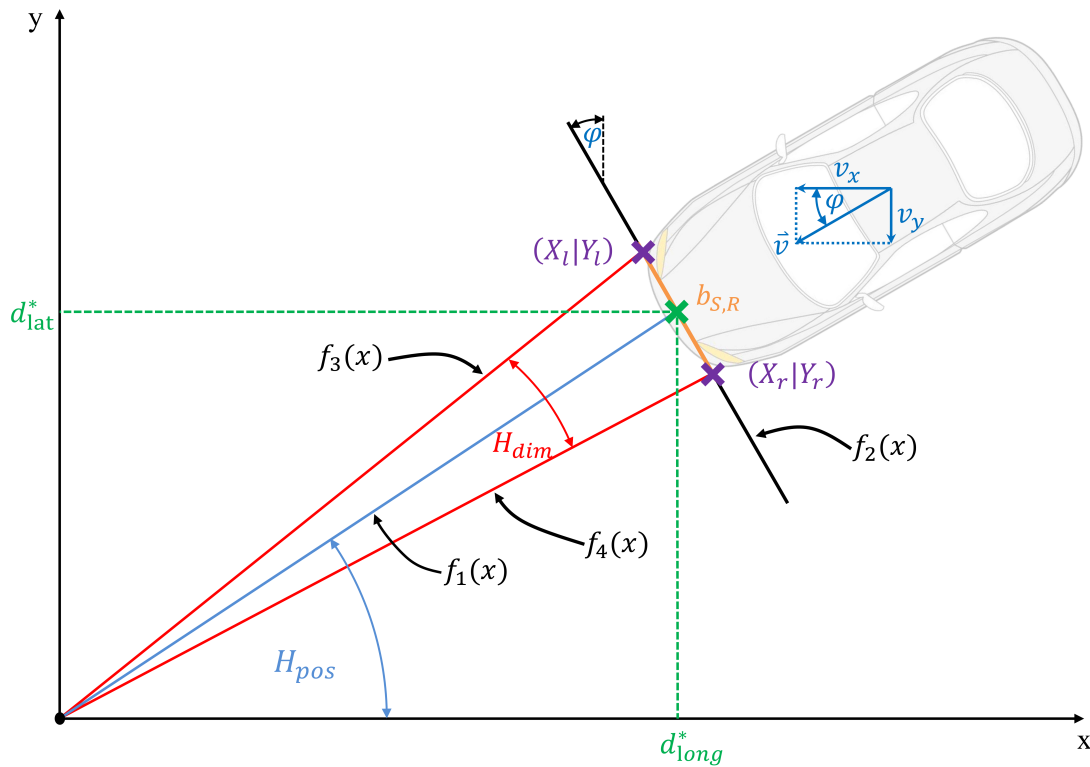
Der korrigierte Mittelpunkt  $(d_{\text{long}}^* | d_{\text{lat}}^*)$  des Objektes befindet sich im Schnittpunkt beider Geraden:

$$d_{\text{long}}^* = \frac{d_{\text{lat}} - d_{\text{long}} \cdot \tan(90 + \varphi)}{\tan(H_{\text{pos}}) - \tan(90 + \varphi)} \quad (4.3)$$

$$d_{\text{lat}}^* = d_{\text{long}}^* \cdot \tan(H_{\text{pos}}) \quad (4.4)$$

Sind beide Fahrzeugfronten parallel zueinander, gilt für die Orientierung  $\varphi = 0$ . Für diesen Fall bleibt der longitudinale Abstand zum Mittelpunkt unverändert:

$$d_{\text{long}}^* = d_{\text{long}} \quad (4.5)$$



**Abbildung 4.4:** Bestimmung des korrigierten Fahrzeugmittelpunktes und der Fahrzeugbreite

#### 4.1.2.2 Orientierung anderer Verkehrsteilnehmer

Zur Bestimmung der relativen Orientierung einer Fahrzeugfront zum Sensor- oder Fahrzeug-KOS kann die gemessene Relativgeschwindigkeit des Fahrzeuges genutzt werden. Der Radarsensor bestimmt über den Doppler-Effekt die relative Geschwindigkeit anderer Objekte. Durch Kenntnis der Eigengeschwindigkeit  $v_{ego}$  kann darüber die Absolutgeschwindigkeit des Objektes berechnet werden. Unter Berücksichtigung der relativen Bewegungsrichtung bestimmt sich dessen Orientierung zu:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) = \arctan\left(\frac{v_{lat}}{v_{long} + v_{ego}}\right) \quad (4.6)$$

Die Orientierung  $\varphi$  ist ebenfalls in Abbildung 4.4 eingezeichnet. Entgegen den Ausführungen in der Dokumentation [Con12] liefert der verwendete Radarsensor nicht die relativen Geschwindigkeitskomponenten, sondern vielmehr die absoluten. Dies gilt allerdings nur, wenn dem Sensor über den CAN-Bus die Geschwindigkeit des Egofahrzeuges zur Verfügung gestellt wird. Andernfalls wird vom Auswertalgorithmus die Eigengeschwindigkeit des Sensors zu null angenommen. Nur in diesem Falle wird die Relativgeschwindigkeit anderer Objekte ausgegeben.



### 4.1.2.3 Breite der Windschutzscheibe anderer Verkehrsteilnehmer

Informationen über die Breite der Windschutzscheibe eines Fahrzeuges sind nicht mit Hilfe eines Sensors direkt zu erhalten. Diese kann nur durch die Breite des gesamten Fahrzeuges angenähert werden. Aber auch die Fahrzeugbreite ist mit den gewählten Sensoren nicht direkt messbar. Der Radarsensor liefert zwar einen diskreten Breitenwert, die Qualität dieser Daten ist jedoch zu gering. Durch den Kamerasensor erfolgt eine Bestimmung der horizontalen Ausdehnung  $H_{\text{dim}}$  der Objekte. Hierbei handelt es sich nicht um die tatsächliche Breite eines Fahrzeuges, sondern genauer um den Abstand der beiden Außenkanten der als Scheinwerferpaar oder Rückleuchtenpaar detektierten Lichtblobs. Dieser Wert kann direkt als Breite angenommen oder durch einen zusätzlichen Sicherheitsfaktor vergrößert werden.

Die Ausdehnung kann allerdings nur als Winkel angegeben werden. Die Umrechnung in einen Breitenwert erfolgt ähnlich der Korrektur des Fahrzeugmittelpunktes über Geradenschnittpunkte. Anstelle der Funktion  $f_1(x)$  werden diesmal zwei weitere Geraden  $f_3(x)$  und  $f_4(x)$  definiert, die vom Ursprung in Richtung der Scheinwerferaußenkanten verlaufen (vergleiche Abbildung 4.4):

$$f_3(x) = \tan \left( H_{\text{pos}} + \frac{H_{\text{dim}}}{2} \right) \cdot x \quad (4.7)$$

$$f_4(x) = \tan \left( H_{\text{pos}} - \frac{H_{\text{dim}}}{2} \right) \cdot x \quad (4.8)$$

Der Abstand zwischen den beiden Scheinwerfern/Rückleuchten  $b_{\text{S,R}}$  ergibt sich dann aus der Strecke zwischen den beiden Schnittpunkten  $(X_l|Y_l)$  und  $(X_r|Y_r)$ :

$$X_{l,r} = \frac{d_{\text{lat}}^* - d_{\text{long}}^* \tan(90 + \varphi)}{\tan \left( H_{\text{pos}} \pm \frac{H_{\text{dim}}}{2} \right) - \tan(90 + \varphi)} \quad (4.9)$$

$$Y_{l,r} = \tan \left( H_{\text{pos}} \pm \frac{H_{\text{dim}}}{2} \right) X_{l,r} \quad (4.10)$$

$$b_{\text{S,R}} = \sqrt{(X_l - X_r)^2 + (Y_l - Y_r)^2} \quad (4.11)$$

Dieser Wert wird unkorrigiert als Breite  $b$  des Objektes verwendet. Gilt für eine Orientierung  $\varphi = 0$  vereinfacht sich die Berechnung der x-Koordinate erneut:

$$X_{l,r} = d_{\text{long}}^* \quad (4.12)$$

Falls einem Radarobjekt keine Kameradaten zugeordnet werden können, kann auch keine Berechnung der Breite erfolgen. In diesem Fall wird eine Standardbreite für das Objekt verwendet, die vorerst auf  $b = 2$  m festgelegt ist.

### 4.1.2.4 Höhe der Windschutzscheibe anderer Verkehrsteilnehmer

Unter der Höhe der Windschutzscheibe ist nicht nur deren projizierte Höhe zu verstehen, sondern auch deren vertikale Position. Für die Berechnung der Blendwinkel ist die Höhe der unteren und der oberen Kante der projizierten Windschutzscheibe entscheidend. Mit

keinem der beiden verwendeten Sensoren sind diese Informationen zu ermitteln. Befehlen könnte man sich mit der Vermessung aller Fahrzeugmodelle, um daraus geeignete Werte abzuleiten. Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst auf Werte zurückgegriffen, die bei der Vermessung von Versuchsfahrzeugen ermittelt wurden.

#### 4.1.2.5 Dynamik anderer Verkehrsteilnehmer

Mit der Dynamik eines Objektes ist dessen Bewegungszustand und -richtung gemeint. Beide Sensoren liefern hierzu direkte und indirekte Daten. Der Radarsensor unterscheidet zwischen vier Fällen:

1. Objekt steht
2. Objekt wurde gestoppt
3. Objekt fährt voraus
4. Objekt kommt entgegen

Die ersten beiden Zustände beziehen sich beide auf ein unbewegtes Objekt. Allerdings bedeutet gestoppt, dass dieses vorher schon einmal als fahrend erkannt wurde.

Vom Kamerasensor werden zwei Informationen über die klassifizierten Lichtquellen verwendet:

1. Scheinwerferpaar
2. Rückleuchtenpaar

Da der Radarsensor zur Entscheidungsfindung die direkt gemessene Relativgeschwindigkeit miteinbezieht, ist dessen Einschätzung qualitativ hochwertiger. Deswegen wird grundsätzlich zur Unterscheidung von entgegenkommenden und vorausfahrenden Fahrzeugen dem Radarsensor vertraut. Einzig bei stehenden Objekten ist diese Herangehensweise nicht mehr möglich. In solchen Fällen wird auf die Information des Kamerasensors zurückgegriffen, um mithilfe der erkannten Leuchtenpaare eine Entscheidung zu treffen.

#### 4.1.2.6 Fahrzeugart der Verkehrsteilnehmer

Eine Differenzierung der verschiedenen Fahrzeugarten ist mit den gewählten Sensoren nicht direkt möglich. Zwar bietet der Radarsensor eine Einteilung anhand der ermittelten Breiten an, diese ist jedoch, wie bereits erwähnt, nicht zuverlässig. Der Kamerasensor unterscheidet nicht zwischen verschiedenen Fahrzeugarten, sondern klassifiziert einzig die Lichtquellen im Bild. Lkw bereiten hierbei zusätzliche Probleme. Häufig besitzen diese nicht nur Hauptscheinwerfer und Rückleuchten, sondern etliche Positionsleuchten, Zusatzscheinwerfer und „Styingleuchten“. Dadurch ist eine sichere Paarbildung oft nicht möglich. Dies hat dann auch einen direkten Einfluss auf die implementierte Breitenberechnung der Objekte, da eine Zuordnung der Daten unter Umständen nicht mehr möglich ist oder die berechneten Breiten bei einer fehlerhaften Paarbildung viel zu klein sind.

Für die angedachte Lichtfunktion wird die Windschutzscheibe eines entgegenkommenden Fahrzeuges als Blendbereich definiert. Um den daraus resultierenden abzdunkelnden Winkelbereich der Lichtverteilung möglichst gering zu halten, werden die projizierte Höhe der Scheibe und deren vertikale Position benötigt. Zurzeit kann kein Sensor bei Nacht die Höhe der Windschutzscheibe bestimmen, sodass hierfür sinnvolle Annahmen getroffen werden müssen. Diese Annahmen unterscheiden sich für die jeweiligen Fahrzeugarten. Daher gilt es zu untersuchen, ob eine Anpassung der Berechnungen an die jeweilige Höhe der Windschutzscheibe nötig ist. Möglicherweise kann sich die Abdunkelung im Abblendlichtbereich über den gesamten vertikalen Winkelbereich erstrecken, ohne einen störenden Eindruck beim Fahrer zu hinterlassen und ein erhöhtes Sicherheitsrisiko für diesen darzustellen. In diesem Fall könnte eine Berechnung der Vertikalwinkel entfallen und die Lichtfunktion wäre unabhängig von der Höhe einer Windschutzscheibe. Andernfalls ist die angesprochene Annahme der Höhe und der Position der Windschutzscheibe in Abhängigkeit der Fahrzeugart zu wählen. Für eine Klassifizierung der Fahrzeugart ist bei der verwendeten Konfiguration eine Nachbesserung bei den einzelnen Sensoren und deren Algorithmen notwendig. Hilfreich könnte hier auch eine Fusion auf Merkmals- oder Rohdatenebene sein, um erkannte Leuchten im Kamerabild vorab einem jeweiligen vom Radarsensor detektierten Objekt zuordnen zu können.

## 4.2 Detektion der Straßenverhältnisse

In Kapitel 2.2.2.2 werden verschiedene Möglichkeiten zur Detektion der Fahrbahnverhältnisse erläutert. Diese beschränken sich alle auf die Erkennung eines diskreten Witterungszustandes, zum Beispiel trocken oder nass. Eine Aktivierung der Schlechtwetterlichtfunktion ist grundsätzlich immer bei dem erkannten Zustand nass denkbar. Aus lichttechnischer Sicht ist es jedoch sinnvoller, die Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche zu kennen und dementsprechend die Beleuchtungsstrategie an diese anzupassen.

Für diese Arbeit wird deswegen ein Sensorsystem entwickelt, das dynamisch die Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn vermisst. Eine detaillierte Beschreibung dieses Systems erfolgt in Kapitel 5.1.2. Der Sensor misst die Beleuchtungsstärke, die als Maß für die Reflektivität der Fahrbahn dient. Das System besteht unter anderem aus zwei Sensoren, die zur Bestimmung der Vorwärts- und Rückwärtsreflexion eingesetzt werden.

Anhand der absoluten Werte und dem Verhältnis zwischen Vorwärts- und Rückwärtsreflexion kann auf einen Witterungszustand der Fahrbahn geschlossen werden. Damit ist eine grobe Einteilung in die Zustände trocken, nass, schneeig und vereist gemeint. Im Trockenen zeigt sich überdies eine Veränderung der Werte in Abhängigkeit des Fahrbahnbelages, siehe Abschnitt 6.1.2.

## 4.3 Umfeldbeschreibung

Ausgehend von den gewonnenen Umfeldinformationen kann ein sogenanntes Umfeldmodell erzeugt werden. Für die Beschreibung des Umfeldes werden verschiedene Informationsklassen angelegt:

- Verkehrsteilnehmer
- Straßenverhältnisse
- Infrastruktur
- Witterungsbedingungen
- Fahrzeugdynamik/-zustand

Jede Fahrerassistenzfunktion kann nun auf eine oder mehrere dieser Klassen zugreifen, um die benötigten Informationen zur Realisierung der jeweiligen Funktionalität abzurufen. Das Umfeldmodell ist recht allgemein gehalten, um für verschiedenste Assistenzfunktionen Informationen bereitstellen zu können. Für das umzusetzende Schlechtwetterlicht sind vor allem die ersten beiden Klassen von Bedeutung.

### 4.3.1 Verkehrsteilnehmer

In dieser Informationsklasse befinden sich die in Abschnitt 4.1 genannten Daten bezüglich anderer Verkehrsteilnehmer. Zusätzlich werden noch ergänzende Informationen wie die relativen Geschwindigkeiten eines Objektes vom Radar- und die Winkelinformationen zu Objekten vom Kamerasensor mitgeführt. Die relativen Geschwindigkeiten dienen dem internen Objekttracking. Die Winkelinformationen werden aus Kompatibilitätsgründen für Serienlichtfunktionen, wie zum Beispiel dem blendfreien Fernlicht, aufgenommen. Außerdem erhält jedes Objekt einen Identifikator und es wird vermerkt, von welchem Sensor die Daten stammen. Letzteres erfolgt deshalb, da auch Objekte aufgenommen werden, die nicht fusioniert werden können. Informationen, die nur mittels Datenfusion gewonnen werden können, werden in diesem Fall auf Standardwerte gesetzt. Die vollständige Aufzählung der gespeicherten Daten und deren Beschreibung ist in Tabelle 4.3 aufgeführt.

### 4.3.2 Straßenverhältnisse

Die Straßenverhältnisse werden in erster Linie über den in Abschnitt 4.2 erwähnten Sensor zur Messung der Reflexionseigenschaften bestimmt. Diese Messdaten werden zusätzlich stark abstrahiert, da einige Applikationen nicht unbedingt die direkten Messwerte berücksichtigen müssen. Zu diesem Zweck erfolgt eine diskrete Einteilung der Witterungsbedingungen. Zur besseren Zuordnung der Reflexionseigenschaften zu einer die-

Information	Beschreibung
ID	Eindeutige Bezeichnung des Objektes
Longitudinale Entfernung	Relativer Abstand zum Objekt in x-Richtung
Laterale Entfernung	Relativer Abstand zum Objekt in y-Richtung
Breite	Berechnete Breite des Objektes
Orientierung	Relative Verdrehung des Objektes um die z-Achse
Klassifikation	Vorausfahrendes oder entgegenkommendes Objekt
Quelle	Radar, Kamera oder Radar und Kamera
Longitudinale Geschwindigkeit	Relativgeschwindigkeit des Objektes in x-Richtung
Laterale Geschwindigkeit	Relativgeschwindigkeit des Objektes in y-Richtung
Horizontalwinkel	Horizontaler Winkel zum Objektmittelpunkt
Vertikalwinkel	Vertikaler Winkel zum Objektmittelpunkt
Horizontale Dimension	Ausdehnung des Objektes (Winkel)

**Tabelle 4.3:** Generierte Umfeldbeschreibung bezüglich anderer Verkehrsteilnehmer

ser Bedingungen fließen Daten über die Luft- und die Straßentemperatur in den Entscheidungsprozess mit ein. Die Messung der Temperatur einer Fahrbahnoberfläche erfolgt mittels Pyrometer. Des Weiteren wird für eine trockene Fahrbahn abgeschätzt, um welchen Straßenbelag es sich gerade handelt. In Tabelle 4.4 sind die ermittelten Größen aufgeführt.

Information	Beschreibung
Vorwärtsreflexion	Gemessene Beleuchtungsstärke am vorderen Sensor
Rückwärtsreflexion	Gemessene Beleuchtungsstärke am hinteren Sensor
Witterung	trocken, nass, schneeig, vereist
Straßentemperatur	Gemessene Temperatur der Fahrbahnoberfläche
Deckschicht	Beton, Asphalt, ...

**Tabelle 4.4:** Generierte Umfeldbeschreibung bezüglich der Straßenverhältnisse

Die Bestimmung der Witterung und der Deckschicht sind noch nicht vollständig umgesetzt. Es werden umfangreichere Daten benötigt, um anhand der Reflexionswerte zuverlässig auf die Witterung schließen zu können. Vorerst sind die Grenzwerte auf Basis der bereits vorhandenen Daten gewählt worden. Die Zuordnung einer Deckschichtart ist als Platzhalter mit in die Umfeldbeschreibung aufgenommen worden. Eine prinzipielle Umsetzung dieser Funktion hat sich in bereits durchgeführten Versuchen (siehe Abschnitt 6.1.2) als möglich erwiesen, die Daten sind aber nicht umfangreich genug, um sinnvolle Grenzwerte festzulegen. Hier gilt es vor allem zu prüfen, wie fein eine solche Einteilung letztendlich erfolgen kann.

### 4.3.3 Witterungsbedingungen

Neben den Bedingungen auf der Fahrbahn sind grundsätzlich auch die Witterungsbedingungen von Interesse. Die Lufttemperatur kann Aufschluss über die Art eines möglichen Niederschlages geben. Durch die Kopplung mit den Werten der Vorwärts- und Rückwärtsreflexion kann so eine wechselseitige Plausibilisierung vorgenommen werden. Mit einem zusätzlichen Feuchtigkeitssensor kann die relative Luftfeuchtigkeit gemessen werden. Damit lassen sich unter Verwendung der Magnus-Formeln für den Sättigungsdampfdruck über Wasser und Eis Tau- und Frostpunkt berechnen [SH82]. Nach Imteaz et al. [Imt+11] werden Luft und Taupunkttemperatur in Beziehung gesetzt, um eine Nebelwahrscheinlichkeit, den sogenannten Fog Potential Index (FPI), zu bestimmen.

Die Daten des Lichtsensors lassen den Rückschluss zu, inwieweit die Witterungsverhältnisse das Einschalten der Hauptlichtfunktion erfordern. Weiterhin können Systeme durch die Berücksichtigung von Fahrerwünschen in Form von Lichtschalterstellungen „überstimmt“ werden. Alle berücksichtigten Witterungsdaten finden sich in Tabelle 4.5.

Information	Beschreibung
Lufttemperatur	Gemessene Temperatur der Umgebungsluft außerhalb des Fahrzeuges
Feuchtigkeit	Relative Feuchtigkeit der Umgebungsluft
Taupunkt	Mittels Temperatur und Feuchtigkeit berechnete Taupunkttemperatur
Frostpunkt	Mittels Temperatur und Feuchtigkeit berechnete Frostpunkttemperatur
Nebelwahrscheinlichkeit	Berechnete Wahrscheinlichkeit für Nebel
Niederschlag	Art des Niederschlags
Tag/Nacht-Status	Vom Lichtsensor gemeldete Umgebungslichtverhältnisse
Lichtschalter	Durch den Fahrer vorgenommene Stellung der Lichtschalter

**Tabelle 4.5:** Generierte Umfeldbeschreibung bezüglich der Witterungsverhältnisse

### 4.3.4 Verkehrsinfrastruktur

In dieser Klasse wird der Verkehrsweg beschrieben. Für die Lichtfunktion prädiktives Kurvenlicht wird eine mathematische Funktion bereitgestellt, die den eigenen Fahrspurverlauf definiert. Diese wird von dem Kamerasensor bereitgestellt. Für das dynamische Kurvenlicht liegen die Daten über den Kurvenradius und die -richtung, also Links- oder Rechtskurve, vor. Um zwischen den einzelnen Lichtverteilungen der AFS wechseln zu können, erfolgt eine Einteilung in verschiedene Straßentypen, wie zum Beispiel Landstraße oder Autobahn. Für eine situationsgerechte Ausleuchtung der Fahrbahn ist weiterhin

die Kenntnis über die Anzahl der Fahrstreifen nützlich. Alle bereitgestellten Daten sind in Tabelle 4.6 aufgelistet.

<b>Information</b>	<b>Beschreibung</b>
Fahrbahnverlauf	Funktion des Fahrbahnverlaufes, Kurvenradius, Kurvenrichtung
Straßentyp	Stadtstraße, Landstraße, Autobahn, Gelände
Fahrstreifen	Anzahl der vorhandenen Fahrstreifen

**Tabelle 4.6:** Generierte Umfeldbeschreibung bezüglich der Verkehrsinfrastruktur

Die Information über die Anzahl der Fahrstreifen wird bisher noch von keinem der Sensoren bereitgestellt. Deswegen handelt es sich hierbei um einen Platzhalter, der erst in Zukunft gefüllt werden kann.

### 4.3.5 Fahrzeugdynamik und -zustand

Für viele Umfeldsensoren werden Informationen über die Fahrzeugdynamik benötigt. Einige Lichtfunktionen sind ebenfalls auf Daten über die Fahrzeugdynamik und den -zustand angewiesen. So berücksichtigt die Leuchtweitenregulierung beispielsweise das Fahrzeugniveau, um eine Abweichung von der Solllage, wie sie zum Beispiel bei einer Beladung oder durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge auftreten kann, in der vertikalen Scheinwerfereinstellung auszugleichen. In dieser Informationsklasse sind daher alle in Tabelle 4.7 aufgeführten Fahrzeugdaten gebündelt.

<b>Information</b>	<b>Beschreibung</b>
Längsgeschwindigkeit	Eigengeschwindigkeit des Fahrzeuges in Fahrtrichtung
Fahrtrichtung	Vorwärts, Rückwärts
Gierrate	Drehrate des Fahrzeuges gegen den Uhrzeigersinn
Längsbeschleunigung	Beschleunigung des Fahrzeuges in x-Richtung
Querb beschleunigung	Beschleunigung des Fahrzeuges in y-Richtung
Lenkwinkel	Einschlagwinkel des Lenkrades
Radwinkel	Auslenkung der Vorderräder
Fahrzeugniveau	Abstand zwischen der Karosserie und den Achsen

**Tabelle 4.7:** Beschreibung des Fahrzeugzustandes

---

## 5 Einzelkomponenten des realisierten Prototyps

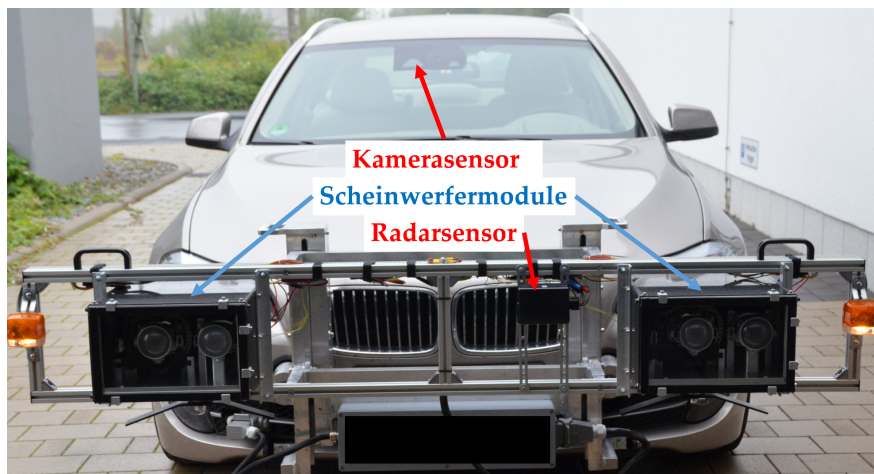
---

Die bisher durchgeführten statischen Untersuchungen haben vielversprechende Ergebnisse geliefert. Im dynamischen Fall kann sich aber vor allem die Wahrnehmung der sich in einer Begegnungssituation ständig anpassenden Lichtverteilung verändern. Deswegen gilt es, die durchgeführten Versuche auf den dynamischen Fall zu übertragen und entsprechend zu prüfen, ob die zuvor gewonnenen Erkenntnisse auch weiterhin Bestand haben. Um diese dynamischen Studien durchführen zu können, wurde ein Prototyp realisiert, der im Folgenden beschrieben wird.

Als Basis wurde auf Versuchsfahrzeuge der Firma *HELLA KGaA Hueck & Co.* zurückgegriffen. Hierbei handelte es sich um sogenannte Rack-Fahrzeuge, an denen durch einen zusätzlichen Vorbau an der Fahrzeugfront – dem Rack – verschiedenste Baugruppen montiert werden können.

Die verwendeten Fahrzeuge sind bereits für lichttechnische Modifikationen vorbereitet worden. Unter anderem ist eine *MicroAutoBox* der Firma *dSpace GmbH* verbaut, auf der die selbst entwickelte Software zur Fusion der Sensordaten und zur Ansteuerung der Lichtsysteme ausgeführt werden kann. Die *MicroAutoBox* besitzt mehrere I/O-Ports, über die verschiedene Signale eingelesen oder ausgegeben werden können. Unter anderem liegen vier Interfaces zur Kommunikation mit physisch getrennten CAN-Bussen vor. Dadurch kann die *MicroAutoBox* als Teilnehmer in die verschiedenen CAN-Busse des Fahrzeuges integriert werden.

Die Versuchsträger wurden um weitere Sensorik und ein Scheinwerfersystem ergänzt, mit denen eine Realisierung der Schlechtwetterlichtfunktion für die angestrebten Versuche möglich ist. Der für die dynamischen Studien verwendete Versuchsträger ist in Abbildung 5.1 gezeigt.



**Abbildung 5.1:** Für die dynamischen Studien ausgerüsteter Versuchsträger



## 5.1 Sensorik

### 5.1.1 Verkehrsteilnehmer

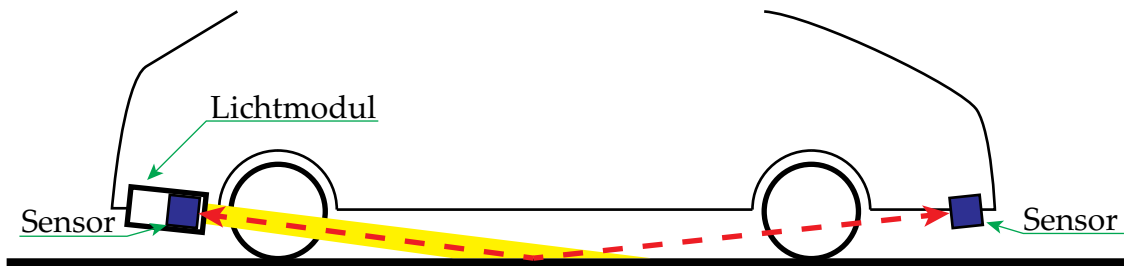
Zur Detektion der Verkehrsteilnehmer werden, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, ein Kamera- und ein Radarsensor eingesetzt. Die verwendeten Versuchsfahrzeuge sind bereits mit einer Mono-Kamera der Firma *HELLA Aglaia Mobile Vision GmbH* ausgerüstet, sodass hier auf ein bestehendes System zurückgegriffen werden konnte. Die Kamera verwendet den monochromen CMOS-Bildsensor KAC-00400 der Firma *Kodak*. Dieser weist eine Auflösung von  $768 \times 488$  Pixeln auf [EKC06]. Das Sichtfeld des Kamerasensors wird zusätzlich durch das verwendete Objektiv mitbestimmt. Der horizontale Bildwinkel beträgt in diesem Fall  $40,42^\circ$  und der vertikale  $25,68^\circ$ .

Die Auswahl des Radarsensors erfolgte anhand der in Abschnitt 3.3.1.1 definierten Anforderungen. Keiner der berücksichtigten Sensoren erfüllt alle Anforderungen [ADC11, DCo12, ELE11, MEC12, TRW11]. Die Wahl fiel auf das ARS 300 der Firma *A.D.C. GmbH*. Dieser Radarsensor hat eine ausreichend hohe Reichweite von 200 m und eine geringe Zykluszeit von 66 ms. Entscheidendes Merkmal war das im Vergleich große horizontale Gesichtsfeld von  $56^\circ$  im Nahbereich ( $d < 60$  m). Dadurch kann eine zuverlässige und genügend lange Erkennung entgegenkommender Fahrzeuge gewährleistet werden. Die Kommunikation erfolgt über einen CAN-Bus. Hierüber können wahlweise 40 Objekte oder 90 Ziele empfangen werden. Ziele werden in jedem Zyklus aus den empfangenen Reflexionen neu bestimmt. Für Objekte erfolgt hingegen eine interne Objektverfolgung (tracking). Durch das damit zur Verfügung stehende Vorwissen aus der Vergangenheit (a priori Information) kann eine verbesserte Zustandsschätzung erfolgen. Alle Spezifikationen sind dem Datenblatt [ADC11] zu entnehmen. Für weiterführende Informationen über den Aufbau des Sensors sei auf die technische Beschreibung [Con10] verwiesen.

### 5.1.2 Straßenverhältnisse

Zu Beginn dieser Arbeit existierte noch keine Sensorik, mit der sich die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn während der Fahrt vermessen lassen. Aus diesem Grunde wurde ein erster Prototyp selbst entwickelt. Ziel war es, die grundsätzliche Machbarkeit aufzuzeigen und damit ein autarkes Gesamtsystem zur Realisierung der Schlechtwetterlichtfunktion zu schaffen. Wesentliche Teile der Entwicklung erfolgten bereits durch Kordt [Kor13]. Das Sensorsystem wurde außerdem schon teilweise in [FK14] vorgestellt.

Das Grobkonzept des Systems ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Es besteht aus einem Lichtmodul im Heckbereich, mit dem ein definiertes Messlicht mittig unter dem Fahrzeug erzeugt wird. Jeweils im Heck- und im Frontbereich befindet sich eine Sensoreinheit. Diese messen die jeweils aufgrund der Reflexion an der Fahrbahnoberfläche erzeugte Beleuchtungsstärke, die ein Maß für die Reflektivität der Fahrbahn darstellt.



**Abbildung 5.2:** Grobkonzept des Sensorsystems zur Messung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn

Um eine Übertragung der Messdaten auf eine realistische Begegnungssituation durchführen zu können, muss eine vergleichbare Beleuchtungssituation vorliegen. Dafür müssen im System kleine Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel realisiert werden. Diese sind durch die Geometrie des Fahrzeuges vorgegeben, lediglich die Anbauhöhe kann beeinflusst werden. Für den Prototyp wurde eine Anbauhöhe von 19 cm gewählt, wodurch eine noch ausreichend große Bodenfreiheit zur Verfügung steht. Betrachtet man das Lichtmodul als Scheinwerfer des eigenen Fahrzeuges und den Vorwärtsreflexionsensor als den zuvor eingeführten virtuellen Messpunkt (vergleiche Abbildung 3.9), so entsprechen die gewählten Geometrien in etwa einem Begegnungsabstand von 25 m. Das am Versuchsfahrzeug montierte Sensorsystem ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Die vordere Sensoreinheit ist am Rack befestigt. Das Lichtmodul und die hintere Sensoreinheit wurden über einen Aufbau an der Anhängerkupplung angebracht. Diese Sensoreinheiten bestehen jeweils aus einem Sensor und einem Steuergerät.



(a) Vorderer Sensor



(b) Lichtmodul und hinterer Sensor

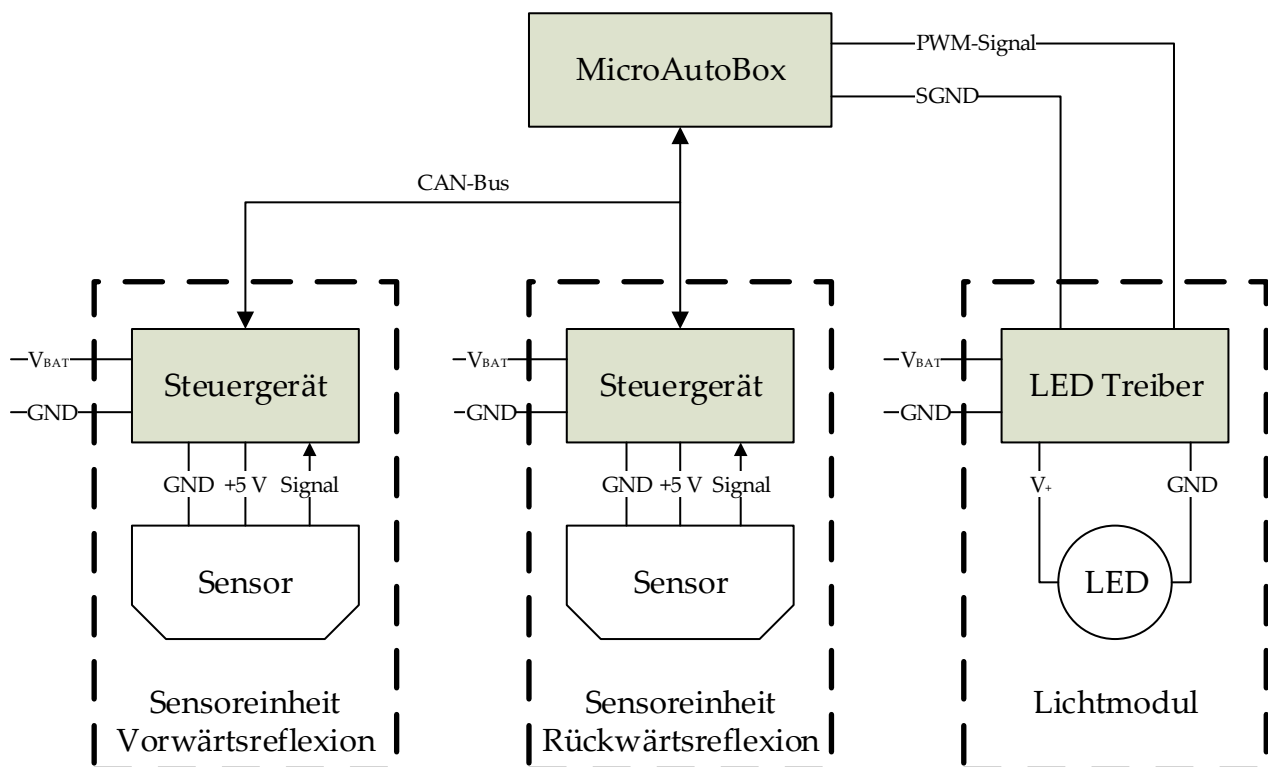
**Abbildung 5.3:** Mit dem Sensorsystem ausgerüstetes Versuchsfahrzeug

In Abbildung 5.4 ist das Messlicht auf der Fahrbahn zu sehen, dass das System unterhalb des ausgerüsteten Versuchsfahrzeuges erzeugt. Aufgrund des zusätzlichen Rackaufbaus liegt der Mittelpunkt des Systems, und somit auch der Messfleck, etwas weiter in Richtung Fahrzeugfront verschoben.



**Abbildung 5.4:** Vom Lichtmodul unterhalb des Versuchsfahrzeuges erzeugtes Messlicht

Die Architektur des Sensorsystems ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Als Master des Systems fungiert eine MicroAutoBox. Diese liefert zum einen das PWM-Signal zur Modulation der LED. Zum anderen können über einen CAN-Bus Befehle an die Steuergeräte gesendet werden. Ebenfalls auf diesem Wege werden die von den Steuergeräten verarbeiteten Messdaten übertragen. Diese können dann im Master zur Generierung des Umfeldmodells herangezogen werden.



**Abbildung 5.5:** Systemarchitektur des Sensorsystems

Nachfolgend werden die einzelnen Teilsysteme detaillierter betrachtet.

### 5.1.2.1 Lichtmodul

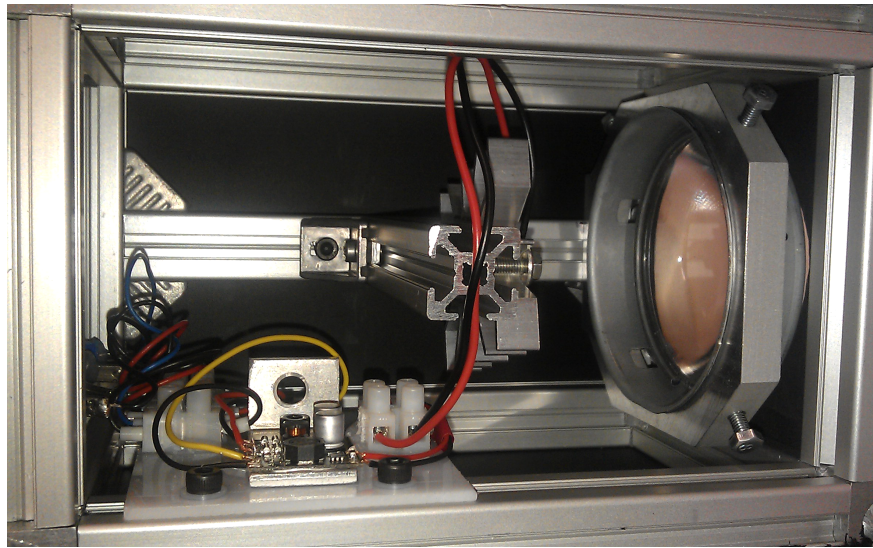
Die Forderung nach einem breitbandigen Spektrum und dem Ausschluss von Störgrößen haben direkten Einfluss auf die Wahl der Strahlungsquelle. Da vom Sensorsystem eine durch das Lichtmodul erzeugte Beleuchtungsstärke gemessen werden soll, ist der Einsatz einer breitbandigen Lichtquelle zweckmäßig, die beispielsweise auch in Scheinwerfermodulen Verwendung findet.

Um den Einfluss von Störgrößen, zum Beispiel die Scheinwerfer anderer Fahrzeuge, herausfiltern zu können, ist eine Modulation des Messlichtes zielführend. Eine sinnvolle Maßnahme ist hier die direkte Modulation der Lichtquelle selbst. Dadurch wird kein zusätzlicher Bauraum benötigt, das System bleibt folglich kompakt.

Aus den genannten Gründen wird eine weiße LED als Lichtquelle eingesetzt. Hierbei handelt es sich um die High-Power LED Cree XLamp XP-E R2 der Firma *Cree, Inc.* Diese wird mit einer Stromstärke von 500 mA versorgt, was laut Datenblatt [Cre10] einem Lichtstrom von 148 lm zur Folge hat. Die Farbtemperatur entspricht mit 6500 K einem tageslichtähnlichen Weiß. Betrieben wird die LED mit einer Konstantstromquelle. Diese ermöglicht gleichzeitig auch das Dimmen der LED über eine PWM, worüber die angesprochene Modulation vorgenommen wird. Diese ist notwendig, da der Einfluss von Störlichtern nicht anhand der Wellenlänge vom Messlicht getrennt und dadurch herausgefiltert werden kann. Damit die LED nicht überhitzt, wird außerdem ein Kühlkörper verbaut.

Wie bereits erwähnt, wird das Lichtmodul mit einem Aufbau an der Anhängerkupplung befestigt. Aufgrund dieser Anbringung ist von möglichen Vibrationen der Baugruppe auszugehen, wodurch sich der Beleuchtungswinkel periodisch ändern könnte. Weiterhin muss der verwendete Lichtspot größer als die maximal mögliche Körnung der Fahrbahn gewählt werden, damit das Reflexionsverhalten der Fahrbahn von den Sensoren gänzlich erfasst werden kann. Der Prototyp erzeugt deswegen einen Messfleck auf der Fahrbahn. Dieser wird durch den Einsatz einer plankonvexen Linse mit einem Durchmesser von 70 mm geformt, die die leuchtende Fläche des LED-Chips auf die Fahrbahn projiziert. Die Einzelkomponenten sitzen in einem Gehäuse, das vor Umwelteinflüssen schützt. Der Aufbau des Lichtmoduls ist in Abbildung 5.6 gezeigt.

Bei der Linse handelt es um ein Standardbauteil, das zum Beispiel auch im HKM Verwendung findet. Durch andere optische Konzepte ließe sich zukünftig eine deutlich kompaktere Bauweise erreichen. Mit einem Reflektor könnte außerdem eine höhere Lichtausbeute erzielt werden.



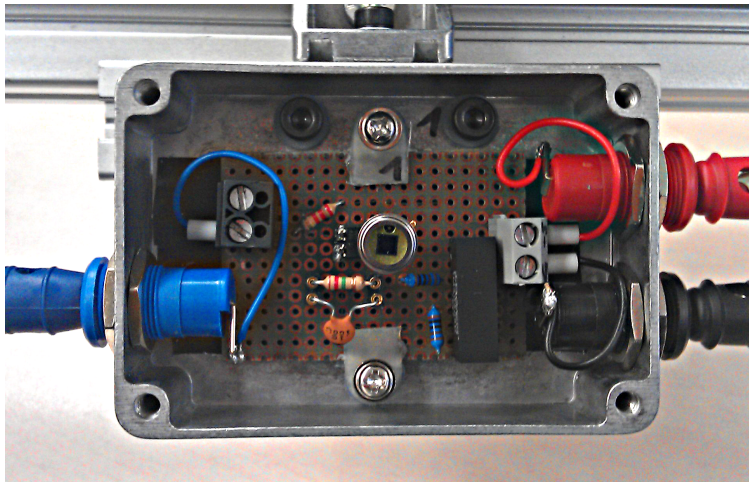
**Abbildung 5.6:** Seitlicher Blick in das noch offene Lichtmodul

### 5.1.2.2 Sensoreinheit

Die Sensoreinheit hat zwei zentrale Aufgaben zu erfüllen. Zum einen muss sie eine physikalische Größe als Maß für die Reflektivität der Fahrbahn messen. Zum anderen müssen diese Messwerte nachverarbeitet und anschließend anderen Systemen in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden. Aus zeitlichen Gründen wurde das Sensorsystem in zwei Untersysteme geteilt, einen Sensor und eine Recheneinheit. Dadurch konnte zum Teil auf bereits bestehende Komponenten zurückgegriffen werden.

Es erfolgt eine Messung der Beleuchtungsstärke, die als Maß für die Reflektivität der Fahrbahn dient. Dafür wird die Photodiode BPW 21 der Firma *OSRAM Opto Semiconductors* mit integrierter  $V(\lambda)$ -Anpassung eingesetzt, deren Photostrom sich proportional zur Beleuchtungsstärke verhält. Dieser Strom liegt allerdings bei den zu erwartenden Beleuchtungsstärken im Nanoampere-Bereich. Mit dem Transimpedanzverstärker OPA380 von *Texas Instruments* wird dieser deswegen in eine proportionale Photospannung umgewandelt. Die Datenblätter beider Bauteile finden sich in [OSR07] und [TI07].

Da der Transimpedanzverstärker im Normalbetrieb keine Spannung von 0 V gegenüber der Masse erreicht, wird ein Pull-Down-Widerstand eingesetzt. Dadurch wird eine duale Spannungsversorgung benötigt, die mittels eines Gleichspannungswandlers erzeugt wird. Genauere Details zur Auslegung der Schaltung sind Kordt [Kor13] zu entnehmen. Der gesamte Schaltungsaufbau ist zum Schutz vor Umgebungseinflüssen in ein Aluminiumgehäuse gefasst. Der Deckel ist mit einem Sichtfenster aus lichttransparentem Acrylglas versehen, um die notwendige Wechselwirkung zwischen Messlicht und Photodiode zu ermöglichen. In Abbildung 5.7 ist der Aufbau ohne Deckel gezeigt.



**Abbildung 5.7:** Blick auf die Sensorschaltung bei offenem Gehäuse

Der Messbereich ist für den Sensor zur Messung der Vorwärtsreflexion deutlich anders zu wählen als der für den Sensor zur Messung der Rückwärtsreflexion, siehe Abschnitt 3.3.1.2. Deswegen existieren zwei verschiedene Schaltungen, die sich im Verstärkungsfaktor unterscheiden.

Eine Weiterverarbeitung und -verteilung der Daten erfolgt anschließend in der Recheneinheit. Als Recheneinheit fungiert ein bereits existentes Steuergerät. Dieses besitzt einen Mikrocontroller, einen ADU sowie ein CAN-Interface und stellt darüber hinaus eine externe Versorgungsspannung zur Verfügung. Lediglich die Software muss entsprechend dem Anwendungsfall angepasst werden. Über den ADU werden die analogen Eingangssignale des Sensors in digitale Signale gewandelt. Diese können dann im Mikrocontroller verarbeitet werden. Zur anschließenden Verteilung der Daten wird der CAN-Bus genutzt. Über die zur Verfügung gestellte externe Spannungsversorgung wird der Operationsverstärker der Sensorschaltung gespeist.

Bei der Auswertung des Sensorsignals muss das Nutz- vom Störsignal getrennt werden, wofür sich diese eindeutig unterscheiden lassen müssen. Eine Möglichkeit besteht in der Auswertung im Frequenzbereich. Zu diesem Zweck wird die angesprochene Modulation der Lichtquelle vorgenommen. Durch ein rechteckförmiges PWM-Signal wird diese periodisch ein- und ausgeschaltet. Dies führt ebenfalls zu einem rechteckförmigen Messsignal des Sensors. Mit der Wahl einer geeigneten Frequenz des PWM-Signals ist somit eine Unterscheidung zwischen dem Nutz- und dem durch andere Lichtquellen hervorgerufenen Störsignal möglich.

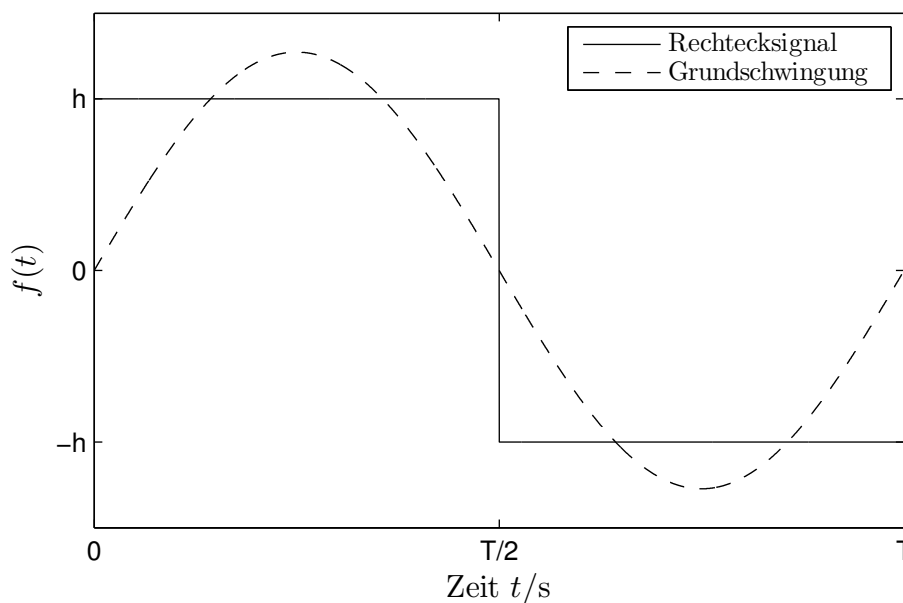
Zur Auswertung im Frequenzbereich kommen mehrere Verfahren in Betracht. Möglich sind unter anderem eine Fourier-Transformation, ein Verfahren nach dem Prinzip eines Lock-In-Verstärkers [Mea83] oder die Verwendung des Goertzel-Algorithmus [Goe58]. Die beiden letzteren Verfahren sind in diesem Fall geeigneter, da die Amplitudeninformation nur zu einer einzigen Frequenz, nämlich der gewählten Modulationsfrequenz, benötigt wird. In durchgeführten Messungen lieferten beide Verfahren identische Ergeb-

nisse. Der Algorithmus muss allerdings auf einem Mikrocontroller mit begrenzten Ressourcen implementiert werden. Aufgrund des geringeren Rechenaufwandes fiel die Wahl deswegen auf das Lock-In-Verfahren [Kor13].

Dieser Algorithmus ist ursprünglich für sinusförmige Signale entwickelt worden. Durch die Modulation der LED entsteht allerdings ein rechteckförmiges Messsignal. Ein solches Rechtecksignal  $f(t)$  mit dem Scheitelwert  $h$  kann durch eine Fourierreihe ausgedrückt werden, die dieses in unendlich viele Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenzen und Amplituden zerlegt:

$$f(t) = \frac{4h}{\pi} \left[ \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right] = \frac{4h}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin (2k-1) \omega t}{2k-1} \quad (5.1)$$

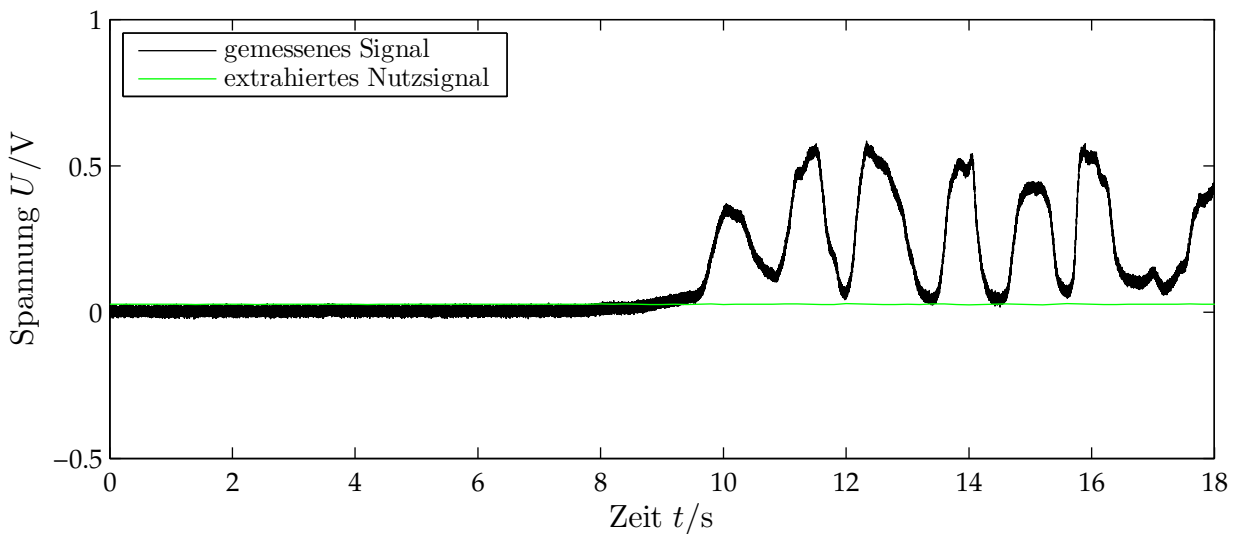
Über das Lock-In-Verfahren wird die Amplitude der Grundschiwingung  $g(t) = \frac{4h}{\pi} \sin \omega t$  bestimmt. Der eigentliche Scheitelwert  $h$  der Rechteckschiwingung berechnet sich dann aus dieser Amplitude mit dem Korrekturfaktor  $\frac{\pi}{4}$ . Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.8 für einen Rechteckimpuls allgemein dargestellt.



**Abbildung 5.8:** Rechteckimpuls und dessen Näherung durch die zugehörige Fourierreihe bis zum ersten Glied (Grundschiwingung)

In Abbildung 5.9 ist das Ergebnis der Anwendung des Algorithmus auf in Labormessungen gewonnene Daten gezeigt. Das Lichtmodul erzeugte eine konstante Beleuchtungsstärke von  $E = 330 \text{ mx}$ . Nach circa acht Sekunden wurden Störungen in das System eingebracht. Zum einen wurde ein konstantes Störlicht durch das Einschalten der Deckenbeleuchtung erzeugt. Hierbei handelt es sich um Leuchtstofflampen, die mit einer Modulationsfrequenz von  $100 \text{ Hz}$  Licht emittieren. Zum anderen wurden durch gezieltes Beleuchten des Sensors mit einer Taschenlampe variable Störungen geschaffen. Trotz dieser Einflüsse bleibt das aus den Daten extrahierte Nutzsignal nahezu konstant. Die geringfügigen Abweichungen resultieren aus unvermeidbaren Reflexionen des modulierten Mess-

lichtes der LED, zum Beispiel verursacht durch in der Nähe befindliche Personen. Im Mittel entspricht das extrahierte Nutzsignal einer Beleuchtungsstärke von  $E = 323 \text{ mx}$ .



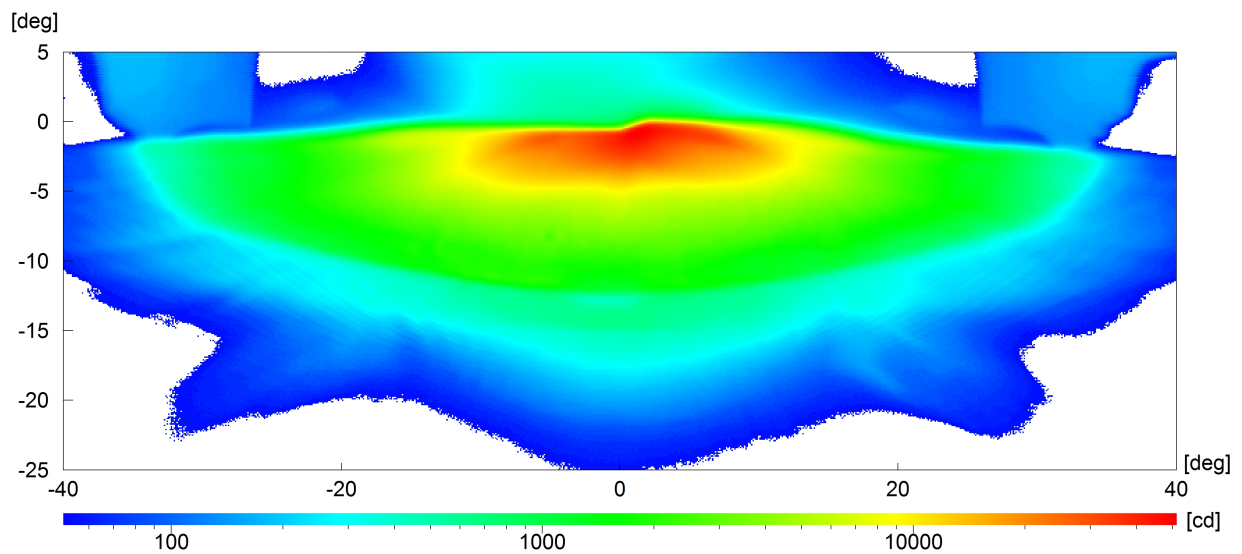
**Abbildung 5.9:** Ergebnis des Lock-In-Verfahrens zur Kompensation künstlich eingebrachter Störungen

## 5.2 Scheinwerfer

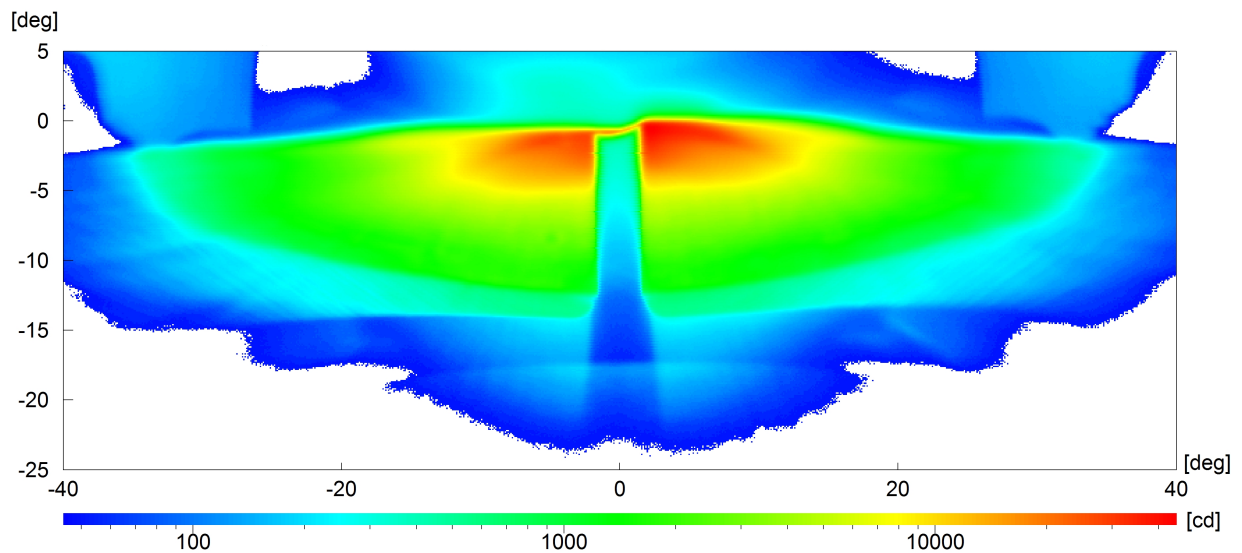
In Kapitel 3.3 wird bereits erwähnt, dass zur Umsetzung der Schlechtwetterlichtfunktion von der Verwendung eines Matrix-Scheinwerfers ausgegangen wird und dementsprechend die Anforderungen an einen solchen Scheinwerfer erarbeitet. Bisher existiert jedoch kein Matrix-Scheinwerfer, der eine hinreichend hohe Auflösung im Abblendlichtbereich bietet. Aktuelle Systeme sind vor allem für die Funktionalität blendfreies Fernlicht konzipiert worden, sodass eine hohe Auflösung lediglich im Fernlichtbereich vorliegt.

Zur Demonstration der Funktionalität des Gesamtsystems in dynamischen Versuchen wurde ein solcher Matrix-Scheinwerfer nicht neu entwickelt. Vielmehr besteht das Ziel, die Anforderungen an solche zukünftigen Scheinwerfersysteme durch die dynamischen Untersuchungen realitätsnah zu bestimmen. Für die Umsetzung der Lichtfunktion wurden daher bestehende Module modifiziert. Ähnlich wie beim Pilotversuch, vergleiche Abschnitt 3.2.1, wurde eine statische Veränderung der Lichtverteilung durch eine zusätzliche Blende realisiert. Basis bildet das Landstraßenlicht eines VarioX-Moduls der Firma *HELLA KGaA Hueck & Co.* Mit der Blende wird in der Abblendlichtverteilung ein vertikaler „Tunnel“ erzeugt, der im horizontalen Winkelbereich eine Breite von  $3^\circ$  aufweist. Die resultierende Lichtstärkeverteilung ist in Abbildung 5.10b dargestellt. Zum Vergleich ist die ursprüngliche Lichtstärkeverteilung in Abbildung 5.10a gezeigt. Aufgrund von Fertigungstoleranzen deckt die Blende nicht den gesamten Abblendlichtbereich in der Vertikalen ab. Die Abdeckung ist aber ausreichend, um eine Entblendung für Begegnungsabstände bis circa 100 m zu gewährleisten.





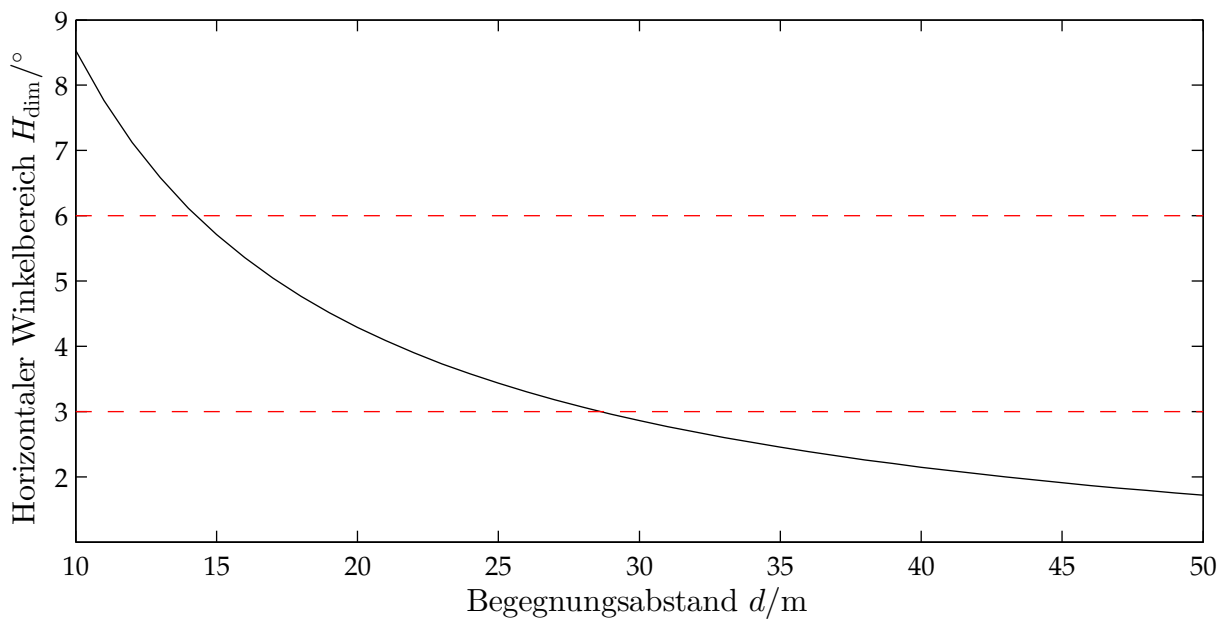
(a) Originale Lichtstärkeverteilung



(b) Modifizierte Lichtstärkeverteilung

**Abbildung 5.10:** Vergleich der Lichtverteilungen des originalen und des angepassten Scheinwerfermoduls. Der Entblendungsbereich in der Mitte wird durch eine zusätzliche Blende erreicht

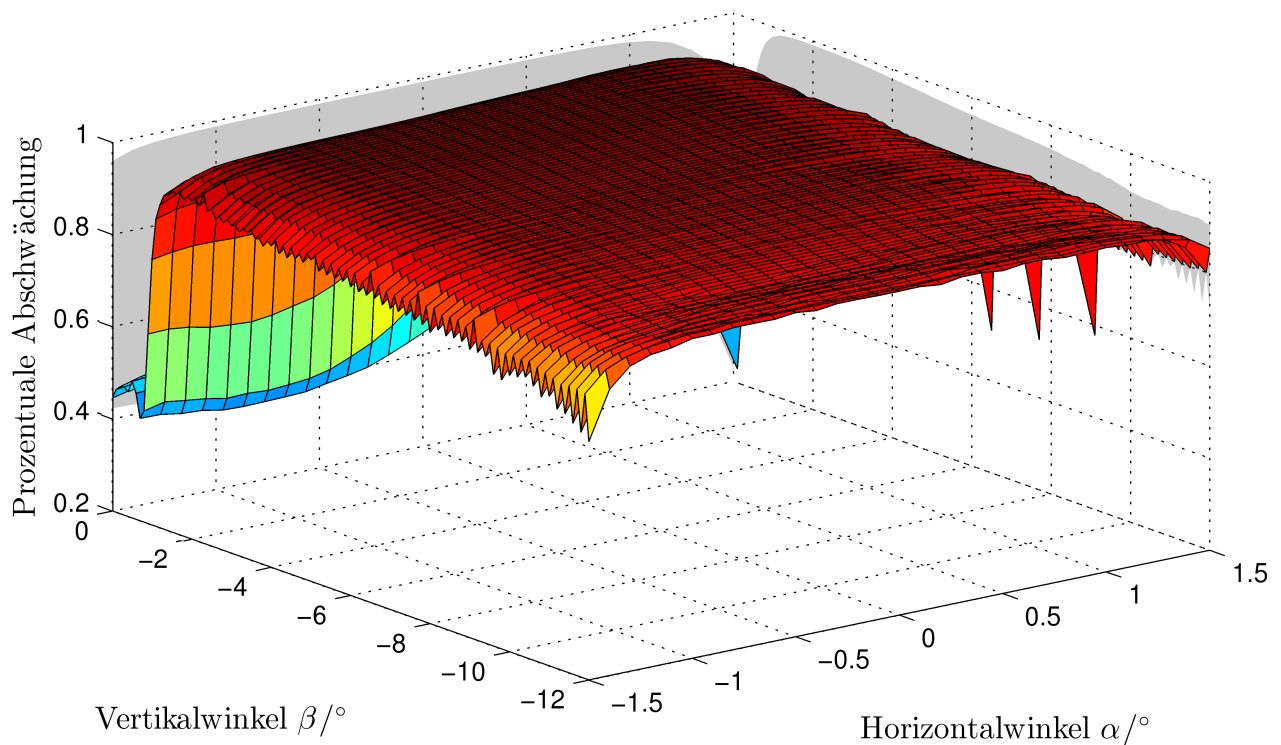
Es wurde ein horizontal abzuschattender Winkelbereich von  $3^\circ$  gewählt, da sich bereits in der statischen Probandenstudie gezeigt hat, dass eine Abdunkelung dieser Breite nicht wahrgenommen werden konnte. Bis zu welcher Grenzentfernung eine Entblendung während eines Begegnungsvorganges sichergestellt werden kann, lässt sich anhand theoretischer Vorüberlegungen bestimmen. In Abbildung 5.11 ist der Zusammenhang zwischen dem Begegnungsabstand und dem horizontalen Winkelbereich, der zur Entblendung der Windschutzscheibe des entgegenkommenden Fahrzeuges benötigt wird, beispielhaft für eine Passierfahrt auf einer Geraden dargestellt. Als Orientierungshilfe sind die Bereiche  $3^\circ$  und  $6^\circ$  rot markiert.



**Abbildung 5.11:** Benötigter horizontaler Winkelbereich zur Entblendung der Windschutzscheibe eines entgegenkommenden Fahrzeuges auf einer Geraden, aufgetragen über dem Begegnungsabstand

Wenn demnach die gesamte Windschutzscheibe entblendet werden soll, ist dies bei einem Tunnel von  $3^\circ$  bis zu einem Begegnungsabstand von knapp 29 m möglich. Der benötigte Winkelbereich steigt mit kürzeren Entfernungen stark an. Um alle Entfernungen abdecken zu können, müsste die Blende daher sehr groß werden. Diese Problematik wird durch folgenden Ansatz entschärft: Solange der benötigte horizontale Winkelbereich von der Blende noch abgedeckt werden kann, erfolgt eine Entblendung der gesamten Windschutzscheibe. Unterschreitet der Abstand die besagte Grenze, sodass der Bereich nicht mehr vollständig von der Blende abgedunkelt werden kann, wird nur noch die Fahrerseite berücksichtigt. In diesem Fall ist die  $6^\circ$ -Linie im Diagramm entscheidend. Dadurch ist es möglich, trotz kleinerer Blende die Funktionalität für Begegnungsabstände bis fast 14 m zu gewährleisten.

Das Abblendlichtmodul wurde sowohl mit als auch ohne die gefertigte Blende lichttechnisch vermessen, vergleiche Abbildung 5.10. Dadurch lässt sich ermitteln, welchen Einfluss die Blende tatsächlich hat. Zwar haben lichttechnische Simulationen ergeben, dass durch die Blende ein horizontaler Winkelbereich von  $3^\circ$  komplett abgeschattet wird, allerdings basiert diese Simulation auf der Strahlentheorie. Daher bleiben Streu- und Beugungseffekte größtenteils unberücksichtigt, die eine vollständige Abdunkelung über den gesamten Bereich verhindern. In Abbildung 5.12 ist die tatsächliche Wirkung der Blende gezeigt. Dargestellt ist hier nur der relevante horizontale Bereich zwischen  $-1,5^\circ$  und  $1,5^\circ$ . Der vertikale Bereich erstreckt sich von  $-12^\circ$  bis  $0^\circ$ .



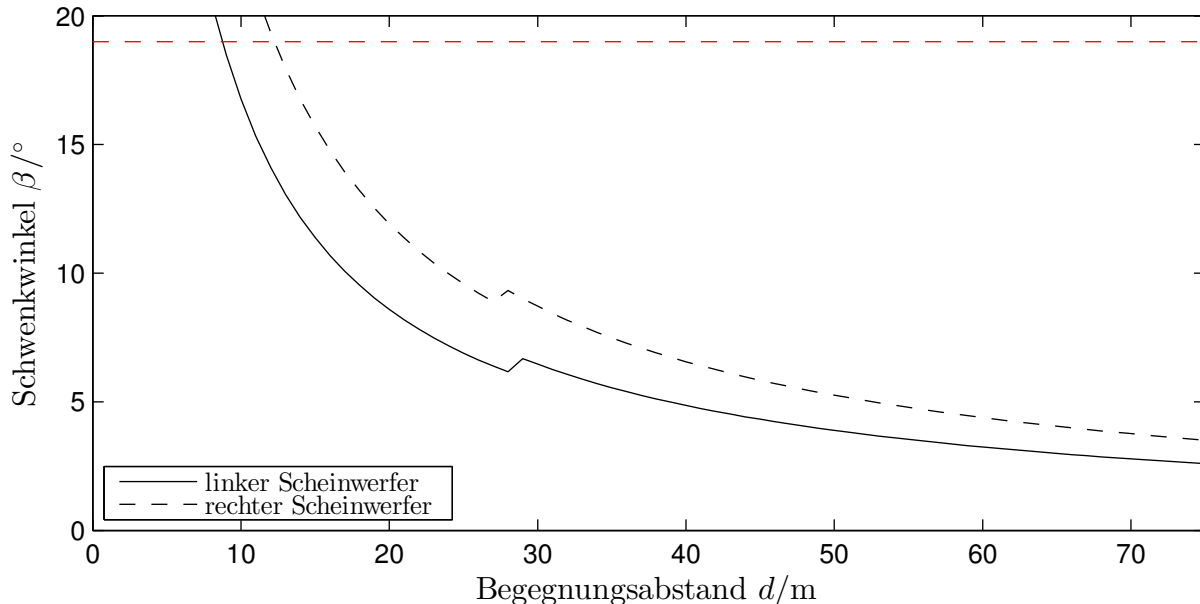
**Abbildung 5.12:** Durch die Blende erwirkte prozentuale Abschwächung der Lichtstärke

Es zeigt sich, dass eine sehr gute Abschattung über den gesamten Bereich erreicht wird. Einzig bei Vertikalwinkeln  $\beta > -1^\circ$  kommt es zu einer verminderten Wirkung, da hier aufgrund von Fertigungstoleranzen ein kleiner Spalt zwischen Blende und Vario-Walze besteht. In den Randbereichen kommt es ebenfalls zu einem Wirkungsabfall, der sich allerdings nicht vermeiden lässt.

Bei der Blende handelt es sich um ein statisches Element, mit dem sich demnach nur eine statische Veränderung in der Lichtverteilung vornehmen lässt. Um nun den erzeugten Tunnel auf entgegenkommende Verkehrsteilnehmer ausrichten zu können, wird ein Schwenkmodul der Firma *HELLA KGaA Hueck & Co.* eingesetzt, das die zurzeit höchste Positionsgenauigkeit bietet. In Serienscheinwerfern finden solche Schwenkmodule zum Beispiel zur Realisierung der Lichtfunktionen dynamisches Kurvenlicht und blendfreies Fernlicht Anwendung. Aus verschiedenen Gründen werden dabei der maximale und minimale Schwenkwinkel in Abhängigkeit der Schwenkrichtung unterschiedlich stark eingeschränkt. Für diese Arbeit wurden diese Einschränkungen softwareseitig und hardwareseitig durch das Entfernen von Anschlägen aufgehoben, um einen möglichst großen Schwenkbereich realisieren zu können. Die so angepassten Schwenkmodule erlauben das Schwenken um bis zu  $\pm 19^\circ$ . Dadurch kann das Gesamtsystem im Vergleich zur „Serienausführung“ eine Entblendung bis hin zu kleineren Begegnungsabständen sicherstellen.

In Abbildung 5.13 sind die sich durch dieses Scheinwerfersystem ergebenden Grenzen dargestellt. Als Grundlage für die Berechnung dienen die in Abschnitt 3.3.2.1 getroffenen Annahmen. In diesem Fall befinden sich allerdings beide Fahrzeuge mittig auf ihrem Fahrstreifen. Hierbei wird nicht mehr überprüft, ob der erzeugte Tunnel zu dichten Ab-

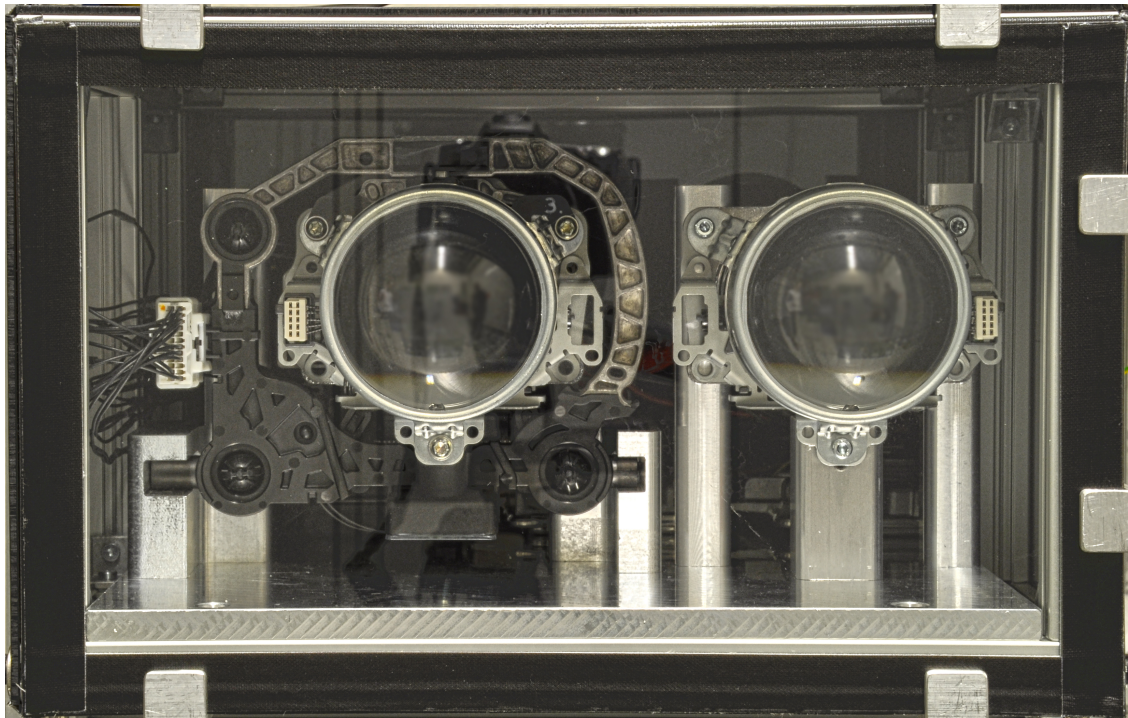
ständen hin noch ausreicht, um die rechte Hälfte der Windschutzscheibe komplett zu entblenden. Vielmehr wird nur betrachtet, bis wann die Positionierung des abgeschatteten Bereiches entsprechend der Vorgaben erfolgen kann.



**Abbildung 5.13:** Limitierung durch das eingesetzte Scheinwerfersystem für eine Begegnungssituation auf einer Geraden, betrachtet für den linken und den rechten Scheinwerfer. Der maximal realisierbare Schwenkwinkel ist rot gestrichelt eingezeichnet

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass mit diesem System eine Ausrichtung der Module bis zu einem Begegnungsabstand von circa 13 m vorgenommen werden kann. Ab dieser Entfernung hat der rechte Scheinwerfer bereits den maximalen Schwenkwinkel erreicht. Bei dem linken Scheinwerfer wird diese Grenze erst für einen Abstand kleiner 9 m überschritten. Zu erkennen sind ebenfalls die kleinen Sprünge in den beiden Verläufen, da bei einer Entfernung von etwa 28 m die Positionierung der Blende von der ganzen auf die halbe Windschutzscheibe geändert wird. Die Grenzentfernung von 13 m, ab der eine Einstellung beider Module nicht mehr optimal möglich ist, verschiebt sich zu kürzeren Begegnungsabständen, wenn der laterale Abstand zwischen beiden Fahrzeugen geringer ausfällt. Die Diagramme gelten beispielhaft für die Begegnungssituation auf einer Geraden.

Für nachfolgende Untersuchungen wurden Modulkisten aufgebaut, die direkt am Rack montiert werden können. Neben dem beschriebenen System enthält eine solche Kiste auch ein Referenzsystem, das aus einem unveränderten VarioX-Modul besteht. So kann während der Fahrt zwischen den beiden Scheinwerfersystemen gewechselt werden, um diese direkt miteinander zu vergleichen. Eine solche Modulkiste ist in Abbildung 5.14 gezeigt.



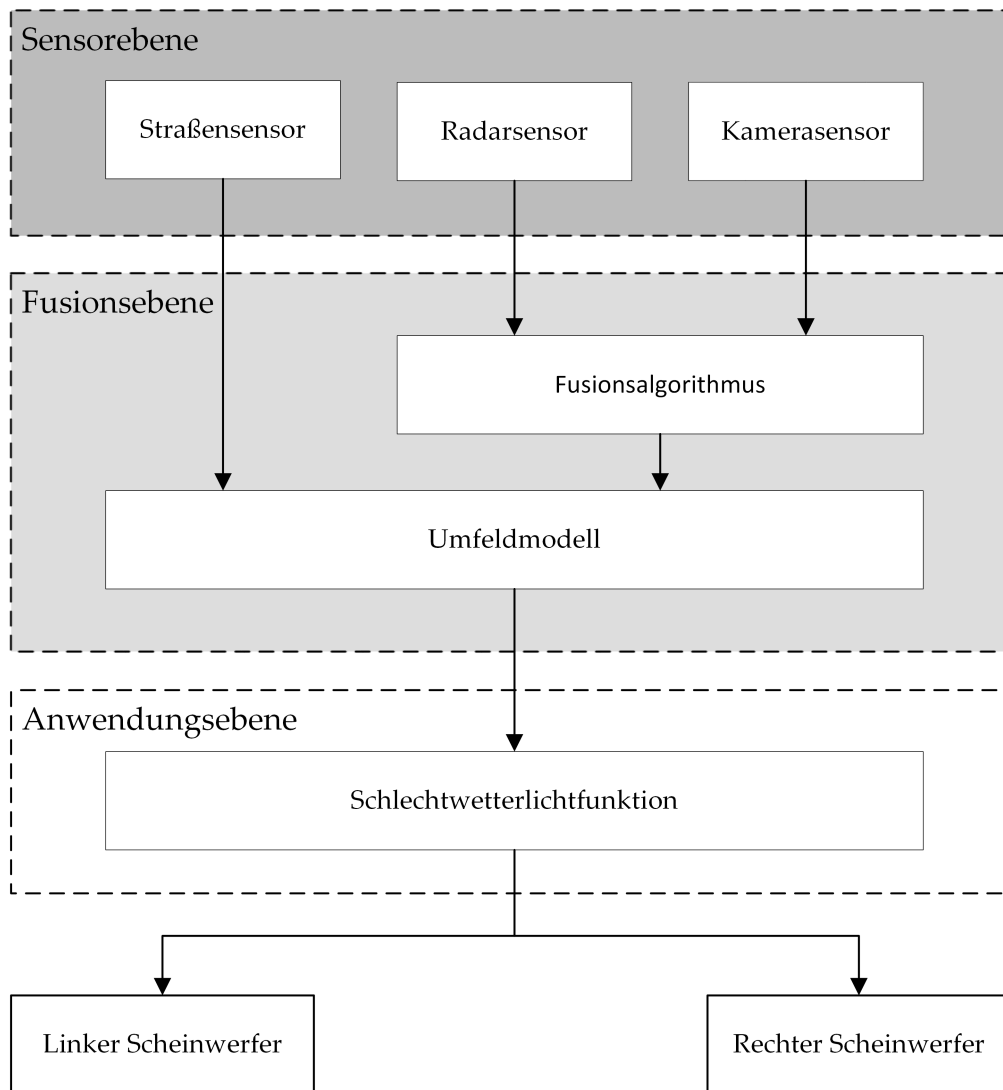
**Abbildung 5.14:** Modulkiste mit zwei verschiedenen Scheinwerfersystemen. Links befindet sich das angepasste System mit Schwenkmodul, rechts das unveränderte VarioX-Modul

---

## 6 Experimentelle Ergebnisse

---

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Prototyp entwickelt, mit dem sich die Schlechtwetterlichtfunktion zum Zwecke dynamischer Untersuchungen realisieren lässt. Das Zusammenspiel der bisher beschriebenen Komponenten und Algorithmen ist der Übersicht halber in Abbildung 6.1 zusammengefasst.



**Abbildung 6.1:** Realisierung des Schlechtwetterlichtes mit dem entwickelten Prototyp

Ziel dieser Untersuchungen ist in erster Linie der Nachweis eines möglichen Nutzens der Schlechtwetterlichtfunktion in realen Begegnungssituationen. Darüber hinaus können anhand der gewählten Umsetzung des Systems Anforderungen präzisiert und neue Forschungshypothesen abgeleitet werden.

Die Basis des Systems bilden die in Kapitel 5 vorgestellten Sensoren. Mithilfe der Sensordaten wird dann das in Kapitel 4 beschriebene Umfeldmodell erzeugt, wobei in der Darstellung und im Folgenden ausschließlich die Detektion anderer Verkehrsteilnehmer und der Fahrbahnverhältnisse betrachtet wird. Die eigentliche Anwendung verarbeitet diese Daten und steuert entsprechend die Scheinwerfer zur Entblendung entgegenkommender Fahrzeuge an. Im Rahmen der Funktionsentwicklung wurden zunächst die einzelnen Sensoren und deren Fusion erprobt und in mehreren Iterationsschritten sukzessive optimiert. Anschließend erfolgte eine Validierung des Zusammenspiels der Einzelkomponenten in einem zweistufigen Evaluationsverfahren.

Im Folgenden wird daher zuerst auf die Untersuchung der Einzelkomponenten zur Generierung der Umfelderkennung eingegangen, bevor das Zusammenspiel der Komponenten zur Realisierung der adaptiven Anpassung der Lichtverteilung betrachtet wird.

## 6.1 Validierung der Umfelderkennung

Für die Realisierung der Schlechtwetterlichtfunktion als autarkes System sind zwei Funktionalitäten entscheidend: die Detektion anderer Verkehrsteilnehmer und die der Straßenverhältnisse.

### 6.1.1 Detektion der Verkehrsteilnehmer

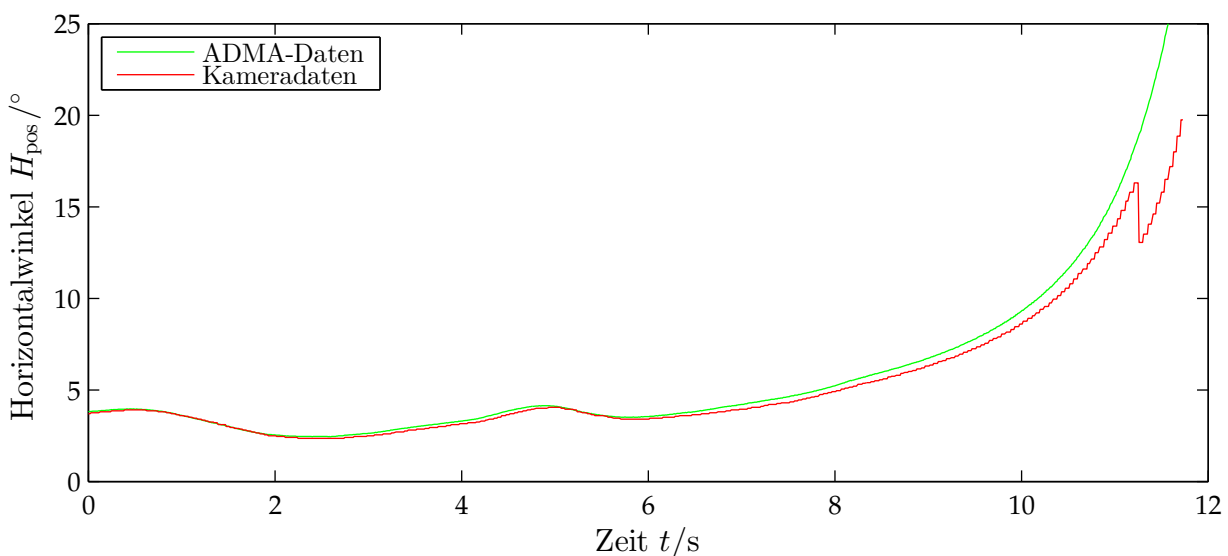
Die genaue Erkennung entgegenkommender Fahrzeuge ist für eine zuverlässige Entblendung selbiger unabdingbar. Wie in Abschnitt 4.1 bereits erläutert, wird die Umfeldbeschreibung mithilfe eines Kamera- und Radarsensors erzeugt. Um die Genauigkeit der Einzelsensoren und der fusionierten Daten zu prüfen, wurden dynamische Vergleichsmessungen durchgeführt. Als Referenzsystem diente das Kreiselsystem ADMA (Automotive Dynamic Motion Analyzer) der Firma *GeneSys Elektronik GmbH*. Damit steht ein DGPS-System zur Verfügung, mit dem sich die Position eines Fahrzeuges mit einer Genauigkeit von bis zu einem Zentimeter bestimmen lässt [Gri04]. Die maximale Abweichung der Positionsdaten beträgt fünf Zentimeter.

An den Versuchsfahrten waren stets zwei Fahrzeuge beteiligt. Beide sind mit jeweils einem ADMA-System ausgestattet worden, sodass für jeden Zeitpunkt die relativen Positionen und Orientierungen bestimmt werden können. In den Versuchen wurden verschiedene Begegnungssituationen und Kolonnenfahrten nachgestellt. Dabei wurden vor allem die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge variiert, um möglichst viele unterschiedliche Datensätze zu generieren. Die Fahrten zur Nachstellung der Begegnungssituationen fanden im Gewerbegebiet *Am Mondschein* in Lippstadt statt, da hier zu später Stunde eine nahezu ungenutzte „Teststrecke“ zur Verfügung stand. Weitere Daten konnten in späteren Fahrten auf der Regenstrecke der Firma *HELLA KGaA Hueck & Co.* gewonnen werden.

### 6.1.1.1 Genauigkeit der Einzelsensoren

Zur Bestimmung der Genauigkeit der beiden Sensoren wird der Vergleich zu einem Referenzsystem herangezogen. Diese Referenzdaten stammen von den angesprochenen ADMA-Systemen, die in der gewählten Konfiguration eine sehr geringe Zykluszeit von 10 ms aufweisen. Auf diese Weise können die Daten beider Sensoren zueinander in Beziehung gebracht werden. Um die Daten des Kamera- und Radarsensors miteinander fusionieren zu können, ist eine Synchronisierung der Daten vorzunehmen. Hier sind vor allem die unterschiedlichen Zykluszeiten der Sensoren von Bedeutung. Die reine Zykluszeit ist allerdings noch keine direkte Angabe zu dem Alter der empfangenen Daten, sondern lediglich die Zeitdifferenz zwischen den zyklisch gesendeten respektive empfangenen Daten. Aus diesem Grund wird zunächst untersucht, wie alt die empfangenen Daten sind, um diese anschließend für die Datenfusion synchronisieren zu können.

Die spezifische Latenzzeit des Kamerasensors ist vor allem auf das verwendete System zurückzuführen. Die Bildverarbeitungsapplikation des Sensorsystems läuft zu Entwicklungszwecken auf einem Rechner mit einem Windows-Betriebssystem. Durch das Betriebssystem und die verwendete Hardware kommt es zu internen Verzögerungen bei der Weitergabe eines Frames, sodass dieser erst nach einer näherungsweise konstanten Latenzzeit verarbeitet werden kann. Die Verzögerung kann je nach Hardware der Versuchsfahrzeuge bis zu 200 ms betragen. In Abbildung 6.2 ist der Einfluss dieser Verzögerung am Beispiel einer Begegnungsfahrt auf einer Geraden gezeigt. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  s beträgt der Begegnungsabstand, in diesem Fall definiert als der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugfronten,  $d_{\max} = 102,5$  m. Circa zwölf Sekunden später beträgt er  $d_{\min} = 4,5$  m. Da der Kamerasensor nur Winkelinformationen über das andere Fahrzeug bereitstellt, wurde der Referenz-Horizontalwinkel zu dessen Mittelpunkt aus den Positionsdaten berechnet und in das Kamera-KOS transformiert.

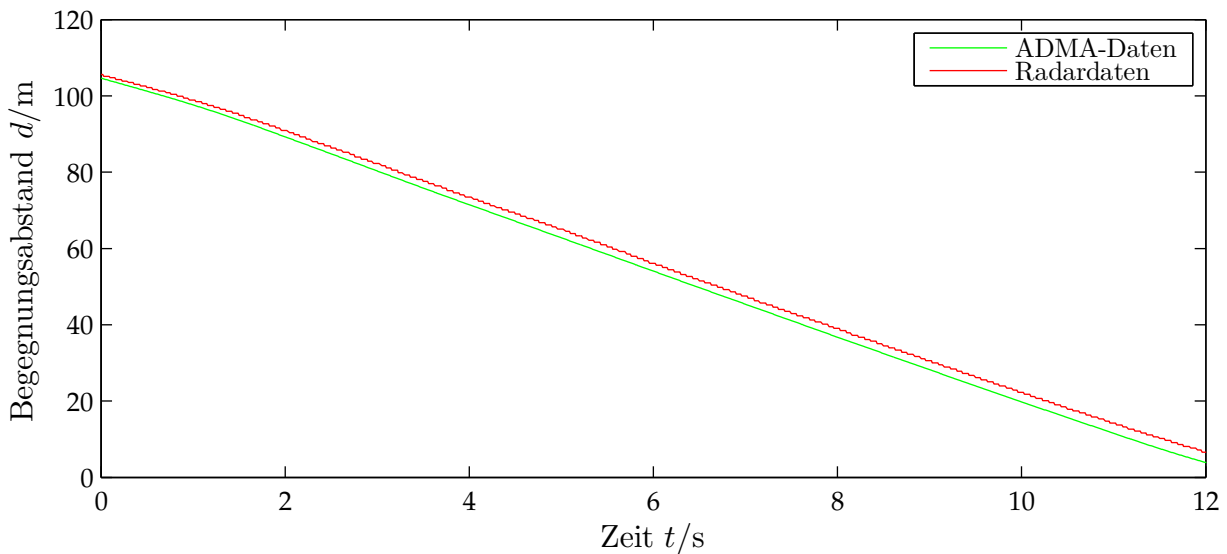


**Abbildung 6.2:** Einfluss der Verzögerung der Daten des Kamerasensors auf dessen Genauigkeit am Beispiel des ermittelten Horizontalwinkels für ein Objekt



Es zeigt sich, dass der zeitliche Versatz für größere Entfernungen zum Objekt nur zu geringen Abweichungen führt, da hier die Änderungsgeschwindigkeit des Horizontalwinkels noch sehr gering ist. Zu kürzeren Entfernungen hin steigt diese Geschwindigkeit stetig an und der Einfluss wird hierdurch deutlicher. Grundsätzlich erfolgt die Beschreibung der Position des Objektes durch den Horizontalwinkel durchgängig sehr genau, die Messwerte folgen dem Verlauf der Referenzdaten. Berücksichtigt man die angesprochenen Latenzzeiten des Kamerasensors und des ADMA-Systems, so können die Abweichungen zwischen den beiden Messsystemen noch weiter reduziert werden. Je dichter die Fahrzeuge zueinander positioniert sind und je größer dadurch der Horizontalwinkel wird, desto größer wird allerdings der Fehler des Kamerasensors. Dies liegt daran, dass im Bildverarbeitungsalgorithmus der Fahrzeugmittelpunkt über die Außenkanten der leuchtenden Flächen bestimmt wird. Je nach Betrachtungswinkel fällt die Lichtstärke des auf den Sensor treffenden Streulichtes unterschiedlich hoch aus. Das wirkt sich auf die Blob-Erzeugung mittels Schwellwertverfahren, siehe Kapitel 4.1, aus, sodass sich die gefundenen Außenkanten jeweils verschieben können. Mit zunehmendem Winkel zwischen Kamera und Lichtquelle vergrößert sich daher der Fehler des über die Symmetrie der beiden Außenkanten bestimmten Fahrzeugmittelpunktes [Wei14]. Zum Zeitpunkt  $t = 11,21$  s befindet sich der äußere Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeuges bereits am Rande des Sichtfeldes der Kamera und wandert im weiteren Verlauf aus diesem heraus, wodurch vom Bildverarbeitungsalgorithmus kein Scheinwerferpaar mehr gebildet werden kann. In diesem Fall wird nur noch der innere Scheinwerfer detektiert, was zu einem Sprung im Werteverlauf führt. Dieser Sprung entspricht einem Begegnungsabstand von circa 8 m.

Der Radarsensor weist ebenfalls eine Latenzzeit auf, die sogenannte „throughput time“. Diese kann Werte zwischen dem Anderthalbfachen und dem Zweieinhalbfachen der Zykluszeit annehmen [Con10]. Demnach beträgt die Abweichung mindestens 99 ms und höchstens 165 ms. Diese Verzögerung ist der Hardwarearchitektur des Sensors geschuldet. Es werden zwei verschiedene CPUs verwendet, eine für die Messdatenerfassung und eine für die Verarbeitung der Daten. Während eines Zyklus werden die Messdaten aufgenommen und anschließend aus dem Speicher der ersten CPU in den Speicher der zweiten übertragen. Erst im nachfolgenden Zyklus wird dann von der zweiten CPU die Auswertung der Daten vorgenommen [Sch14b]. Die dabei detektierten und intern getrackten Objekte werden anschließend über den CAN-Bus gesendet. Der Einfluss der Latenzzeit des Radarsensors auf die über den CAN-Bus empfangenen Daten ist in Abbildung 6.3 am Beispiel des gemessenen Begegnungsabstandes veranschaulicht. Hiermit ist wieder der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugfronten gemeint. Um der Einheitlichkeit willen und um einen Vergleich mit den Kameradaten vornehmen zu können, werden alle Messwerte des Radarsensors nachfolgend im Kamera-KOS angegeben.

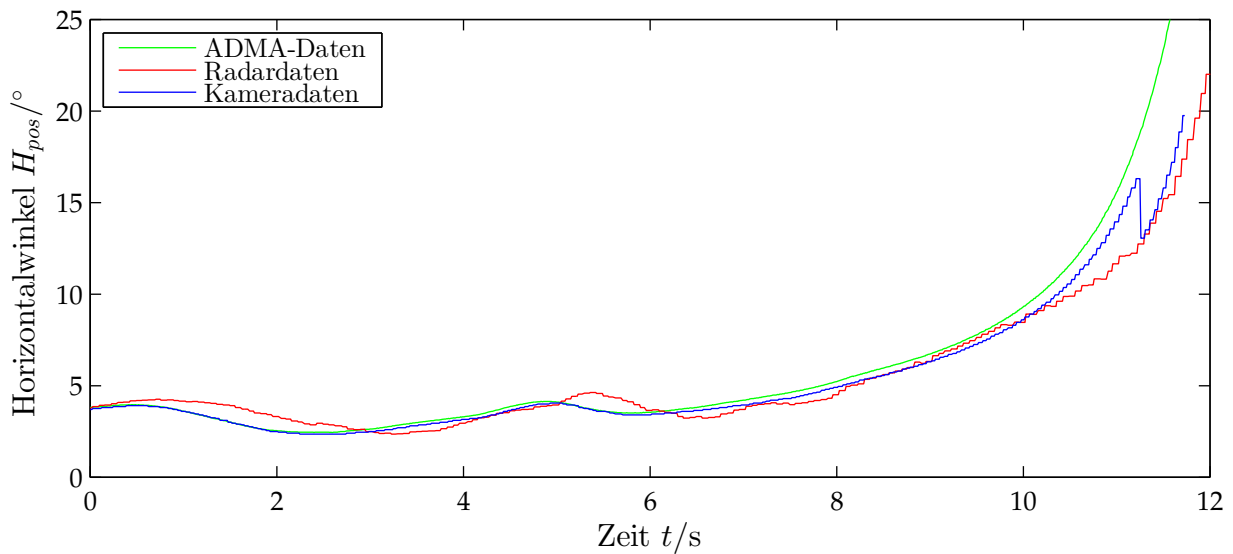


**Abbildung 6.3:** Einfluss der Latenzzeit auf die Genauigkeit der Distanzmessung des verwendeten Radarsensors

Auch in diesem Falle ist der zeitliche Versatz deutlich zu erkennen. Dieser ist in etwa um den Faktor zwei größer als der des Kamerasensors. Dennoch liegt für die Entfernungsdaten eine hohe Übereinstimmung mit den Referenzwerten vor. Durch eine nachträgliche Verschiebung um die Latenzzeit kann diese noch weiter verbessert werden. Erst für dichtere Begegnungsabstände driften Mess- und Referenzwert stärker auseinander. Dies liegt daran, dass nicht eindeutig bestimmt werden kann, von welchen Stellen des Objektes Reflexionen empfangen werden. Gerade zu kürzeren Abständen hin nimmt die Seitenfläche eines Fahrzeuges einen immer größeren Bereich im Sichtfeld ein, an der ebenfalls Reflexionen auftreten können. In Abhängigkeit des Ansichtswinkels des Radars kommt es zu einer Reflexwanderung. Dieses Verhalten hat Jordan [Jor06] im Rahmen seiner Dissertation systematisch untersucht. Eine genaue Bestimmung des Fahrzeugmittelpunktes ist daher bei dem verwendeten Sensor nicht mehr gewährleistet. Wandert der Messpunkt nun an der Seitenfläche des Fahrzeuges entlang, vergrößert sich dementsprechend auch der gemessene Abstand, was zu dem Auseinanderdriften von Referenz- und Messwert führt.

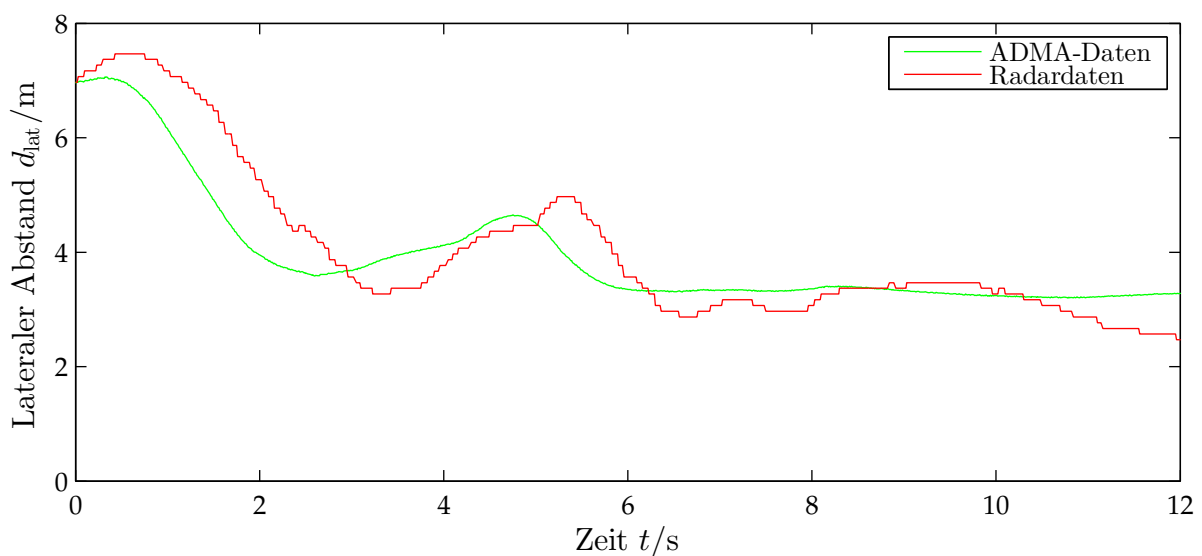
Ein Vergleich der Genauigkeiten beider Sensoren kann einzig anhand des Horizontalwinkels erfolgen. Ein solcher Vergleich ist in Abbildung 6.4 am Beispiel der bereits in Abbildung 6.2 verwendeten Begegnungssituation dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kameradaten eine höhere Präzision aufweisen. Dies liegt vor allem an der geringen Genauigkeit der Winkelmessung des Radarsensors. Für den Nahbereich, der ab einer Entfernung  $d \leq 60$  m beginnt, verzehnfacht sich der Fehler bei der Winkelbestimmung im Vergleich zum Fernbereich auf  $\pm 1^\circ$ . Zusätzlich tritt die bereits angesprochene Reflexwanderung auf, die sowohl von dem Begegnungsabstand als auch von der relativen Orientierung des entgegenkommenden Fahrzeuges abhängig ist. Dadurch kann es zu erheblichen Abweichungen kommen, die nicht durch die Berücksichtigung der La-

tenzzeit kompensiert werden können.



**Abbildung 6.4:** Vergleich der Genauigkeit des Kamera- und des Radarsensors am Beispiel des ermittelten Horizontalwinkels für ein Objekt

Diese Problematik lässt sich ebenfalls gut an der relativen lateralen Entfernung veranschaulichen, die in Abbildung 6.5 dargestellt ist. Der Radarsensor stellt über den CAN-Bus die Information über den lateralen und den longitudinalen Abstand zur Verfügung. Der gemessene resultierende Abstand wird mittels des gemessenen Winkels in eine longitudinale und eine laterale Abstandskomponente zerlegt, sodass sich die Winkelungenauigkeit in diesen direkt widerspiegelt.



**Abbildung 6.5:** Vom Radarsensor bereitgestellte Information über den lateralen Abstand zu einem entgegenkommenden Fahrzeug

### 6.1.1.2 Genauigkeit des Fusionsalgorithmus

Wie bereits in Kapitel 4.1 erläutert, ist der Radarsensor allein nicht ausreichend, um die benötigten Informationen über andere Verkehrsteilnehmer zur Realisierung der ange-dachten Schlechtwetterlichtfunktion vollständig zu bestimmen. Daher wird dieser mit einem zusätzlichen Kamerasensor fusioniert. Bei der Betrachtung beider Einzelsensoren wird deutlich, dass die laterale Auflösung des Kamerasensors wie erwartet zu einer ge-naueren Bestimmung des Fahrzeugmittelpunktes führt. Aus diesem Grund wird der vom Radarsensor detektierte Mittelpunkt, wie in Abschnitt 4.1.2.1 beschrieben, korrigiert.

Weiterhin kann die Genauigkeit der Objektbeschreibung gesteigert werden, wenn die zeitliche Verzögerung der Messdaten korrigiert wird. Ein mögliches Vorgehen lautet wie folgt: Da die Radardaten älter sind als die des Kamerasensors, werden diese zunächst auf den Zeitpunkt der Kameradaten prädiziert. Der Radarsensor misst neben den Ab-standsinformationen auch die relative Geschwindigkeit eines Objektes. Mit dieser Re-lativgeschwindigkeit kann beispielsweise unter Verwendung des CV-Modells (Constant Velocity Modell) die Position des Objektes geschätzt werden, die es zum Zeitpunkt der Erfassung durch den Kamerasensor innehatte. Durch die Annahme, dass die gemessene Geschwindigkeit konstant ist, kann der neue relative Abstand  $\vec{d}_{k+1}$  über den Zusammen-hang

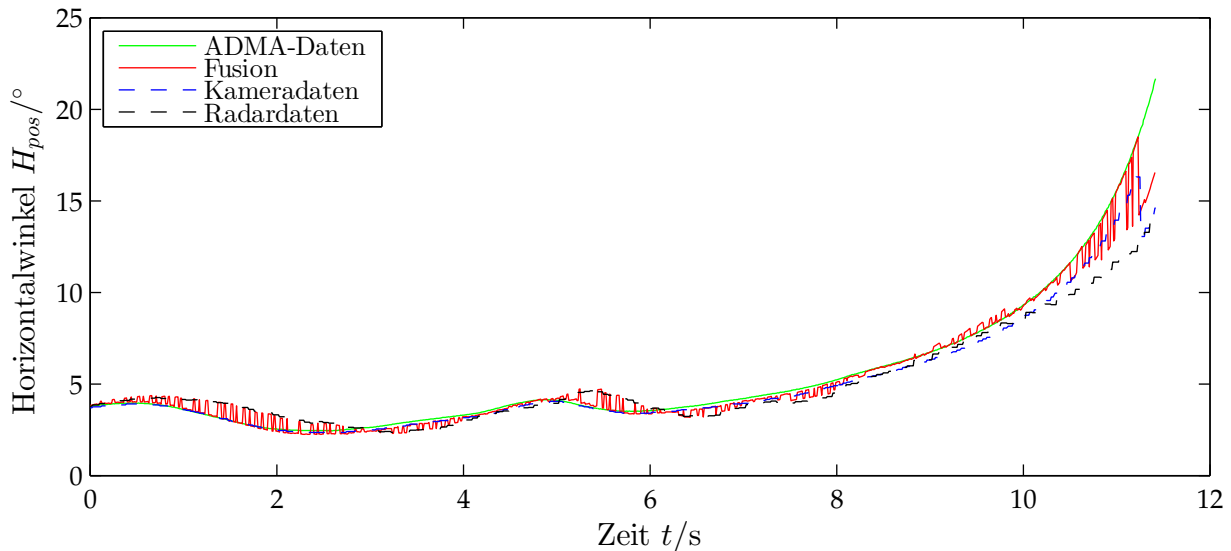
$$\vec{d}_{k+1} = \vec{d}_k + \Delta t \cdot \vec{v}_{\text{rel}} \quad (6.1)$$

berechnet werden. Hierbei sind  $\vec{d}_k$  der gemessene relative Abstand,  $\vec{v}_{\text{rel}}$  die gemessene relative Geschwindigkeit und  $\Delta t$  die vergangene Zeit zwischen der Messung des Radar- und der des Kamerasensors.

Nach der Fusion der Daten beider Sensoren erfolgt ein zweiter Prädiktionsschritt, um den Einfluss der Latenzzeiten zu reduzieren. Da die throughput time des Radarsensors zwischen 99 ms und 165 ms variieren kann, erfolgt die zweistufige Prädiktion insgesamt um die mittlere Latenzzeit von 132 ms, zuzüglich der vergangenen Zeit seit dem Empfang der letzten Daten.

Bei der Auswertung der in den Voruntersuchungen gewonnenen Daten hat sich aller-dings gezeigt, dass mit einem anderen Verfahren eine Erhöhung der Genauigkeit erzielt werden kann. Anschaulich wird dies bereits in Abbildung 6.2. Mit fortgeschrittener Zeit respektive kürzer werdendem Abstand nimmt auch die Ungenauigkeit des Kamerasen-sors zu, was direkten Einfluss auf die Korrektur der Radardaten hat. Daher werden die Radardaten nicht erst auf den Zeitpunkt der Kameradaten prädiziert, sondern lediglich der Zeitpunkt des letzten Dateneingangs berücksichtigt. Die Daten werden danach fu-sioniert und anschließend erfolgt die Prädiktion um die bereits bekannten 132 ms. Dies-es Verfahren nutzt die Tatsache aus, dass bei größeren Begegnungsabständen die Ände-rungsgeschwindigkeit des Horizontalwinkels sehr gering ist und die Asynchronität der Daten daher kaum einen Einfluss auf das Ergebnis der Datenfusion hat. Bei den höhe-ren Änderungsgeschwindigkeiten zu dichteren Entfernungen hin nimmt dieser Einfluss deutlich zu, was in diesem Fall zu einer Kompensation der Ungenauigkeit des Kamera-

sensors und insgesamt zu besseren Ergebnissen führt. Dies ist am Beispiel des Horizontalwinkels zum Fahrzeugmittelpunkt in Abbildung 6.6 gezeigt. Alle Angaben beziehen sich wieder auf das Kamera-KOS.

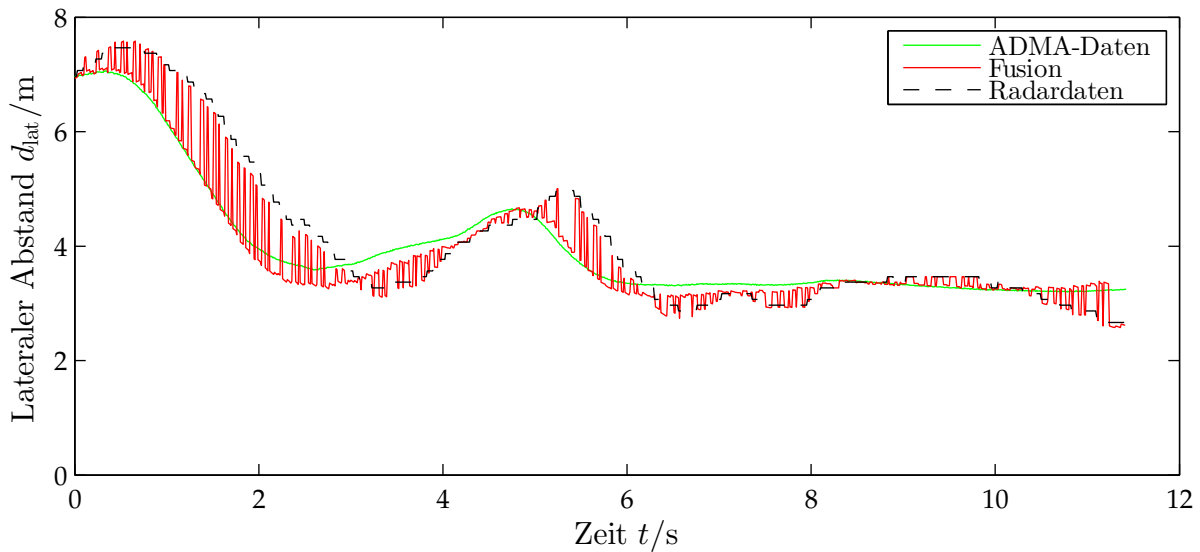


**Abbildung 6.6:** Ergebnis der Fusion von Kamera- und Radardaten am Beispiel des Horizontalwinkels zum Objektmittelpunkt

Auffällig ist hier das sprunghafte Verhalten der Daten. Dies liegt an der Realisierung des Fusionsalgorithmus. Da die Fusion auf Objektebene erfolgt, werden die Daten bereits intern von der jeweiligen Sensorik getrackt. Um Filterketten zu vermeiden, wird lediglich eine Prädiktion der Objektdaten unter Verwendung des CV-Modells vorgenommen. Sobald neue Messdaten eines Sensors vorliegen, werden diese als „wahre“ Werte angenommen. Das hat im Falle neuer Radardaten zur Folge, dass die Korrektur durch die Kameradaten wieder aufgehoben wird. Daher rührt das deutlich erkennbare Sprungverhalten. Der dem Objekt zugeordnete Wert „pendelt“ näherungsweise zwischen den Messwerten des Radar- und des Kamerasensors. Einzig die vorgenommene Prädiktion führt hier zu Anpassungen, sodass die Werte nicht exakt zwischen den Kurvenverläufen der beiden Sensor hin und her springen. Für die Ausschläge zu den meist ungenaueren Radardaten haben aufgrund der unterschiedlichen Zykluszeiten für eine maximale Dauer von 40 ms Bestand.

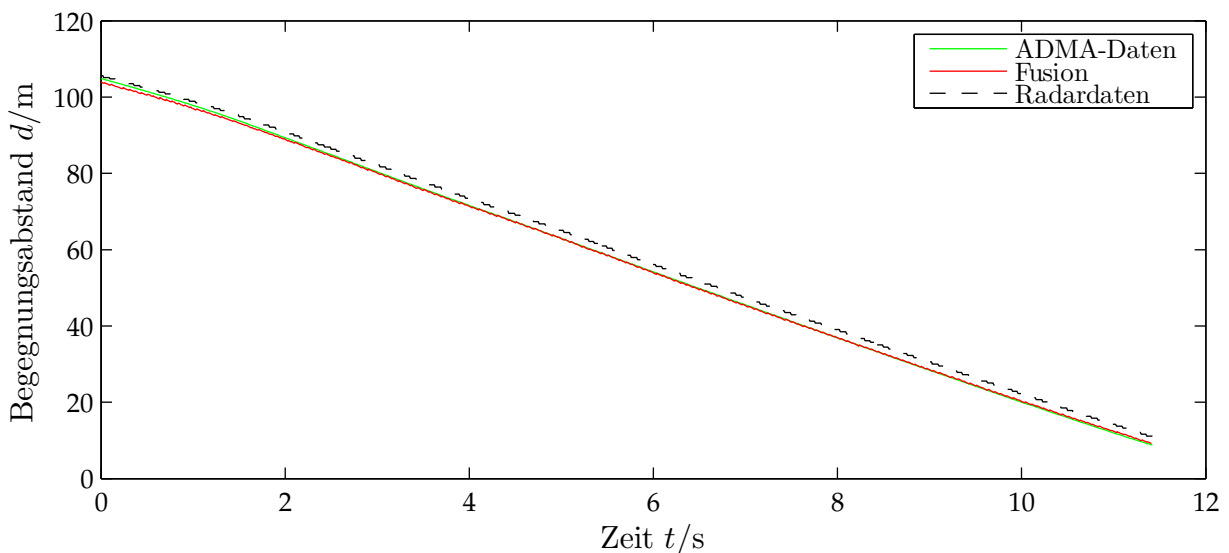
Der Korrektoreinfluss der Kameradaten ist vor allem bei der Betrachtung des relativen lateralen Abstandes zum anderen Fahrzeug deutlich zu erkennen, siehe Abbildung 6.7. Es zeigt sich allerdings auch, dass durch die vorgenommene Prädiktion vereinzelt schlechtere Ergebnisse erzielt werden, wenn neue Messdaten des Radarsensors in den Fusionsprozess einfließen. Dies liegt an Messungenauigkeiten und der bereits angesprochenen Reflexwanderung, sodass die Bestimmung der Bewegungsrichtung und damit verbunden auch die Zerlegung der gemessenen relativen Radialgeschwindigkeit in eine longitudinale und laterale Komponente fehlerbehaftet sind. Da die Prädiktion auf diesen beiden Relativgeschwindigkeitskomponenten basiert, können durch diese Positionsschätzung zu-

sätzliche Abweichungen erzeugt werden.



**Abbildung 6.7:** Ergebnis der Fusion von Kamera- und Radardaten am Beispiel des lateralen Abstandes zum Objektmittelpunkt

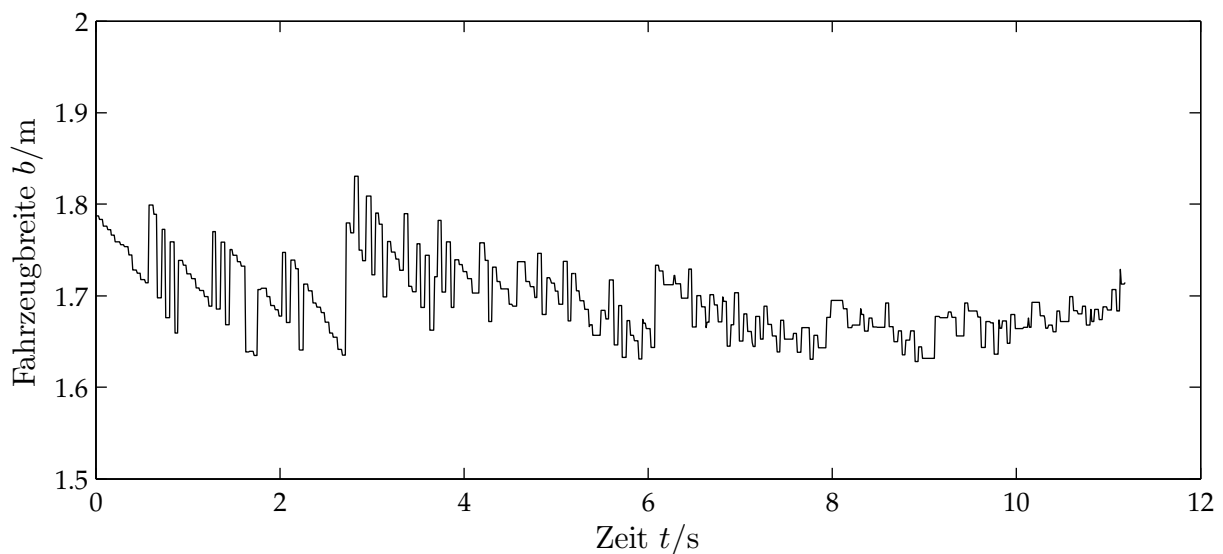
Der positive Einfluss der Prädiktion lässt sich besonders gut an dem ermittelten Begegnungsabstand illustrieren. Hier hat die Korrektur des Mittelpunktes im Gegensatz zur Kompensation der Latenzzeit nur einen vergleichbar geringen Einfluss. In Abbildung 6.8 ist dieser Zusammenhang dargestellt.



**Abbildung 6.8:** Einfluss der Fusion von Kamera- und Radardaten am Beispiel des Abstandes zum Objektmittelpunkt

Neben dem korrigierenden Nutzen der Kameradaten bezüglich des Horizontalwinkels liefern diese auch Informationen über die Ausdehnung eines Objektes in Form eines Öffnungswinkels. Durch die Kombination mit den Abstandsinformationen des Radarsensors lässt sich diese in eine Breite des Fahrzeuges überführen, siehe Abschnitt 4.1. Der

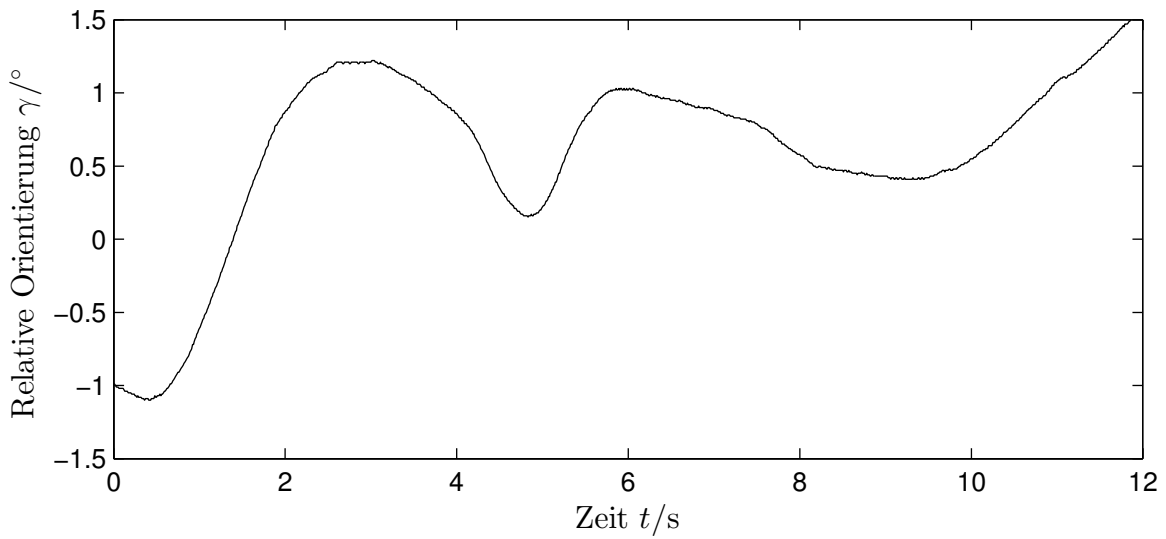
am Fahrzeug mit Gliedermaßstab gemessene Abstand zwischen den beiden Scheinwerfern des entgegenkommenden Versuchsfahrzeuges, genauer die Mittelpunkte deren Abblendlichtmodule, beträgt etwa 1,53 m. Die Breite des Fahrzeuges wird vom Hersteller mit 1,85 m angegeben [DAG14]. Der Bildverarbeitungsalgorithmus bestimmt die Dimension anhand der äußeren Kanten der Lichtquellen im Bild. Sind diese im Bild jeweils über die gesamte Abschlusscheibe ausgedehnt, würde in diesem Falle in etwa die tatsächliche Breite des Fahrzeuges bestimmt werden. Deswegen sollte die berechnete Breite zwischen diesen beiden Werten liegen. In Abbildung 6.9 sind die Ergebnisse der Fahrzeugbreitenbestimmung für die in diesem Abschnitt durchgängig behandelte Begegnungssituation dargestellt.



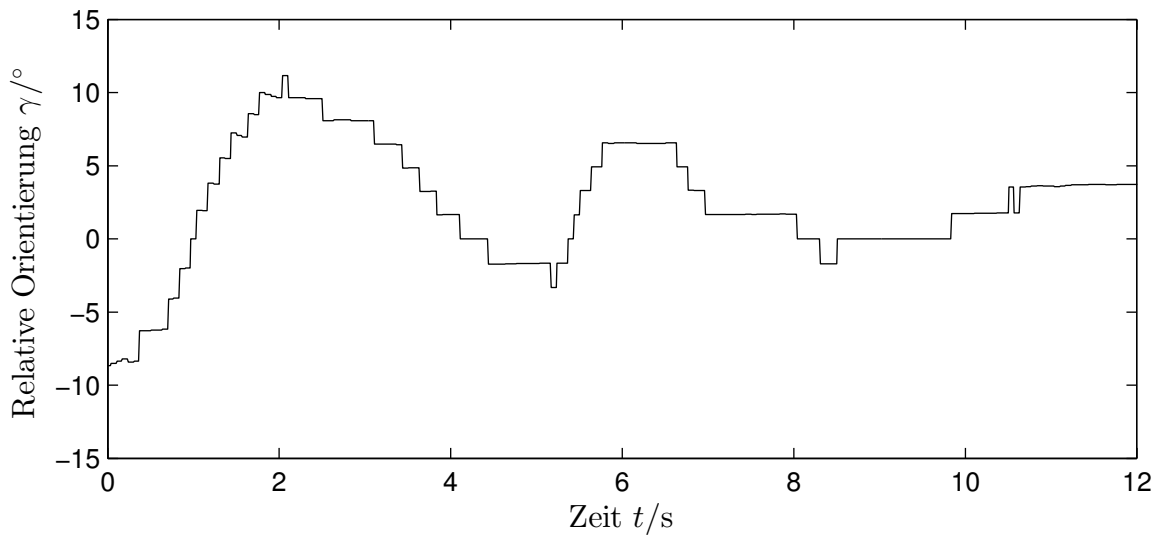
**Abbildung 6.9:** Im Fusionsprozess ermittelte Breite für ein entgegenkommendes Fahrzeug

Es zeigt sich, dass die ermittelte Breite in dem vorher postulierten Bereich liegt und daher für weitere Berechnungen herangezogen werden kann. Diese könnte unter anderem zusätzlich genutzt werden, um eine Klassifizierung der Fahrzeugart anhand dessen lateraler Ausdehnung vorzunehmen.

Im Rahmen der Versuche hat sich gezeigt, dass die Bestimmung der relativen Orientierung eines anderen Fahrzeuges über dessen absolute Geschwindigkeit für Begegnungssituationen auf einer Geraden nicht zielführend ist. Dieses Problem ist in Abbildung 6.10 veranschaulicht.



(a) Referenzverlauf



(b) Ermittelter Verlauf

**Abbildung 6.10:** Vergleich zwischen der ermittelten und der vom Referenzsystem zur Verfügung gestellten Orientierung eines entgegenkommenden Fahrzeuges

Grundsätzlich ähneln sich die beiden Verläufe, allerdings stimmt die Größenordnung nicht überein. Dies liegt an der beinahe idealen Geradeausfahrt beider Fahrzeuge. Bei so geringen Abweichungen in der Orientierung ist die laterale Relativgeschwindigkeit, die es vom Radarsensor zu bestimmen gilt, verschwindend gering. Der Radarsensor kann nur eine Messung der relativen Radialgeschwindigkeit vornehmen, Informationen über die resultierende Geschwindigkeit und über die relative Bewegungsrichtung des Objektes können nicht direkt erschlossen werden. Eine Bestimmung der resultierenden Geschwindigkeit und die Umrechnung in die longitudinale und laterale Komponente des kartesischen Sensor-KOS kann nur durch eine interne Objektverfolgung realisiert werden, sodass sich hier die Fehler der Abstands- und Winkelbestimmung fortpflanzen



[Sch14a]. Eine fehlerhafte Schätzung der Orientierung in dieser Größenordnung hat einen erheblichen Einfluss auf die Korrektur der Relativposition durch die Kameradaten, da diese direkt in die Berechnung einfließt, siehe Gleichung (4.3) und (4.4). Deswegen muss vor der Bestimmung der Orientierung überprüft werden, ob die Geschwindigkeitsdaten geeignet sind. Möglich wäre dies beispielsweise bei der Betrachtung der lateralen Geschwindigkeitskomponente. Ist diese nahezu null, sollte auf die Berechnung verzichtet und die Orientierung zu  $\gamma = 0$  gewählt werden. Eine Kopplung an den Abstand könnte ebenfalls sinnvoll sein, da sich in Abhängigkeit von Nah- und Fernbereich unterschiedliche Genauigkeiten für den Sensor ergeben. Da in den weiteren Untersuchungen einzig Begegnungssituationen auf einer Geraden betrachtet werden, ist, wie in den gezeigten Beispieldaten, nur von sehr geringen Werten für die relative Orientierungen auszugehen. Daher wird für diese auf eine Berechnung der Orientierung verzichtet und  $\gamma = 0$  gesetzt. Der dadurch auftretende Fehler ist geringer, als derjenige, der durch die fehlerhafte Bestimmung der Orientierung begangen wird.

Zum einen wird der Kamerasensor genutzt, um eine Bestimmung der Breite eines Objektes vorzunehmen. Zum anderen werden die genaueren Winkelinformationen herangezogen, um eine Korrektur der Messdaten des Radarsensors vorzunehmen. Zusätzlich werden die korrigierten Daten, basierend auf den gemessenen Geschwindigkeitsinformationen, prädiziert. Um den Vorteil dieses Verfahrens im Vergleich zu der Genauigkeit des einzelnen Radarsensors aufzuzeigen, werden drei Ähnlichkeitsmaße eingeführt. Die Ähnlichkeit der einzelnen Signale bezieht sich hierbei auf die Referenzsignale des ADMA-Systems. Als Ähnlichkeitsmaße werden der Korrelationskoeffizient (*corr*), die Summe der absoluten Differenzen (*sad*, engl. sum of absolut differences) und die Summe der quadrierten Differenzen (*ssd*, engl. sum of squared differences) angewendet. In Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse für das in diesem Kapitel behandelte Beispiel zusammengefasst. Neben den unveränderten Rohdaten des Radarsensors sind diese zusätzlich prädiziert worden (Radar\*), da die Prädiktion bei der Fusion einzig auf den durch den Radarsensor gemessenen Geschwindigkeiten basiert und daher auch auf dessen Daten allein angewendet werden kann. Außerdem werden die Ähnlichkeitsmaße für die Kameradaten angegeben, sofern dies möglich ist. Bei der Berechnung der *sad* und *ssd* wurden die Resultate auf die Anzahl der Datenpunkte  $n$ , in diesem Fall gilt  $n = 1142$ , normiert.

Sensor	$d_{\text{long}}$			$d_{\text{lat}}$			$d$			$H_{\text{pos}}$			
	corr	sad	ssd	corr	sad	ssd	corr	sad	ssd	corr	sad	ssd	
Radar	1	1,82	3,51	0,92	0,45	0,37	1	1,82	3,47	0,0,97	0,77	1,84	
Radar*	1	0,45	0,21	0,93	0,45	0,34	1	0,34	0,18	0,98	0,58	0,9	
Fusion	1	0,31	0,16	0,96	0,23	0,12	1	0,3	0,15	0,98	0,3	0,51	
Kamera	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,99	0,4	0,84

**Tabelle 6.1:** Kennzahlen zur Beschreibung der Ähnlichkeit der Messsignale in Bezug auf das ADMA-Referenzsystem

Aus diesen Kennzahlen geht hervor, dass allein durch die Prädiktion der große Einfluss der Latenzzeit des Radarsensors bereits erheblich abgeschwächt werden kann. Zusätzlich können so Werte für Zeitpunkte zwischen den jeweiligen Empfangszeiten geschätzt werden, sodass der treppenförmige Verlauf eliminiert werden kann und sich die Signalverläufe noch weiter annähern. Die Kennzahlen belegen weiterhin, dass die Fusion von Kamera- und Radardaten der reinen Prädiktion der Radardaten vorzuziehen ist, da sie durchgängig die besseren Werte erzielt. Die Kompensation der Ungenauigkeit der Kameradaten durch den gewählten Ansatz ist zudem bei dem Vergleich der Fehlermaße  $ssd$  und  $ssd$  belegt. Wie in Abbildung 6.6 zu erkennen ist, können durch die Fusion die größeren Abweichungen des Kamerasensors korrigiert werden.

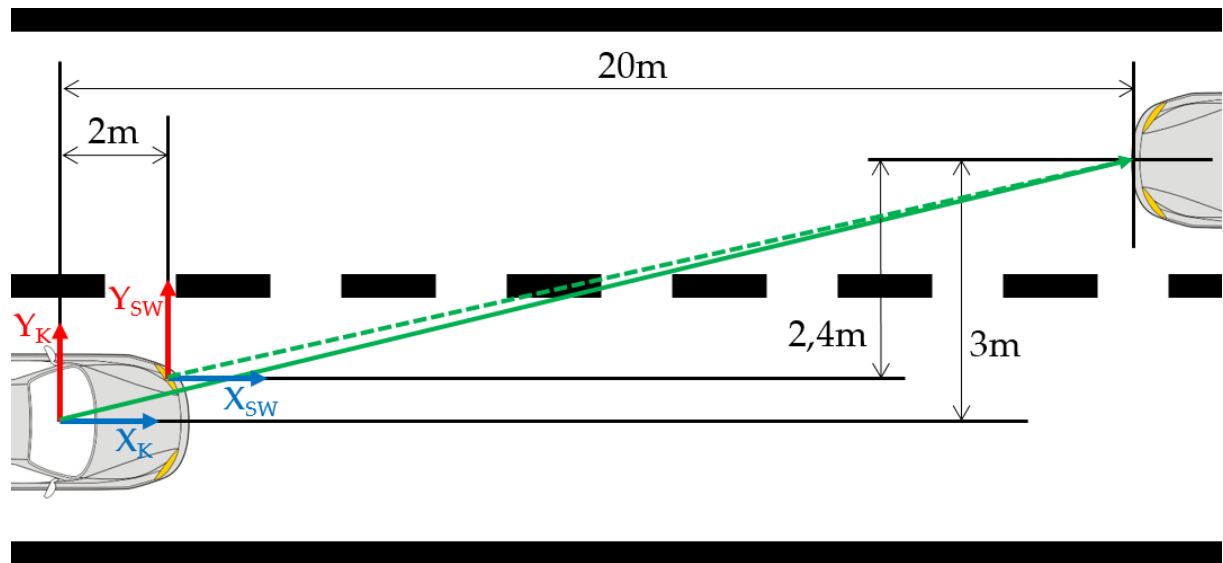
Die vorhandenen Daten weisen für die Umsetzung des Schlechtwetterlichtes mit dem entwickelten Prototyp eine ausreichend hohe Genauigkeit auf, sodass dessen Funktion demonstriert und evaluiert werden kann. Aufgrund der gewählten Methode zur Entblendung entgegenkommender Fahrzeuge werden nur noch der entsprechende Horizontalwinkel und die Ausdehnungen des Fahrzeuges benötigt. Mit dem Scheinwerfersystem kann ein horizontaler Winkelbereich von  $3^\circ$  abgeschattet werden, sodass der ermittelte Horizontalwinkel höchstens um  $\pm 1,5^\circ$  vom tatsächlichen Fahrzeugmittelpunkt abweichen darf. Die maximale Abweichung des im Fusionsprozess bestimmten Winkels liegt für Begegnungsabstände  $d > 10$  m bei knapp  $1^\circ$ , sodass hier noch genügend Sicherheit vorliegt, um einen Fahrer vollständig zu entblenden. Die reinen Kameradaten liefern bereits sehr präzise Winkelinformationen, sodass bei der Umsetzung der Schlechtwetterlichtfunktion die Vermutung nahe liegen könnte, auf eine Fusion zu verzichten und nur den Kamerasensor zu verwenden. Allerdings gilt dies nur für die Winkelangaben im Kamera-KOS. Ohne eine entsprechende Abstandsinformation können diese Winkelangaben nicht in die jeweiligen Scheinwerfer-KOS transformiert werden. Die dadurch entstehenden Unsicherheiten können durch die Blende nicht kompensiert werden und eine durchgängige Entblendung wäre nicht mehr gewährleistet. Zur Veranschaulichung dieser Problematik ist in Abbildung 6.11 eine beispielhafte Begegnungssituation für eine Entfernung von knapp 20 m dargestellt. Der Übersicht halber wurde hier nur das Koordinatensystem des linken Scheinwerfers eingezeichnet.

Die Horizontalwinkel  ${}^K H_{\text{pos}}$  im Kamera-,  ${}^{SW} H_{\text{pos,l}}$  im linken Scheinwerfer- und  ${}^{SW} H_{\text{pos,r}}$  im rechten Scheinwerfer-KOS betragen demnach

$${}^K H_{\text{pos}} = \arctan\left(\frac{3}{20}\right) = 8,5^\circ \quad (6.2)$$

$${}^{SW} H_{\text{pos,l}} = \arctan\left(\frac{2,4}{18}\right) = 7,6^\circ \quad (6.3)$$

$${}^{SW} H_{\text{pos,r}} = \arctan\left(\frac{3,6}{18}\right) = 11,3^\circ \quad (6.4)$$



**Abbildung 6.11:** Schematische Darstellung der geometrischen Zusammenhänge bei der Transformation von Winkelinformationen in das Scheinwerfer-KOS

Für den linken Scheinwerfer ist die Abweichung von knapp  $1^\circ$  im Vergleich zum rechten Scheinwerfer noch im Toleranzbereich. Die Abweichung für den rechten Scheinwerfer liegt mit  $\Delta H_{\text{pos}} = 2,8^\circ$  bereits in einem Bereich, der durch die Größe der Blende nicht mehr abgedeckt werden kann. Zur Positionierung der Blende wird neben dem Horizontalwinkel auch die Ausdehnung des Fahrzeuges benötigt. Für die Annahme, dass das Fahrzeug eine Breite von  $b = 1,8\text{ m}$  aufweist, ergeben sich für die jeweiligen Ausdehnungen

$${}^K H_{\text{dim}} = \arctan\left(\frac{3,9}{20}\right) - \arctan\left(\frac{2,1}{20}\right) = 5^\circ \quad (6.5)$$

$${}^{\text{SW}} H_{\text{dim,l}} = \arctan\left(\frac{3,3}{18}\right) - \arctan\left(\frac{1,5}{18}\right) = 5,6^\circ \quad (6.6)$$

$${}^{\text{SW}} H_{\text{dim,r}} = \arctan\left(\frac{4,5}{18}\right) - \arctan\left(\frac{2,7}{20}\right) = 5,5^\circ \quad (6.7)$$

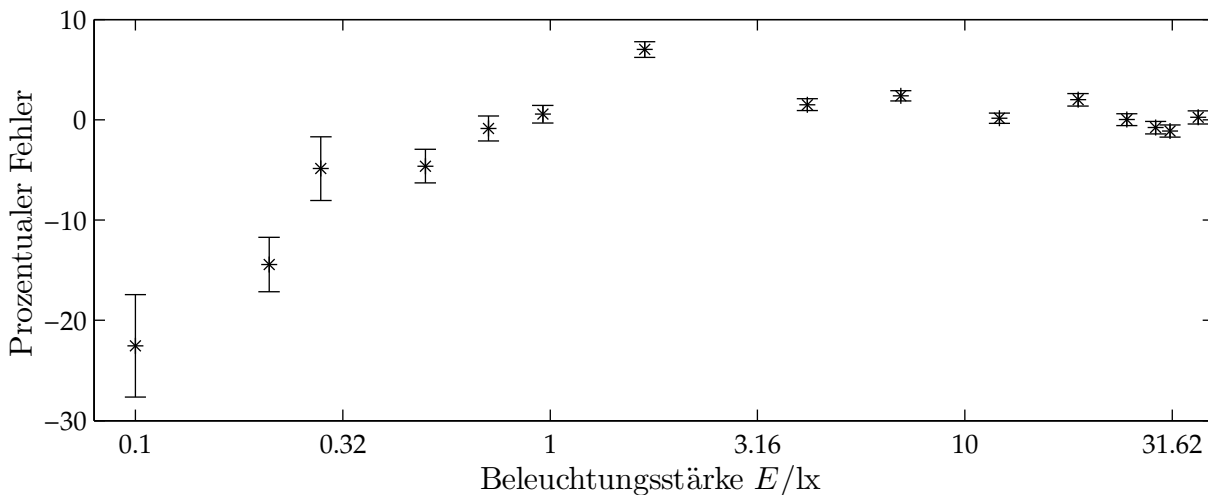
Auch diese Fehler wirken sich dementsprechend bei der Ausrichtung der Blende auf die Fahrersitzposition aus. Folglich ist für die realisierte Umsetzung der Schlechtwetterlichtfunktionalität durch das Verschwenken eines abgeschatteten Bereiches in der Lichtverteilung die Fusion von Kamera- und Radarsensorik unabdingbar.

## 6.1.2 Detektion der Straßenverhältnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zur Detektion der Straßenverhältnisse mit dem in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Sensorsystem vorgestellt. Diese wurden bereits teilweise in [FK14] veröffentlicht. Auf einen alternativ betrachteten Ansatz auf Basis eines aktiven NIR-Systems zur Realisierung eines vorausschauenden Straßenzustandssensors wird an dieser Stelle nur kurz eingegangen. Dieses System besteht aus zwei NIR-Mo-

dulen und einer NIR-Kamera, sodass die Umgebung gleichzeitig ausgeleuchtet und aufgenommen werden kann. Mittels digitaler Bildverarbeitung wird das Videomaterial auf charakteristische Merkmale der jeweiligen Witterungsbedingungen hin überprüft. Zusätzlich erfolgt ein Abgleich mit einer selbstlernenden Datenbank. In statischen Labor- und Feldversuchen konnte eine sehr gute Klassifizierung des Witterungszustandes nachgewiesen werden, jedoch lassen sich die entwickelten Verfahren zur Bestimmung witterungscharakteristischer Merkmale nicht direkt auf dynamische Fälle übertragen. Dies liegt vor allem an dem zur Verfügung stehenden Equipment. Insbesondere das zeilenweise Auslesen des CMOS-Sensors führt zum sogenannten Rolling-Shutter-Effekt, sodass ein aufgenommenes Bild aufgrund der Eigenbewegung verschmiert. Daher wurde auf die Weiterverfolgung dieses Ansatzes verzichtet. Der interessierte Leser sei auf Beyer [Bey13a] verwiesen.

Die Sensoren zur Messung der jeweils durch die Vorwärts- beziehungsweise Rückwärtsreflexion erzeugten Beleuchtungsstärken wurden kalibriert. Zu diesem Zweck ist ein Versuchsaufbau im Labor realisiert worden, der eine Veränderung der vom Lichtmodul am Messpunkt erzeugten Beleuchtungsstärke zulässt. Die Referenzmessung wurde mit einem Beleuchtungsstärkemessgerät der Klasse B vorgenommen. Das Ergebnis der Kalibrierung ist in Abbildung 6.12 gezeigt. Der Übersicht halber ist die Abszisse logarithmisch skaliert. Dargestellt ist das Intervall  $[\bar{e} \pm \sigma]$ , das sich aus dem mittleren Fehler  $\bar{e}$  und aus der einfachen Standardabweichung  $\sigma$  ergibt.



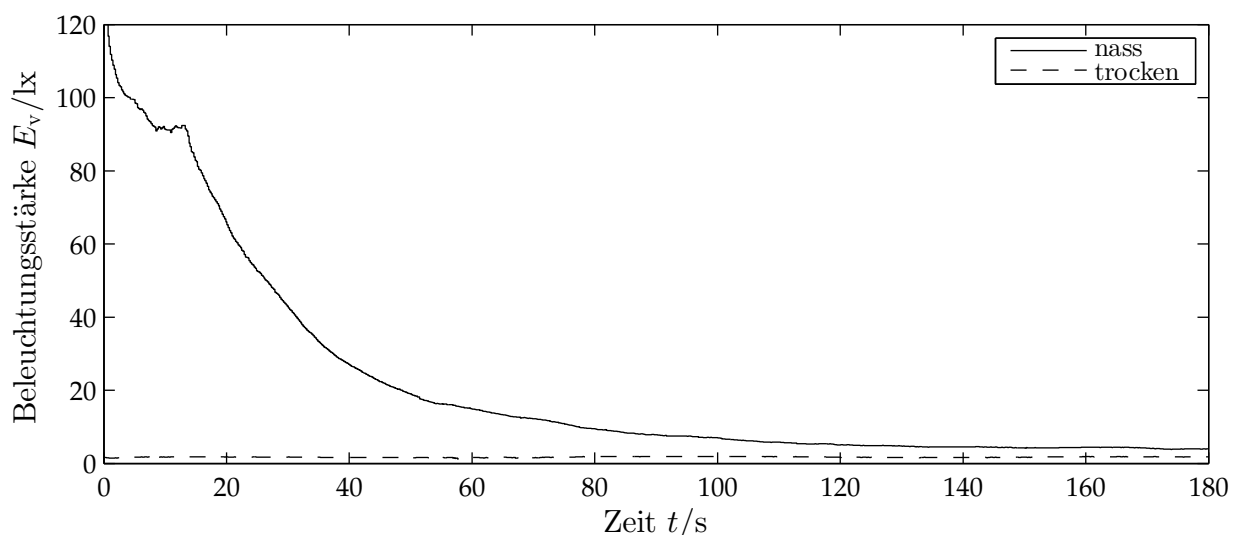
**Abbildung 6.12:** Prozentualer Fehler des Rückwärtsreflexionssensors im Vergleich zum Referenzsystem

Der Sensor weist über fast den gesamten Messbereich eine hohe Linearität auf. Einzig für Beleuchtungsstärken kleiner 0,3 lx nimmt die Abweichung stärker zu. Hauptursache ist der verwendete ADU, der für die Digitalisierung lediglich 10 Bit zur Verfügung stellt. Für einen Messbereich zwischen 0 lx und 40 lx entspricht dies einer theoretischen Auflösung von ungefähr 0,04 lx. Bei der Analog-Digital-Umsetzung handelt es sich allerdings um einen fehlerbehafteten Prozess, der zu Quantisierungsabweichungen führt. Diese Fehler wirken sich bei kleinen Beleuchtungsstärken entsprechend stärker aus. Gleiches Ver-

halten zeigt sich beim Vorwärtsreflexionssensor, dessen Kalibrierung in Abbildung D.3 zu finden ist. Trotzdem ist das Ergebnis für kleine Beleuchtungsstärken immer noch akzeptabel. Die größte prozentuale Abweichung im Diagramm liegt mit  $22,5\% \pm 5,1\%$  für den Messwert der Beleuchtungsstärke  $E = 100 \text{ mlx}$  vor. Dies entspricht einer Differenz zwischen  $17,4 \text{ mlx}$  und  $27,6 \text{ mlx}$ . Eine Verbesserung ließe sich beispielsweise durch einen ADU mit höherer Auflösung erzielen. Denkbar wäre auch, dass sich der Messbereich dynamisch an die Messwerte anpasst.

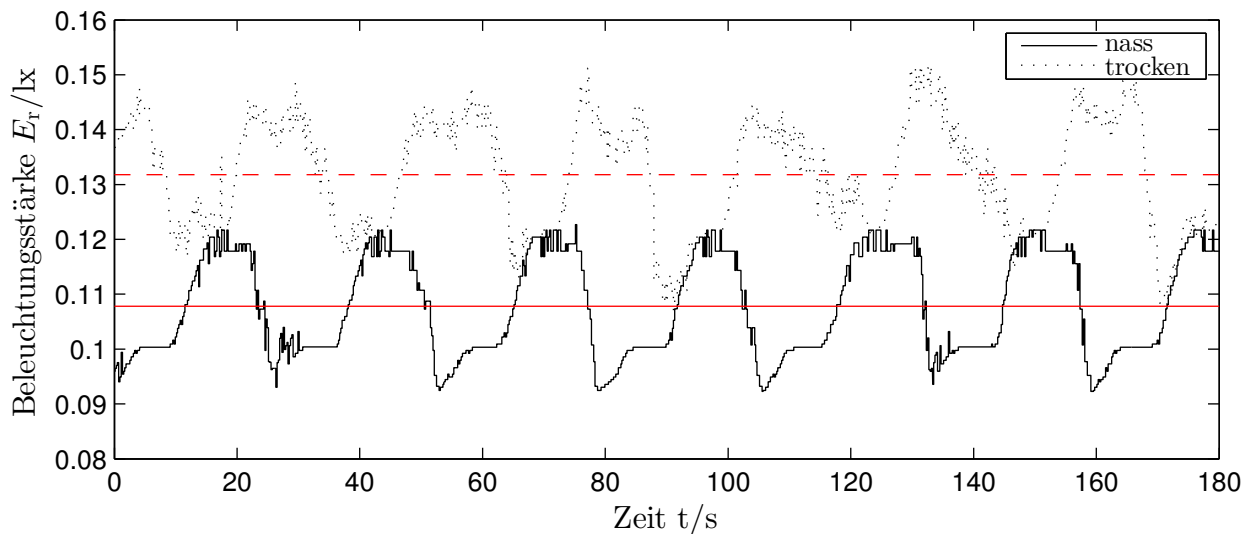
Mit dem kalibrierten System wurden anschließend sowohl statische als auch dynamische Versuche durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Beantwortung der Frage, ob mit diesem Verfahren eine eindeutige Unterscheidung zwischen einer trockenen und feuchten/nassen Fahrbahn möglich ist. Grundsätzlich wäre auch die Betrachtung weiterer Witterungsbedingungen denkbar gewesen, aufgrund der schwierigen Reproduzierbarkeit dieser Bedingungen, zum Beispiel Schnee oder Eis, blieben die Versuche auf den Fall Nässe beschränkt. Dieser Fall ist in Hinblick auf das Ziel dieser Arbeit, der Entwicklung eines Schlechtwetterlichtes für nasse Fahrbahnen, entscheidend.

In Abbildung 6.13 sind die Messwerte des Vorwärtsreflexionssensors für einen Abtrocknungsvorgang auf einem Parkplatz über der Zeit aufgetragen. Zum Vergleich ist ebenfalls die vorangegangene Messung auf der noch trockenen Oberfläche eingezeichnet. Hierbei handelt es sich nicht um einen asphaltierten, sondern um einen gepflasterten Parkplatz, der in Abbildung 5.3 zu sehen ist. Der Abtrocknungsvorgang wurde simuliert, indem mit einer Wasserflasche die vom Lichtmodul beleuchtete Stelle der vorher trockenen Fahrbahn übergossen wurde. Das Material ist aufgrund seiner höheren Porosität sehr saugfähig. Die vielen Fugen erleichtern außerdem das Abfließen. Daher handelt es sich bei dieser gemessenen Abtrocknung um einen zeitlich stark gerafften Vorgang.



**Abbildung 6.13:** Im Stand gemessene Vorwärtsreflexion für eine trockene und eine nasse Fahrbahnoberfläche

Der exponentielle Abfall der Beleuchtungsstärke, wie er bereits bei der zuvor durchgeführten statischen Messungen beobachtet werden konnte (Abbildung 3.5), ist auch in diesem Diagramm wiederzufinden. Der anfangs noch stärkere Abfall und der kurze, annähernd waagerechte Verlauf sind vermutlich auf Fließbewegungen und kurzzeitige Pfützenbildung zurückzuführen. Der Verlauf der Beleuchtungsstärke weist einen enormen Dynamikumfang auf. Nach 180 Sekunden sind die Werte für die bereits nur noch feuchte „Fahrbahn“ immer noch mehr als doppelt so hoch wie die der trockenen „Fahrbahn“ zum gleichen Zeitpunkt. In Abbildung 6.14 sind die dazugehörigen Werte des Rückwärtsreflexionssensors gezeigt.



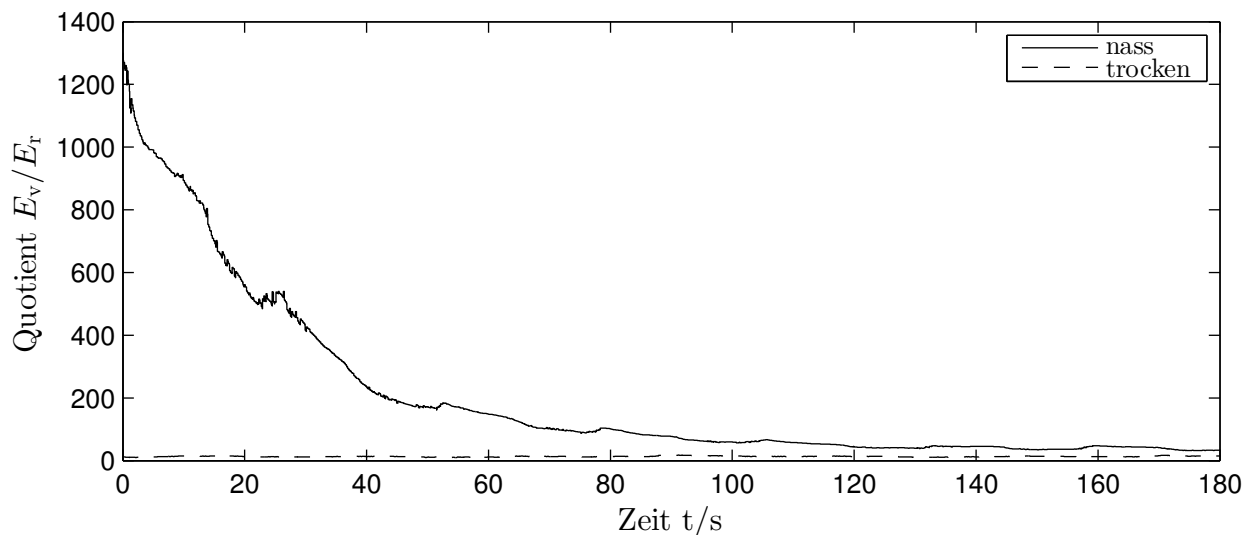
**Abbildung 6.14:** Im Stand gemessene Rückwärtsreflexion für eine trockene und eine nasse Fahrbahnoberfläche. In Rot ist der jeweilige Gleichanteil der Signale eingezeichnet

Zwischen den Messwerten auf trockener und nasser „Fahrbahn“ ist eine relativ konstante Verschiebung erkennbar. Die Annahme, dass die Werte für die Rückwärtsreflexion auf nasser Oberfläche niedriger sind, lässt sich anhand dieser Messung bestätigen. Auffällig ist der schwankende Verlauf der Daten um einen gewissen Gleichanteil. Die Gründe hierfür zeigen sich bereits bei der Kalibrierung, siehe Abbildung 6.12. Der Sensor operiert an der unteren Grenze seines Messbereiches. Die Auflösung ist in diesem Bereich nicht fein genug, was zu einem Verlust an Genauigkeit führt. Aufgrund der höheren Abweichung greifen softwareseitige Kompensationen nicht mehr zuverlässig, sodass es zu den periodischen Schwankungen kommt. Theoretisch sollte sich im Laufe des Abtrocknungsvorganges eine stetige Zunahme der Rückwärtsreflexion für die Messung auf der nassen Oberfläche in den Daten erkennen lassen. Infolge der Oszillation lässt sich dies allerdings nicht eindeutig feststellen. Außerdem sitzen Lichtmodul und Rückwärtsreflexionssensor nicht direkt unter dem Fahrzeug. Dadurch leuchtet das Modul versetzt von hinten unter das Fahrzeug, sodass es durch Streulicht zu Reflexionen am Fahrzeugheck kommen kann. Dies führt zu einem näherungsweise konstanten Offset, der deutlich höher als die Veränderungen durch die Abtrocknung zu sein scheint. Bedingt durch die geringe Auf-

lösung und aller damit verbundenen Einflüsse geht die Zunahme der Werte vermutlich in den Schwankungen unter.

Für den Fall einer trockenen Asphaltoberfläche kehrt sich dieses Verhalten um. Aufgrund der geringen Vorwärtsreflexion operiert der Vorwärtsreflexionssensor an seiner unteren Grenze des Messbereiches, wodurch ungenauere Ergebnisse erzielt werden. Dennoch hat sich in den Versuchen gezeigt, dass eine Unterscheidung verschiedener Asphaltarten durch die Betrachtung der Werte beider Sensoren möglich sein könnte, siehe Abbildung D.8 im Anhang.

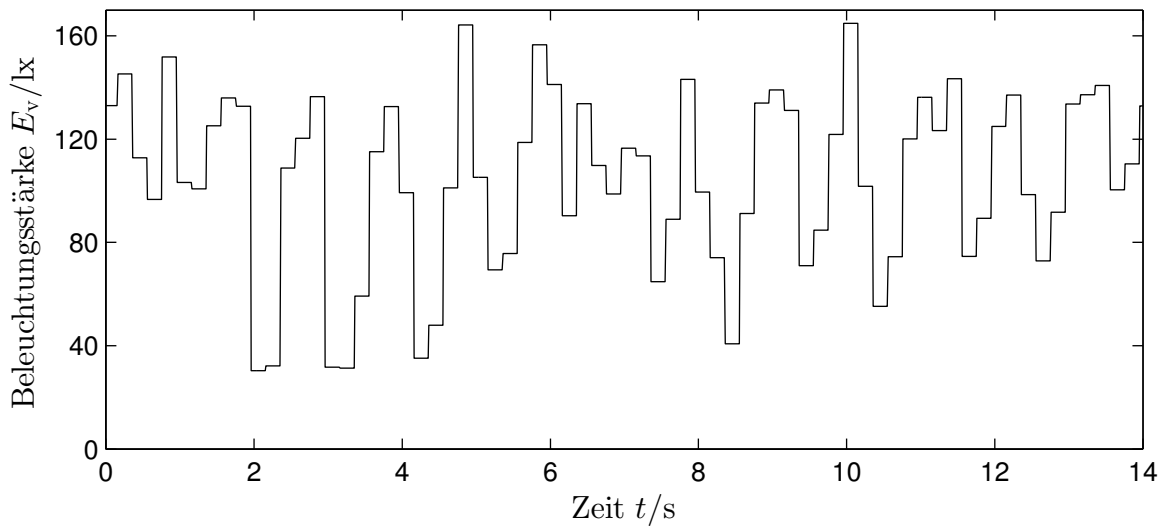
Zur Bestimmung des Witterungszustandes kann neben der Betrachtung der Absolutwerte auch das Verhältnis zwischen Vorwärts- und Rückwärtsreflexion dienen. In Abbildung 6.15 ist dieses Vorgehen verdeutlicht. Am Ende des betrachteten Zeitraumes ist der Quotient  $\frac{E_v}{E_r}$  für den Abtrocknungsvorgang im Vergleich zur trockenen Fahrbahn immer noch mehr als doppelt so hoch.



**Abbildung 6.15:** Verhältnis zwischen Vorwärts- und Rückwärtsreflexion

Zur Abschätzung des Blendrisikos für entgegenkommende Fahrer aufgrund einer erhöhten Vorwärtsreflexion ist es jedoch ausreichend, die Daten des Vorwärtsreflexionssensors auszuwerten. Im Folgenden wird daher nur noch auf dessen Messwerte eingegangen.

Neben dem statischen Fall wurden des Weiteren dynamische Versuche auf der Regengstrecke der Firma *HELLA KGaA Hueck & Co.* durchgeführt. Die Ergebnisse für eine Fahrt über die nasse Fahrbahn sind in Abbildung 6.16 in Form des Beleuchtungsstärkeverlaufes des Vorwärtsreflexionssensors dargestellt. In diesem Beispiel wurde die Strecke mit einer nahezu konstanten Geschwindigkeit von  $v \approx 16$  km/h zurückgelegt.



**Abbildung 6.16:** Messwerte des Vorwärtsreflexionssensors für eine Fahrt über die nasse Regenstrecke

Auch in diesem Verlauf sind deutliche Schwankungen erkennbar, für die aber nicht die begrenzte Auflösung des ADU verantwortlich ist. Vielmehr liegt die Ursache in der ungleichmäßigen Bewässerung und der damit beeinträchtigten Ausbildung des Wasserfilms: An der Regenstrecke sind in regelmäßigen Abständen Beregner angeordnet, mit denen die Strecke bewässert werden kann. Die Dichte der Beregner reicht aber nicht aus, um einen gleichmäßigen Film über die gesamte Strecke zu erzeugen. Vielmehr kommt es zu einer größeren Pfütze im Bereich eines jeden Beregners, die sich über die gesamte Fahrbahnbreite erstreckt. Zwischen den einzelnen Pfützen befinden sich feuchte Bereiche, auf denen sich kein Wasserfilm bildet. Es entsteht eine Art Streifenmuster, was zu den großen Schwankungen in den Messwerten führt. Während der Fahrt war das Fahrzeugniveau relativ konstant, vergleiche Anhang D.3, sodass ein potenzieller Einfluss durch Niveauänderungen nicht direkt abgeleitet werden kann.

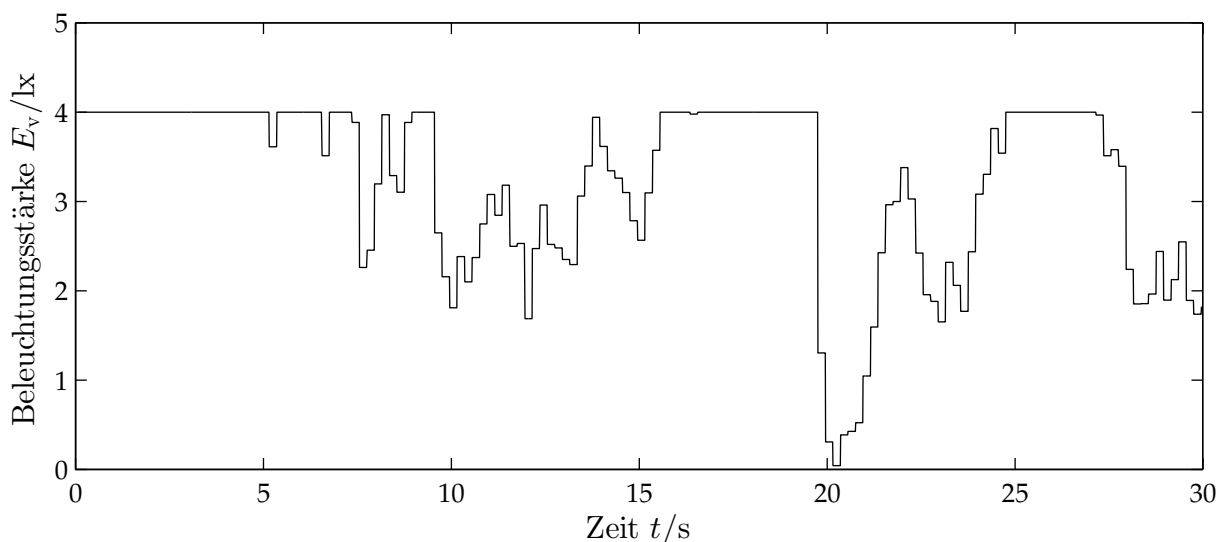
Einen möglichen Einfluss auf die Messwerte könnte neben einer Niveauänderung auch die Anbringung des Lichtmoduls darstellen. Diese ist nicht völlig schwingungsfrei, was zu geringen Bewegungen des Lichtkegels unter dem Fahrzeug führen und sich dementsprechend ebenfalls auf die Messwerte auswirken kann. Der Einfluss dürfte aber gering sein, denn in den aufgezeichneten Daten zu Fahrten, bei denen das Versuchsfahrzeug für einen längeren Zeitraum zwischendurch anhielt, sind keine periodischen Veränderungen in den Werten erkennbar. Insgesamt geht aus den gesammelten Daten aber nicht eindeutig hervor, ob ein Einfluss auf die Messwerte durch eine Änderung des Fahrzeugniveaus und/oder ein Schwingen des Lichtmoduls besteht und wie groß dieser ist. Dies sollte in zukünftigen Untersuchungen systematisch geprüft werden, um entsprechend die Auswertung und/oder weitere Verwendung der Daten anpassen zu können.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen können sowohl für den statischen als auch den dynamischen Fall charakteristische Unterschiede in den Messwerten für trockene, nasse und abtrocknende Fahrbahnen festgestellt werden. Aus diesem Grund sollte auch



der plötzliche Wechsel zwischen Witterungsbedingungen, zum Beispiel einsetzender Regen, eindeutig detektiert und klassifiziert werden können. Um diese Hypothese zu belegen, wurden weitere Versuchsfahrten im urbanen Umfeld Lippstadts unternommen. Voraussetzung für diese Fahrten waren feuchte Fahrbahnen, wie sie beispielsweise nach einem Regenschauer vorliegen. Die Fahrten wurden ungefähr eine Stunde nach Aussetzen des Regens begonnen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Fahrbahnen zur Zeit des Befahrens noch feucht gewesen sind. Dadurch konnte das Sensorsystem nicht nur unter den Extremfällen nass und trocken getestet werden, sondern auch unter erschwerten Bedingungen einer fortgeschrittenen Abtrocknung. Ein Nässegrad der Fahrbahnen zu Beginn der jeweiligen Datenerfassung, der als Referenz zu den Messwerten hätte dienen können, ist nicht bekannt.

Die Strecken wurden so gewählt, dass sich auf dem Weg Brücken und Bahnunterführungen befanden. An diesen Orten waren zum Zeitpunkt der Messungen noch trockene Fahrbahnbereiche vorhanden, die sich anhand der Messwerte von feuchten Oberflächen abgrenzen lassen sollten. Im Folgenden wird auf eine solche Fahrt eingegangen, deren Streckenverlauf in Abbildung D.5 nachvollzogen werden kann. Diese Strecke verlief zwischen zwei Kreuzungen, die Länge betrug etwa  $s = 250$  m. Die entsprechenden Weg-Zeit- (Abbildung D.7) und Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme (Abbildung D.6) befinden sich ebenfalls im Anhang. In diesem Fall war eine Unterführung Bestandteil der Strecke. In Abbildung 6.17 sind die Beleuchtungsstärkeverläufe für die Vorwärtsreflexion dargestellt.



**Abbildung 6.17:** Beleuchtungsstärkeverläufe der Sensoren für eine Fahrt auf feuchter Fahrbahn; eine Unterführung war Bestandteil der Strecke

Die Beleuchtungsstärkewerte des Vorwärtsreflexionssensors sind für eine übersichtlichere Darstellung auf 4 lx begrenzt. Höhere Werte resultieren hauptsächlich aus lokalen Nässeunterschieden und aus dem Überfahren von Fahrbahnmarkierungen. Entscheidend ist allerdings das Werteverhalten zum Zeitpunkt  $t \approx 20$  s. Es kommt hier zu einem kurz-

zeitigen Einbruch der Vorwärtsreflexion. Genau an dieser Stelle hat das Fahrzeug den trockenen Bereich der Unterführung überquert, sodass ein solches Verhalten zu erwarten war. Eine Unterscheidung von trockenen und feuchten Fahrbahnoberflächen ist folglich während der Fahrt auf Basis der gewonnenen Sensordaten möglich.

Ein weiterhin zu betrachtender Punkt ist die mögliche Verschmutzung der Sensoren unter dem Fahrzeug. Da es sich um ein optisches System handelt, ist durch geeignete Maßnahmen ein solcher Einfluss zu verhindern oder zu kompensieren. Möglich wären beispielsweise eine Schmutzerkennung oder selbstreinigende Systeme.

### 6.1.3 Fazit

Die Analyse der Daten des Radar- und Kamerasensors hat ergeben, dass beide sehr genaue Informationen über andere Verkehrsteilnehmer in Form einer Objektbeschreibung liefern. Zu kürzeren relativen Abständen hin nimmt ihre Genauigkeit allerdings ab. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass sowohl der Kamera- als auch der Radarsensor systemspezifische Latenzzeiten aufweisen, die über die reine Zykluszeit hinausgehen. Zumindest bei dem Radarsensor lässt sich der Einfluss dieser Latenz durch eine nachträgliche Prädiktion der Daten abschwächen. Verwendet man nur einen der beiden Sensoren, sind sowohl der Genauigkeitsverlust als auch der zeitliche Versatz der Informationen bei der Auslegung der gewünschten Funktion zu berücksichtigen.

Zur Beschreibung des Umfeldmodells hinsichtlich anderer Verkehrsteilnehmer ist ein Sensor allein nicht ausreichend. Erst durch die Fusion der beiden betrachteten Sensoren können die notwendigen Informationen generiert werden. Im direkten Vergleich liefert der Kamerasensor, bedingt durch die höhere laterale Auflösung, eine deutlich bessere Bestimmung des Objektmittelpunktes in Form des Horizontalwinkels. Dies kann im Fusionsprozess genutzt werden, um die vom Radarsensor ermittelten Positionsdaten zu korrigieren. Mit dem implementierten Fusionsalgorithmus konnte das Potenzial dieser korrigierenden Funktion aufgezeigt werden. Neben der Verbesserung der Positionsdaten wird aus den Messdaten beider Sensoren weiterhin eine stabile Objektbreite für den gesamten Begegnungsvorgang ermittelt.

Der beobachtete Genauigkeitsverlust zu kürzeren Entfernungen hin konnte durch den gezielten Verzicht auf eine Synchronisierung der Sensordaten deutlich reduziert werden und führte für die betrachteten Begegnungsvorgänge auf einer Geraden daher zu besseren Ergebnissen. Dies gilt allerdings nur, wenn anschließend eine Prädiktion der Fusionsdaten vorgenommen wird, um den Einfluss der Latenzzeit des Radarsensors abzuschwächen. Insgesamt erhöht sich durch den Fusionsprozess die Informationsgenauigkeit im Vergleich zu den Einzelsensoren, was durch entsprechende Kennzahlen eindeutig belegt wird.

Erstmals wurde ein Sensorsystem zur dynamischen Messung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn getestet. Sowohl die statischen Messungen auf trockener und nasser

als auch die dynamischen auf trockener, feuchter und nasser Fahrbahn zeigen, dass eine Detektion der Reflektivität der Fahrbahn und eine Zuordnung zu einem definierten Witterungszustand auf diese Weise möglich sind. Die gesammelten Daten können als erster Anhaltspunkt für die Definition von Grenzwerten diskreter Witterungszustände dienen. Neben den absoluten Werten der Sensoren und deren relativen Verläufen dient der Quotient aus Vorwärts- und Rückwärtsreflexion als weiterer Indikator.

## 6.2 Validierung der Gesamtfunktionalität

In diesem Teil der Arbeit werden die abschließenden Untersuchungen des Gesamtsystems behandelt. Ziel der Versuche ist der Nachweis, dass die entwickelte Schlechtwetterlichtfunktion einen quantifizierbaren Mehrwert für entgegenkommende Fahrer bietet. Zusätzlich wird die Wahrnehmung der Lichtfunktion in realen Begegnungssituationen erforscht. Zu diesem Zweck wurden in Anlehnung an die zuvor durchgeführten statischen Untersuchungen, vergleiche Kapitel 3.2, zum einen Messungen der Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers und zum anderen eine Probandenstudie durchgeführt. Die weiteren Ausführungen gliedern sich daher in zwei Teile: die messtechnische und die wahrnehmungsbasierte Bewertung der Schlechtwetterlichtfunktion.

Zu Vergleichszwecken wurden die Experimente auf trockener und nasser Fahrbahn durchgeführt. Diese fanden allesamt auf der Regenstrecke der Firma *HELLA KGaA Hueck & Co.* statt. In Abbildung 6.18 ist diese mit eingeschalteten Beregnern gezeigt. Der Aufbau des Versuchsfahrzeuges ist in Kapitel 5 beschrieben, einzig auf das Sensorsystem zur dynamischen Messung der Reflexionseigenschaften wurde verzichtet. Dies hat den Hintergrund, dass die Lichtfunktion auch für die Referenzsituation trockene Fahrbahn aktiviert sein sollte und deswegen auf die entsprechenden Daten verzichtet werden konnte. Vielmehr wurde eine Aktivierung manuell vorgenommen.

### 6.2.1 Messtechnische Bewertung der Schlechtwetterlichtfunktion

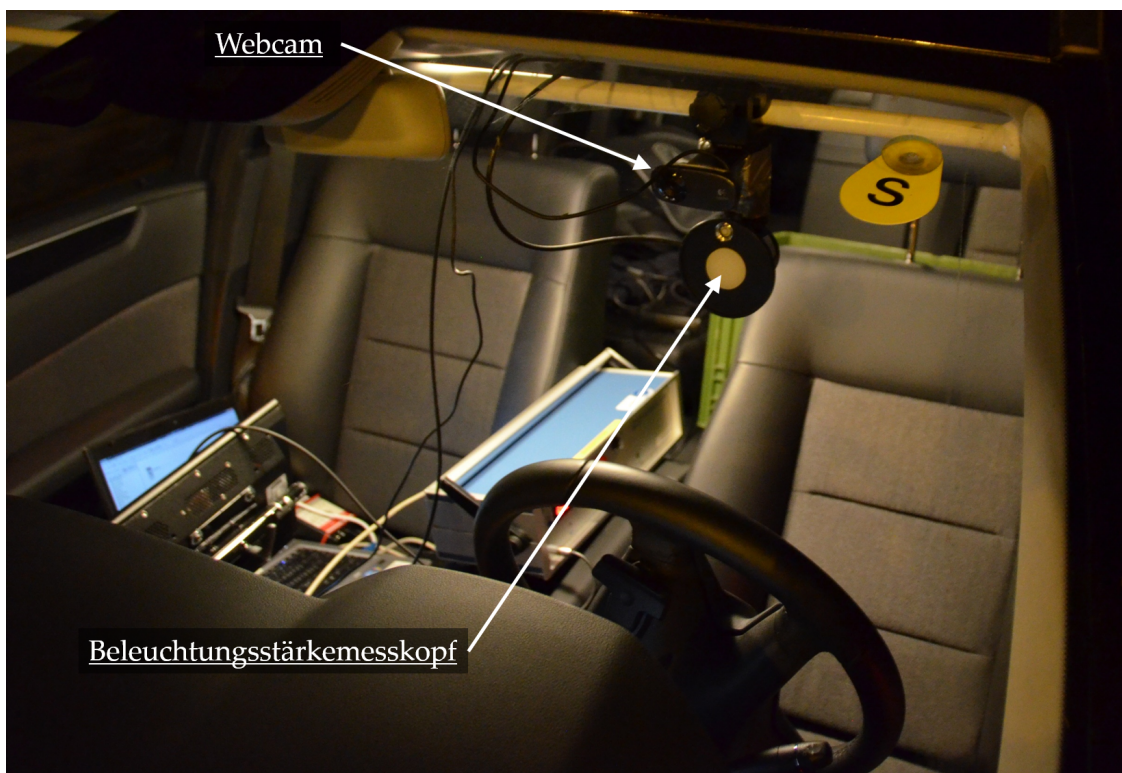
Für diese Untersuchungen wurden Begegnungssituationen dynamisch auf der Regenstrecke nachgestellt. Bei dieser handelt es sich um einen geraden Streckenabschnitt. Beteiligt waren insgesamt zwei Fahrzeuge. Es wurden drei verschiedene Begegnungssituationen betrachtet: Fahrzeuge A und B fahren sich entgegen, Fahrzeug A fährt dem stehenden Fahrzeug B entgegen und Fahrzeug B fährt dem stehenden Fahrzeug A entgegen. Um möglichst viele Messwerte zu erhalten, war die jeweilige Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf einen Bereich zwischen 10 km/h und 20 km/h begrenzt.

Zur Erfassung der entsprechenden Messwerte wurde ein Beleuchtungsstärkemessgerät so in das Fahrzeug ohne adaptives System integriert, dass sich dieses auf Augenhöhe des



**Abbildung 6.18:** Bewässerung der Regenstrecke aus Sicht des Fahrzeuges mit adaptivem Schlechtwetterlichtsystem

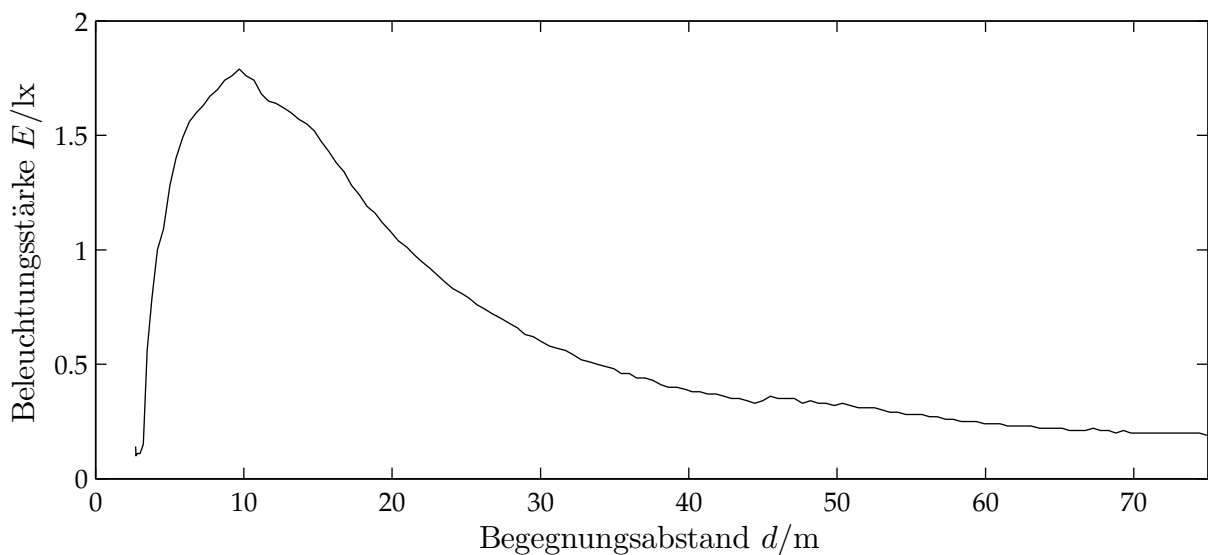
Fahrers befand. Um neben dem objektiven auch einen subjektiven Eindruck von dem jeweiligen Versuchsdurchlauf zu erhalten, wurde zusätzlich in beide Fahrzeuge eine Webcam eingebaut. Dies ist in Abbildung 6.19 am Beispiel des „Messfahrzeuges“ gezeigt.



**Abbildung 6.19:** Mit Beleuchtungsstärkemessgerät und Webcam ausgerüstetes Versuchsfahrzeug

Zur Bestimmung der genauen Relativposition zwischen den beiden Fahrzeugen wurden diese erneut mit den ADMA-Systemen ausgerüstet. Um in dem entgegenkommenden Fahrzeug die Positionsdaten, die Beleuchtungsstärkewerte und die Frames der Webcam synchron speichern zu können, wurde die Software RTMaps der Firma *Intempora S.A.* eingesetzt.

Als Referenz für „Schönwetterbedingungen“ wurden erste Messungen auf einer trockenen Fahrbahn vorgenommen. Die Ergebnisse für eine Begegnungssituation mit normalem Abblendlicht sind in Abbildung 6.20 über dem Begegnungsabstand aufgetragen. Mit dem Begegnungsabstand ist der direkte Abstand zwischen Fahrzeugfront und dem Auge des entgegenkommenden Fahrers beziehungsweise dem Beleuchtungsstärkemessgerät gemeint. Dieser wurde für die Darstellung auf 75 m begrenzt. Bereits in den Messwerten berücksichtigt ist eine durchgeführte Dunkelfahrt. Bei einer solchen Dunkelfahrt ist einzig das Messfahrzeug mit eingeschaltetem Abblendlicht auf der Strecke und protokolliert die entsprechenden Daten. Mithilfe dieser Dunkelmessung kann dann nachträglich der vom anderen Fahrzeug hervorgerufene Anteil an den gemessenen Beleuchtungsstärken ermittelt werden.



**Abbildung 6.20:** Beleuchtungsstärkeverlauf am Auge eines entgegenkommenden Fahrers für eine Begegnungssituation auf trockener Fahrbahn

Im Allgemeinen werden die auf einer trockenen Fahrbahn durch die Vorwärtsreflexion erzeugten Beleuchtungsstärken am Auge nicht als besonders störend empfunden. Eine Empfehlung zur Aktivierung der Schlechtwetterlichtfunktion auch bei trockenen Bedingungen kann daher nicht gegeben werden. Dies liegt unter anderem an der im Vergleich zur nassen Fahrbahn hohen Rückwärtsreflexion. Dadurch nehmen beide am Passiervorgang beteiligten Fahrer einen auf der Fahrbahn erzeugten Entblendungsbereich wahr. Hierbei ist der Eindruck für den Fahrer mit aktiviertem Schlechtwetterlicht sogar deutlich stärker, da der Gegenverkehr aufgrund der hohen Rückwärtsreflexion den abgedunkelten Bereich aus seiner Sicht mit der eigenen Beleuchtung teilweise wieder aufhellt. Dies

führt nach Ansicht des Autors vor allem für den Fahrer mit Schlechtwetterlichtfunktion zu einem störenden Eindruck, den der mögliche, geringe Nutzen für den Gegenverkehr nicht aufzuwiegen vermag. Die Sicht aus beiden Fahrzeugen bei aktivierter Schlechtwetterlichtfunktion ist in Abbildung 6.21 exemplarisch gezeigt. Hieran wird deutlich, dass die Entblendungsbereiche und auch deren zeitliche Veränderungen im Laufe des Passiervorganges für die Insassen wahrnehmbar sind und dies somit als störend empfunden werden könnte.



(a) Sicht aus dem Versuchsfahrzeug mit aktiviertem Schlechtwetterlicht



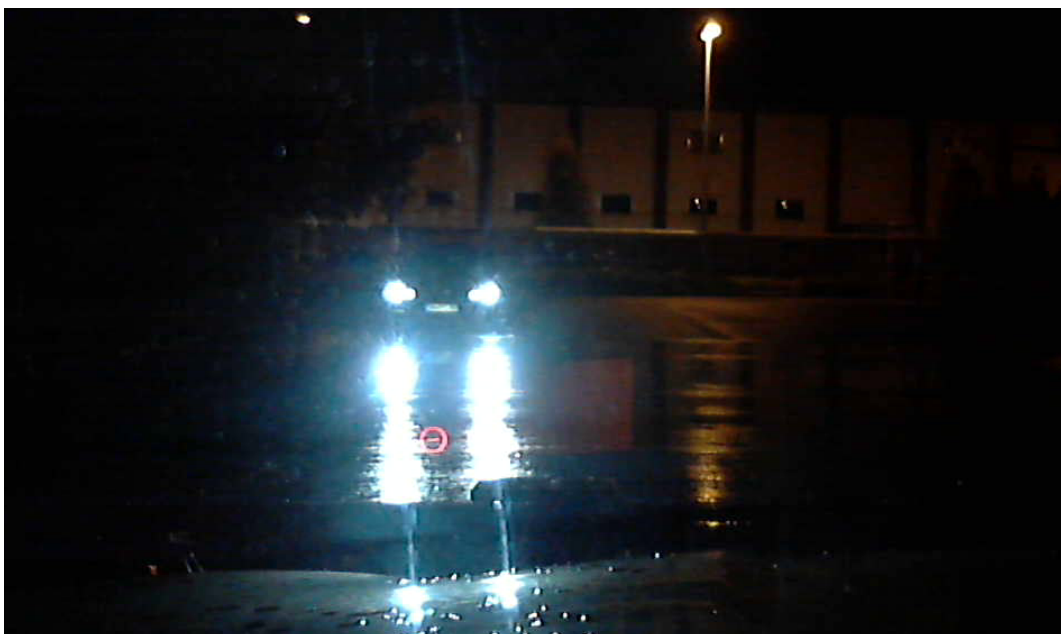
(b) Sicht aus dem Messfahrzeug

**Abbildung 6.21:** Deutliche Wahrnehmung des Entblendungsbereiches auf einer trockenen Fahrbahn

Im Vergleich dazu sind in Abbildung 6.22 und 6.23 die verschiedenen Sichtweisen für eine nasse Fahrbahn dargestellt. Die Entfernung zwischen den beiden Fahrzeugen beträgt in allen Fällen etwa 20 m. In Abbildung 6.22a ist die Sicht des Fahrers im Versuchsfahrzeug bei aktiviertem Abblendlicht gezeigt, in Abbildung 6.23b die Sicht bei aktiviertem Schlechtwetterlicht. Beide Bilder sind leicht vom orangefarbenen Bereich des Head-Up-Displays überlagert, der jeweils rechts neben den Blendkeulen zu erkennen ist.



(a) Sicht aus dem Versuchsfahrzeug mit aktiviertem Abblendlicht



(b) Sicht aus dem Versuchsfahrzeug mit aktiviertem Schlechtwetterlicht

**Abbildung 6.22:** Wahrnehmung unterschiedlicher Lichtfunktionen auf einer nassen Fahrbahn

Ein Unterschied zwischen den beiden Lichtverteilungen ist nicht zu erkennen, da die

Blendkeulen des entgegenkommenden Fahrzeuges (Messfahrzeug) den angepassten Bereich der eigenen Lichtverteilung überstrahlen. Aber auch ohne ein entgegenkommendes Fahrzeug ist der Entblendungsbereich auf einer nassen Fahrbahn nicht sichtbar. Dies liegt an der niedrigen Rückwärtsreflexion, wodurch der Leuchtdichteunterschied zwischen Entblendungsbereich und übriger Lichtverteilung sehr gering ausfällt.



(a) Sicht aus dem Messfahrzeug bei entgegenkommendem Versuchsfahrzeug mit aktiviertem Abblendlicht



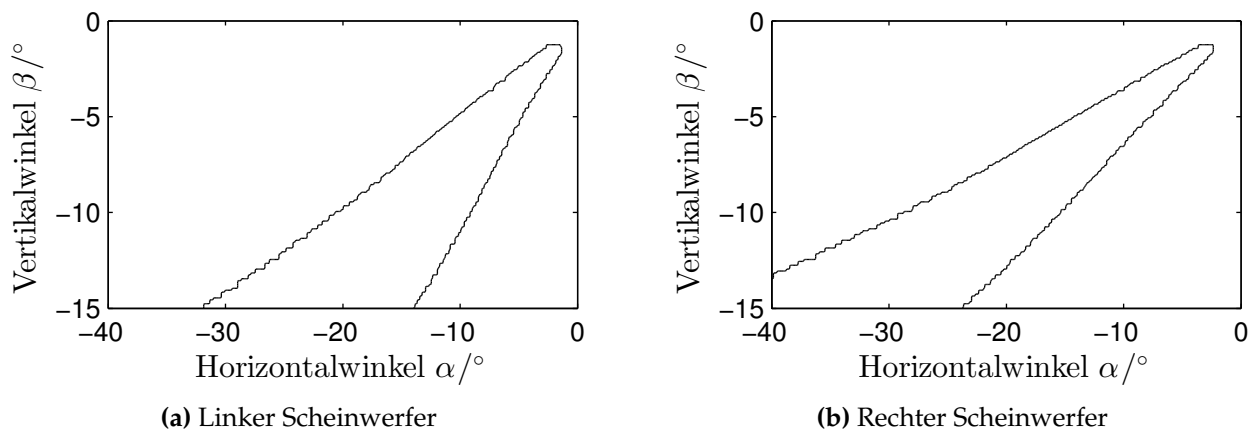
(b) Sicht aus dem Messfahrzeug bei entgegenkommendem Versuchsfahrzeug mit aktiviertem Schlechtwetterlicht

**Abbildung 6.23:** Wahrnehmung der unterschiedlichen Lichtverteilungen auf nasser Fahrbahn aus Sicht des entgegenkommenden Fahrzeuges



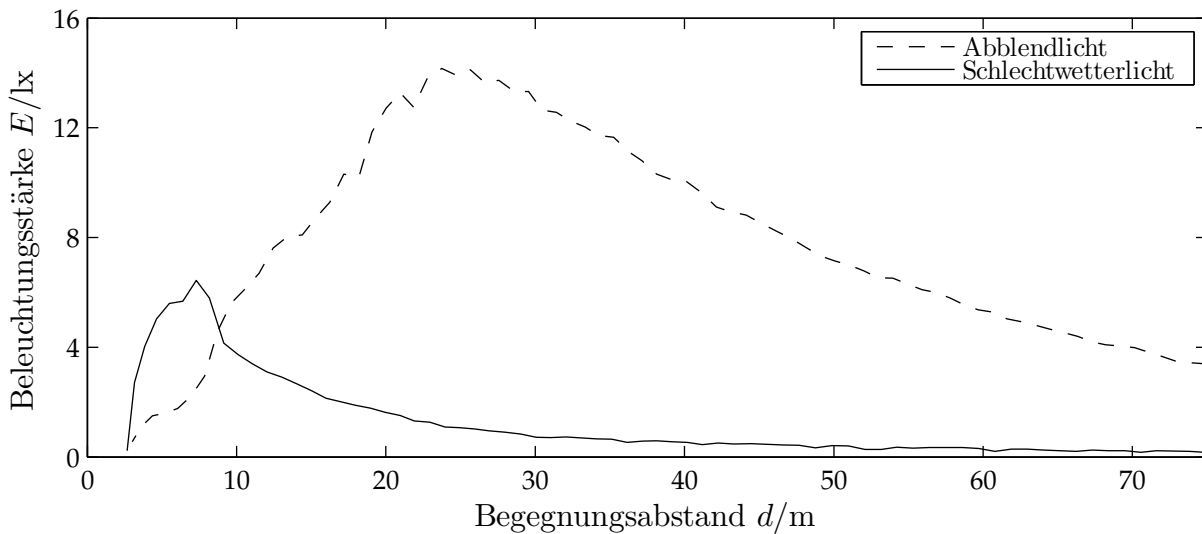
Im Gegensatz dazu ist aus Sicht des Fahrers im Messfahrzeug ein deutlicher Unterschied zwischen aktiviertem Abblendlicht (Abbildung 6.23a) und aktiviertem Schlechtwetterlicht (Abbildung 6.23b) wahrnehmbar. Auf den Bildern ist klar zu erkennen, dass die Leuchtdichte der Blendkeulen durch die Anpassung und Ausrichtung der Lichtverteilung deutlich reduziert werden konnte.

Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse für eine der durchgeführten Fahrten vorgestellt. Anhand dieser wird verdeutlicht, wie stark die bereits in den Bildern erkennbare Reduzierung der Leuchtdichte ist. In Kapitel 3.3.2.1 werden die abzudunkelnden Winkelbereiche hergeleitet, die sich aus theoretischen Überlegungen für alle betrachteten Begegnungssituationen ergeben können. Zum Vergleich sind in Abbildung 6.24 diejenigen Winkelbereiche dargestellt, die sich unter Verwendung der relativen Positionsdaten und den Abmessungen der Windschutzscheibe des entgegenkommenden Fahrzeuges für diese Fahrt unter der Annahme einer spiegelnden Reflexion berechnen lassen. Die Darstellung wurde auf  $\alpha_{\min} = -40^\circ$  und  $\beta_{\min} = -15^\circ$  begrenzt, die typische Minimalwerte für eine Lichtverteilung sind. Es zeigt sich, dass diese Bereiche eine Teilmenge der zuvor ermittelten Winkelbereiche bilden und geben eine Vorstellung, in welchen Teilen der Lichtverteilung für diese Fahrt Anpassungen vorzunehmen waren.



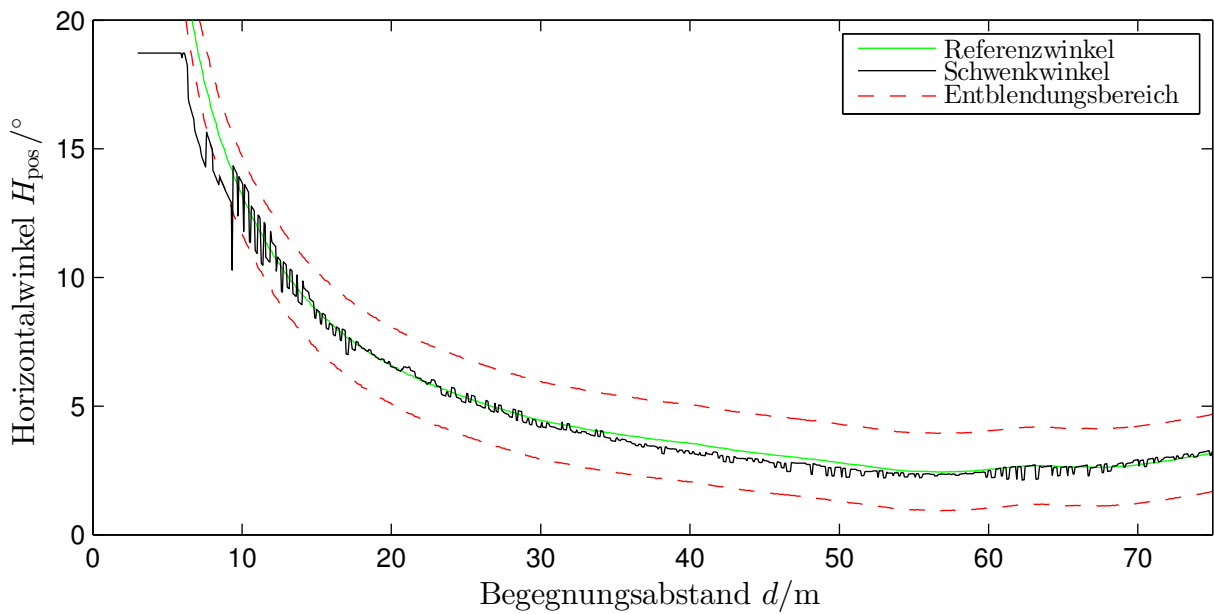
**Abbildung 6.24:** Zur durchgängigen Entblendung der Windschutzscheibe des entgegenkommenden Fahrzeuges notwendigen Winkelbereiche

Der Nutzen der Schlechtwetterlichtfunktion liegt in der Reduzierung der Beleuchtungsstärke am Auge entgegenkommender Fahrer und Beifahrer. In Abbildung 6.25 sind die Beleuchtungsstärkeverläufe für eine Begegnungssituation über dem Begegnungsabstand, also dem Abstand zwischen eigener Fahrzeugfront und dem Auge des entgegenkommenden Fahrers, aufgetragen. In diesem Fall sind sich beide Fahrzeuge aktiv entgegengefahren. Für einen direkten Vergleich ist sowohl der Verlauf für die Fahrt mit normalem Abblendlicht als auch derjenige für die Fahrt mit der entwickelten adaptiven Schlechtwetterlichtfunktion dargestellt.

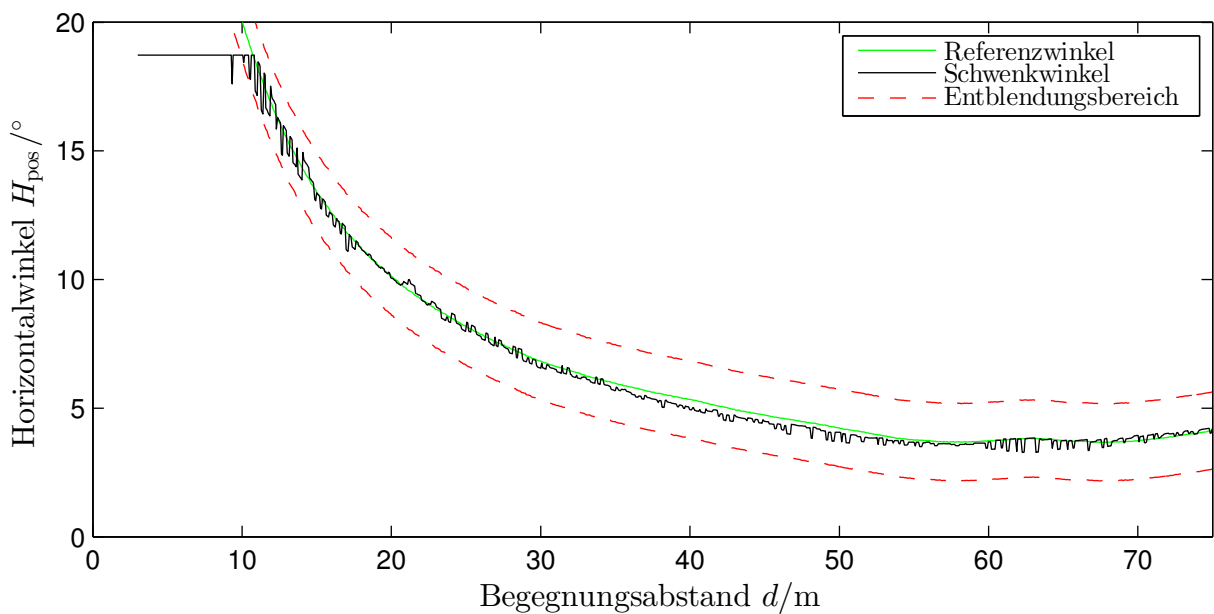


**Abbildung 6.25:** An der Augenposition eines entgegenkommenden Fahrers in Abhängigkeit des Begegnungsabstandes gemessene Beleuchtungsstärke für einen Passiervorgang auf nasser Fahrbahn

Anhand der durchgeführten Messungen kann die Wirksamkeit des Schlechtwetterlichts eindeutig belegt werden. Es ist zu erkennen, dass die Beleuchtungsstärke fast über den gesamten Passiervorgang hindurch deutlich reduziert werden konnte. Mit abnehmendem Abstand ist grundsätzlich eine Zunahme der Beleuchtungsstärke festzustellen, die für kurze Entfernungen sogar die bereits wieder abnehmenden Werte des normalen Abblendlichtes übertreffen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Abschattung der Lichtverteilung über eine Blende realisiert wurde, die entsprechend der relativen Position des entgegenkommenden Fahrzeuges verschwenkt wird. Somit ist zum einen immer noch eine Restlichtstärke vorhanden ist (vergleiche Abbildung 5.12), zum anderen befindet sich im zentralen Bereich der Lichtverteilung auch die höchste Lichtstärke oberhalb der HDG (siehe Abbildung 5.10b). Der direkte und der indirekte Anteil überlagern sich zu einer Gesamtlichtstärke, die auf das Messgerät trifft, wobei der direkte Anteil deutlich größer ist. Mit abnehmender Entfernung steigt deswegen die gemessene Beleuchtungsstärke in der Theorie potenziell an (photometrisches Entfernungsgesetz). Ab einem Begegnungsabstand von  $d \approx 10$  m erfolgt ein von dieser Gesetzmäßigkeit abweichendes Verhalten. Zur Erklärung sind in Abbildung 6.26 die Schwenkwinkel für beide Scheinwerfermodule über dem Begegnungsabstand aufgetragen, die vom Algorithmus aus den Umfelddaten berechnet und eingestellt wurden. Der Referenzwinkel wurde aus der lateralen und longitudinalen Relativposition mittels ADMA-Daten berechnet. Zusätzlich ist der theoretische Entblendungsbereich von  $3^\circ$  um den Referenzwinkel herum mit eingezeichnet, um die maximal mögliche Abweichung des eingestellten Schwenkwinkels von der Referenzposition zu kennzeichnen.



(a) Linkes Modul



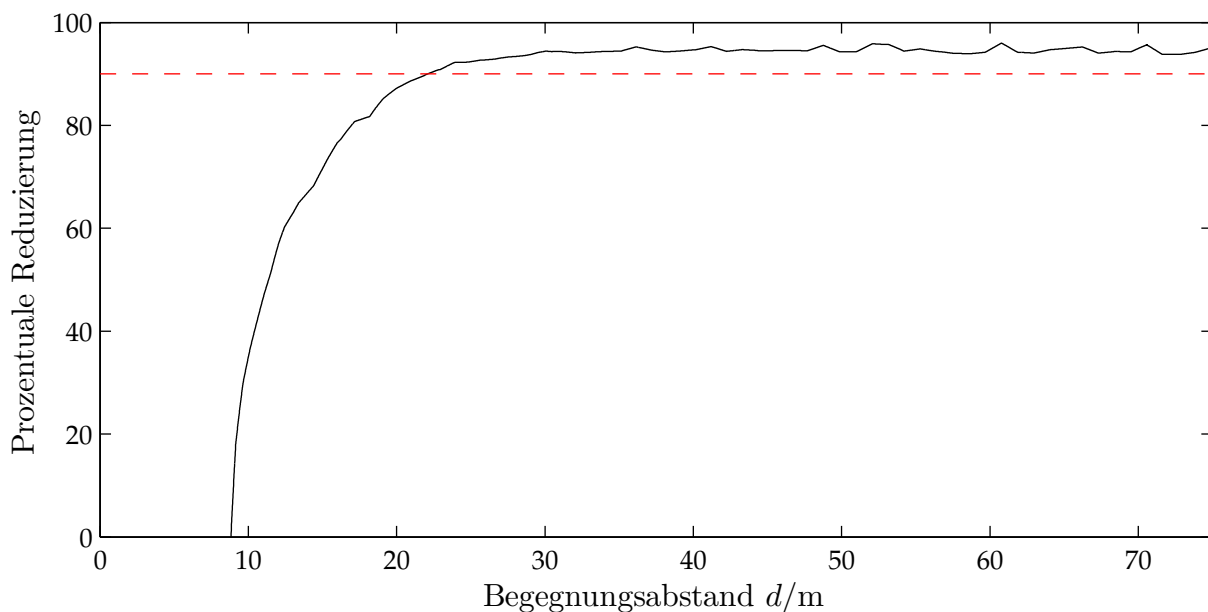
(b) Rechtes Modul

**Abbildung 6.26:** Verlauf der Schwenkwinkel für beide Scheinwerfermodule, die während der Begegnungssituation eingestellt wurden

Die Entfernung  $d \approx 10$  m stellt hier in zweierlei Hinsicht die technische Grenze des verwendeten Systems dar. Zum einen wird die Entblendung über das Verschwenken der Blende realisiert. Auch wenn der mögliche Schwenkbereich für die verwendeten Schwenkmodule auf  $\pm 19^\circ$  erweitert werden konnte, ist das selbst für diese Begegnungssituation auf einer Geraden nicht ausreichend. Zu erkennen ist das Erreichen dieser Grenze am Verlauf des eingestellten Schwenkwinkels für das rechte Scheinwerfermodul (Abbildung 6.26b) bei einem Begegnungsabstand von  $d = 10,82$  m. Ab dieser Entfernung ist

das Modul maximal verschwenkt und verharrt, abgesehen von einigen Sprüngen aufgrund kurzzeitiger Einflüsse der ungenaueren Radardaten, in dieser Position. Dadurch wandert die Augenposition langsam aus dem abgeschatteten Bereich heraus, was mit einem Anstieg der Beleuchtungsstärke verbunden ist. Eine Verbesserung würde das Zurückschwenken des Moduls nach Erreichen der Grenze auf die Nullposition bedeuten, da die Lichtstärken einer Lichtverteilung im Außenbereich stärker abfallen. Allerdings stellt das System in dieser Form kein mögliches Konzept für eine Serienumsetzung dar, weshalb auf diese oder ähnliche Maßnahmen verzichtet wurde. Mit einem eigentlich für diese Lichtfunktion vorgesehenen Matrix-Scheinwerfer würde diese Problematik überhaupt nicht auftreten. Zum anderen werden ab dem Begegnungsabstand  $d = 9,34$  m die im Fusionsprozess ermittelten Objektdaten zu ungenau. Abbildung 6.26a ist zu entnehmen, dass sich das linke Modul noch nicht am „Anschlag“ befindet. Allerdings wird dieses aufgrund der zu ungenauen Objektdaten nicht mehr richtig positioniert. Dadurch kann das Beleuchtungsstärkemessgerät nicht mehr entblendet werden und die gemessenen Werte fallen dementsprechend noch höher aus.

Die Effektivität des Gesamtsystems lässt sich über die im Vergleich zum Abblendlicht reduzierte Beleuchtungsstärke des Schlechtwetterlichtes definieren. In Abbildung 6.27 ist diese in Abhängigkeit des Begegnungsabstandes dargestellt. In Rot gestrichelt ist die 90 %-Linie eingezeichnet, die nach Messungen von Schmidt-Clausen und Schwenkschuster [SS01] den indirekten Anteil an der gemessenen Beleuchtungsstärke auf einer nassen Fahrbahn ausmacht, vergleiche Abbildung 2.16. Auch wenn dieser Wert nur für einen Begegnungsabstand von  $d = 50$  m und für den gewählten Versuchsaufbau Gültigkeit besitzt, so stellt er dennoch eine erste Orientierung dar.



**Abbildung 6.27:** Prozentuale Reduzierung der Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers durch das Schlechtwetterlicht, bezogen auf die Messwerte bei aktiviertem Abblendlicht

Bis zu einer Entfernung von knapp 20 m liegt die Reduzierung der Beleuchtungsstärke bei über 90 %, was die Wirksamkeit des gewählten Ansatzes noch einmal unterstreicht. Gut zu erkennen ist auch hier der Einfluss des direkten Anteils der Schlechtwetterlichtverteilung. Da die Beleuchtungsstärke mit abnehmendem Begegnungsabstand potenziell ansteigt (photometrisches Entfernungsgesetz), nimmt die Effektivität des Systems für kleinere Abstände stetig ab, bis für  $d \leq 9$  m sogar eine Zunahme der Messwerte im Vergleich zum herkömmlichen Abblendlicht auftritt. Eine zukünftige Realisierung der Schlechtwetterlichtfunktion ohne ein Verschwenken der gesamten Lichtverteilung würde für kürzere Entfernungen zu einer Steigerung der Effektivität führen, da die entsprechenden Lichtstärken der Lichtverteilung oberhalb der HDG für die relevanten Winkel kürzerer Begegnungsabstände immer stärker abnehmen. Eine Effektivität von 100 % ist allerdings nur zu erreichen, wenn sowohl der direkte als auch der indirekte Anteil vollständig abgeschattet werden können.

### 6.2.2 Wahrnehmungsbasierte Bewertung der Schlechtwetterlichtfunktion

In Anlehnung an die in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Probandenstudie wurde auch mit dem Gesamtsystem ein dynamischer Versuch zur subjektiven Wahrnehmung der Lichtfunktion durchgeführt. Dieser fand ebenfalls auf der besagten Regenstrecke statt. Das mit dem System ausgerüstete Fahrzeug wurde an dem einen Ende der Strecke positioniert und diese Position während des gesamten Versuchs nicht mehr verändert. Vor Beginn eines Versuchsdurchganges postierte sich das zweite Fahrzeug am anderen Ende der bewässerten Fahrbahn und fuhr dann auf Kommando dem stehenden entgegen. Die Probanden waren angehalten, eine ihnen angemessen vorkommende Geschwindigkeit zu wählen. Dadurch sollten sie sich besser auf die eigentliche Aufgabe konzentrieren können und nicht ständig auf den Tachometer achten müssen. Beide Fahrzeuge wurden jeweils mit einer Versuchsperson besetzt. Die Aufgabenstellungen ähneln stark denen der statischen Studie: In dem stehenden Fahrzeug sollte wieder die empfundene Qualität der durch die eigenen Scheinwerfer erzeugten Ausleuchtung bewertet werden. Zusätzlich erfolgte eine Abfrage der Blendempfindung durch die Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeuges. In dem fahrenden Fahrzeug wurde lediglich nach dem Blendeindruck gefragt, eine neuerliche Bewertung der Sicht entfiel aufgrund der vorherigen Ergebnisse. Der genaue Wortlaut für die Instruktionen und Fragebögen beider Fahrzeuge findet sich in Anhang E.3.

Grundsätzlich war die Regenstrecke für die Versuche sehr gut geeignet, allerdings gab es eine unerwünschte Randbedingung. Im Gesichtsfeld der Probanden des stehenden Fahrzeuges befand sich eine Straßenleuchte, die nicht abgeschaltet werden konnte (siehe zum Beispiel Abbildung 6.21a). Dadurch kam es aus der Perspektive dieses Fahrzeuges zu einer zusätzlichen, statischen Blendkeule. Es ist nicht auszuschließen, dass dieser Einfluss auf das Niveau der zu beurteilenden Effekte hatte. Durch einen Wechsel der jeweiligen

Fahrzeugpositionen hätte das Versuchsdesign vollständig ausbalanciert werden können. Zur Beurteilung des Gesamtsystems sind jedoch die Bewertungen der Probanden aus dem entgegenkommenden Fahrzeug von vorrangigem Interesse, für die keine Beeinflussung durch die Straßenleuchte vorlag. Deswegen wurde an dem ursprünglich geplanten Ablauf festgehalten.

Den Probanden wurden in jedem Fahrzeug insgesamt zwei verschiedene Lichtverteilungen in vier aufeinanderfolgenden Durchgängen präsentiert. Zum einen die durch das Referenzsystem erzeugte Abblendlichtverteilung und zum anderen die von der adaptiven Schlechtwetterlichtfunktion situativ angepasste Lichtverteilung. Die Abfolge der einzelnen Durchgänge wurde auf zwei Reihenfolgen begrenzt:

**Variante A:** Abblendlicht → Schlechtwetterlicht → Schlechtwetterlicht → Abblendlicht

**Variante B:** Schlechtwetterlicht → Abblendlicht → Abblendlicht → Schlechtwetterlicht

Vor jeweils dem ersten und dem dritten Durchgang erfolgte eine erneute Bewässerung der Fahrbahn, um möglichst konstante Bedingungen zu gewährleisten. Durch die gewählten Reihenfolgen ist sichergestellt, dass jede Lichtverteilung einmal direkt nach der Bewässerung bewertet wurde.

Insgesamt nahmen an der Studie fünf Frauen und elf Männer teil. Das Durchschnittsalter betrug knapp 33 Jahre, der jüngste Teilnehmer war 25 Jahre und der älteste 56 Jahre alt. Zur statistischen Auswertung der Studie wurde jeweils ein t-Test bei gepaarten Stichproben herangezogen. Mittels visueller Inspektion wurden die Voraussetzungen für dieses parametrische Verfahren überprüft. Die grafische Analyse hat gezeigt, dass die Forderung nach näherungsweise normalverteilten Daten erfüllt ist.

Wie bereits erwähnt, wurde die Fahrbahn aus Gründen der Durchführungsökonomie nur nach jedem zweiten Durchgang neu bewässert. Eine zuvor erfolgte visuelle Überprüfung der Verhältnisse ergab keine wahrnehmbaren Unterschiede zwischen der frisch und der vor wenigen Minuten bewässerten Fahrbahn. Dennoch ist es nicht gänzlich auszuschließen, dass es zu einer Beeinflussung der Probandenbewertungen aufgrund uneinheitlicher Bedingungen kam. Um diese Bewertungen auf etwaige Einflüsse durch die geringfügig voneinander abweichenden Bedingungen hin zu untersuchen, wurden insgesamt sechs Tests durchgeführt. In diesen statistischen Tests wurde geprüft, ob signifikante Mittelwertunterschiede für die Bewertungen jeweils vor und nach einer Bewässerung vorliegen. Als Indiz für etwaige Bewertungsunterschiede aufgrund der Bewässerung wird eine Zurückweisung der Nullhypothese ( $H_0$ : Es gibt keinen Unterschied in den Bewertungen zwischen den Bedingungen frisch beziehungsweise vor wenigen Minuten bewässert) gewertet. Für jeden einzelnen Test beträgt die Irrtumswahrscheinlichkeit, die Nullhypothese fälschlicherweise zurückzuweisen, obwohl diese zutreffend ist,  $\alpha$ . In diesem Fall wurde  $\alpha = 5\%$  gewählt, was dem gängigen Vorgehen entspricht. Werden allerdings mehrere Tests durchgeführt, so steigt die Wahrscheinlichkeit schnell an, dass mindestens einmal die Nullhypothese fälschlicherweise verworfen wird. Deswegen ist eine sogenannte  $\alpha$ -Fehler-Adjustierung vorzunehmen [Bor99]. Hierbei wird in Abhängigkeit der Anzahl der

Tests  $n$  für jeden einzelnen Test eine neue Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha'$  berechnet, sodass insgesamt eine Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 5\%$  beibehalten wird. Diese neue Irrtumswahrscheinlichkeit ergibt sich nach Bortz [Bor99] zu

$$\alpha' = 1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{n}} = 0,85\% \quad (6.8)$$

Es wurden sechs t-Tests für die Bewertungen zu den unterschiedlichen, in Tabelle 6.2 aufgelisteten Aufgabenstellungen durchgeführt. Zusätzlich enthält die Tabelle die Ergebnisse der einzelnen Tests.

Bewertung der ...	t	df	p
Blendung durch das fahrende Fahrzeug (bei Abblendlicht)	0,674	15	0,51
Blendung durch das fahrende Fahrzeug (bei Schlechtwetterlicht)	2,183	15	0,045
Blendung durch das stehende Fahrzeug mit Abblendlicht	-1,185	15	0,089
Blendung durch das stehende Fahrzeug mit Schlechtwetterlicht	1,861	15	0,083
Ausleuchtung mit Abblendlicht	-1,861	15	0,083
Ausleuchtung mit Schlechtwetterlicht	1,168	15	0,261

**Tabelle 6.2:** Ergebnisse der t-Tests zur Überprüfung, ob der Zeitpunkt der Bewässerung einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der Probanden hatte

In keinem der sechs Fälle liegt der berechnete p-Wert unter der adjustierten Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha' = 0,0085$ , sodass die Nullhypothese beibehalten werden kann.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Angaben der Probanden im stehenden Fahrzeug, das mit der adaptiven Lichtfunktion ausgestattet ist. Die Bewertung der Ausleuchtung des stehenden Fahrzeuges erfolgte unter Verwendung der bereits eingeführten fünfstufigen Skala. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.3 aufgeführt. Diese ähneln stark denen des statischen Versuchs, vergleiche Tabelle 3.2. Es handelt sich bei den Abweichungen um nicht signifikante Unterschiede.

Lichtverteilung	Mittelwert	Standardabweichung
Abblendlicht	2,8	0,68
Schlechtwetterlicht	2,9	0,67

**Tabelle 6.3:** Bewertung der eigenen Ausleuchtung aus dem stehenden Fahrzeug (1: sehr schlecht, 5: sehr gut)

Die reinen Zahlen legen die Vermutung nahe, dass die Probanden keinen Unterschied zwischen den beiden Lichtverteilungen haben erkennen können. Im Fragebogen eingetragene Kommentare und nachträgliche Gespräche geben an dieser Stelle einen tieferen Einblick. Einige Probanden haben tatsächlich keinen Unterschied wahrnehmen können. Andere haben eine Bewegung der Lichtverteilung des Schlechtwetterlichtes bemerkt, zum Beispiel durch das Wandern eines dunklen Bereiches auf der Wand einer circa 200 m entfernten Fabrikhalle, der durch die Vorwärtsreflexion erzeugt wurde. Einige konnte

anfangs „dunkle Streifen“ auf der Fahrbahn erkennen, was ihnen allerdings bei kürzeren Begegnungsabständen aufgrund der Blendkeulen des anderen Fahrzeuges nicht mehr möglich war. Grundsätzlich wurden diese Auffälligkeiten nicht als störend empfunden und haben daher die Bewertung nicht signifikant beeinflusst.

Zusätzlich zur Bewertung der Ausleuchtung wurden die Probanden im stehenden Fahrzeug nach der Blendung durch den Gegenverkehr befragt. Dadurch sollte von der eigentlichen Aufgabe abgelenkt werden, um dem unnatürlich gesteigerten Suchen nach Unterschieden vorzubeugen. Denn während einer Fahrt ist man ebenfalls mit anderen Dingen beschäftigt und widmet seine Aufmerksamkeit nicht nur einer einzigen Aufgabe. Für die Bewertung des Blendgefühls wurde die neunstufige de-Boer-Skala herangezogen. In Tabelle 6.4 sind die Beurteilungen der Versuchspersonen zusammengefasst. Auch hierbei handelt es sich lediglich um nicht signifikante Abweichungen. Dies sollte auch so sein, da sich an der Lichtverteilung des entgegenkommenden Fahrzeuges nichts änderte.

Lichtverteilung	Mittelwert	Standardabweichung
Abblendlicht	4,1	1,58
Schlechtwetterlicht	3,7	1,55

**Tabelle 6.4:** Bewertung der psychologischen Blendung aus dem stehenden Fahrzeug (1: unerträglich, 9: kaum merklich)

Insgesamt konnte somit das bereits durch die statische Studie gewonnene Ergebnis zur Wahrnehmung des Schlechtwetterlichtes aus dem eigenen Fahrzeug auch für den dynamischen Fall erhärtet werden. Dabei sind die oben erwähnten Einschränkungen durch die Spiegelungen der Straßenleuchte für die Bewertungen aus dem stehenden Fahrzeug zu berücksichtigen.

Aus Sicht des entgegenkommenden Fahrers ist einzig das subjektive Blendgefühl, verursacht durch die Lichtverteilung des stehenden Fahrzeuges, von Interesse. Im statischen Versuch hatte sich bereits ein stark wahrnehmbarer Effekt ergeben, siehe Tabelle 3.3. Nun galt es zu überprüfen, ob dies auch während einer Begegnungsfahrt dauerhaft der Fall ist. Der zuvor gemessene Verlauf der Beleuchtungsstärkewerte, siehe Abschnitt 6.2.1, lässt diese Vermutung zu, Aufschluss darüber gibt die Bewertung der Probanden. Diese ist in Tabelle 6.5 zusammengefasst.

Lichtverteilung	Mittelwert	Standardabweichung
Abblendlicht	3,0	1,29
Schlechtwetterlicht	7,2	1,18

**Tabelle 6.5:** Bewertung der psychologischen Blendung aus dem fahrenden Fahrzeug (1: unerträglich, 9: kaum merklich)

Es handelt sich bei der Differenz der Mittelwerte zur Bewertung der beiden Lichtverteilungen um signifikante Unterschiede ( $p = 0.000$ ). Die im statischen Versuch ermittelte,



deutliche Reduzierung des Blendeindrucks für entgegenkommende Fahrer konnte somit auch im dynamischen Fall bestätigt werden.

Auf die Antworten der Probanden zu den allgemeinen Fragen im Fragenkatalog soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Die entsprechenden Histogramme befinden sich in Anhang E.3.

### 6.2.3 Fazit

Durch Messung der Beleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers konnte der Nutzen der Schlechtwetterlichtfunktion eindeutig nachgewiesen und quantifiziert werden. Bis zu einem Begegnungsabstand von 10 m ist eine deutliche Reduktion der Messwerte im Vergleich zu Untersuchungen mit normaler Abblendlichtverteilung festzuhalten. Der Anstieg der Messwerte mit dem adaptiven Schlechtwetterlicht zu kürzeren Abständen hin ist systembedingt hauptsächlich auf den direkt gemessenen Anteil der Lichtverteilung zurückzuführen. Die zuvor theoretisch hergeleitete Grenze des Systems von 14 m konnte unterschritten werden. Dies liegt zum einen an der kleineren lateralen Entfernung zwischen den beiden Fahrzeugen, zum anderen an der Positionierung des Entblendungsbereiches auf die Mitte der Fahrerseite. Auch wenn nicht mehr die gesamte Fahrerseite ausgeblendet werden kann, befindet sich das Beleuchtungsstärkemessgerät dennoch im Entblendungsbereich.

Die durchgeführte Probandenstudie bestätigt den messtechnisch erfassten Effekt. So konnte der Blendeindruck der Versuchsteilnehmer im Vergleich zu einem normalen Abblendlicht durchschnittlich um über vier Skalenstufen gesenkt werden. Die stetige, systembedingte Abnahme der Effektivität der Schlechtwetterlichtfunktion für Begegnungsabstände  $d \leq 20$  m hat sich nicht negativ auf das subjektive Blendempfinden ausgewirkt. Gleichzeitig wurde die Ausleuchtung durch das Schlechtwetterlicht nicht schlechter bewertet als die durch eine Abblendlichtverteilung.

---

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

---

### 7.1 Zusammenfassung

Dunkelheit gepaart mit einer nassen Fahrbahn stellt einen Fahrzeugführer gleich in zweierlei Hinsicht vor eine große Herausforderung. Zum einen sind die Sichtbedingungen bei Nacht sehr stark eingeschränkt, zum anderen verändern sich durch Nässe die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn. Diese verhält sich mit zunehmendem Nässegrad immer mehr spiegelnd, was zu einer erhöhten Vorwärtsreflexion führt. Dadurch wird ein Großteil des von den Scheinwerfern ausgesendeten Lichtes an der Fahrbahn nach vorne reflektiert und somit zu einer potenziellen Gefahr für den Gegenverkehr, der durch diese Reflexionen, die sogenannten Blendkeulen, indirekt geblendet werden kann. Eine Situation, die es tunlichst zu vermeiden gilt.

Ziel dieser Arbeit war die Realisierung eines adaptiven Schlechtwetterlichtes für nasse Fahrbahnen, das ebendiese indirekte Blendung gezielt vermeiden soll. Damit dieses erreicht werden konnte, wurden folgende Aspekte betrachtet:

- **Lichtverteilung** – Basierend auf der Annahme einer gerichteten Reflexion wird die Lichtverteilung so angepasst, dass die Reflexionen, die zu einer potenziellen Blendung des Gegenverkehrs führen würden, nicht mehr auftreten. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme gilt es anhand von Studien zu belegen.
- **Systemanalyse** – Zunächst erfolgt eine Analyse dieses Gesamtsystems. Neben einer Darstellung der angedachten Funktionsweise des Schlechtwetterlichtes werden hier vor allem die Anforderungen an die Einzelkomponenten erarbeitet und festgelegt. Dies bezieht sich zum einen auf die benötigten Umfeldinformationen, die von Sensoren zur Verfügung gestellt werden müssen, zum anderen auf die Anforderungen an einen Scheinwerfer, mit dem diese Lichtfunktion umgesetzt werden kann. Dafür wurde eine Software entwickelt, die mögliche Begegnungssituationen in Abhängigkeit der Fahrzeug- und der Fahrbahngeometrie sowie möglicher Begegnungsabstände analysiert und die jeweils anzupassenden Winkelbereiche der Lichtverteilung ermittelt. Dadurch kann situationsübergreifend bestimmt werden, in welchen Bereichen der Scheinwerfer eine Möglichkeit zur Abdunkelung der Lichtverteilung bieten muss.
- **Umfeldererkennung** – Bei der Umfeldererkennung sind vor allem Informationen über andere Verkehrsteilnehmer, auf die im Rahmen der Beleuchtungsstrategie Rücksicht genommen werden soll, von Bedeutung. Darüber hinaus ist die Kenntnis über die Fahrbahnverhältnisse erforderlich, um Bedingungen, die eine mögliche Blendung begünstigen, zu detektieren und eine Aktivierung der Schlechtwetterlicht-

funktion vornehmen zu können.

- Zur Detektion der Verkehrsteilnehmer werden die Daten eines Kamera- und eines Radarsensors fusioniert. Anhand der durchgeführten Untersuchungen kann der Nutzen der Fusion und deren Genauigkeit aufgezeigt werden.
- Um ein autark arbeitendes System realisieren zu können, bietet der Stand der Technik keine Möglichkeit, eine erhöhte Vorwärtsreflexion während der Fahrt direkt zu bestimmen, woraufhin eine Aktivierung der Schlechtwetterlichtfunktion erst sinnvoll ist. Die Information eines Regensensors allein ist nicht in allen Situationen ausreichend, da eine nasse Fahrbahn auch andere Ursachen haben und der Abtrocknungsvorgang je nach Witterungsbedingungen sehr lange dauern kann. Deswegen wird der Stand der Technik um ein Sensorsystem erweitert, das dynamisch die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn misst. Dieses System besteht aus einem Lichtmodul sowie zwei Sensoreinheiten, die jeweils die Vorwärts- und Rückwärtsreflexion bestimmen. Durchgeführte Messungen belegen, dass dieses Prinzip zielführend ist und eine Detektion der Fahrbahnverhältnisse ermöglicht.
- **Prototyp** – Es wurde ein Gesamtsystem in Form eines Prototyps aufgebaut, das in sich autark arbeitet. Zur Demonstration der Lichtfunktion stand kein Scheinwerfer zur Verfügung, der die definierten Anforderungen erfüllt. Daher wurde ein vorhandenes Scheinwerfersystem modifiziert. Das Gesamtsystem umfasst alle benötigten Sensoren, nimmt die Umfeldmodellierung durch die Fusion der Sensordaten vor, bestimmt anhand der vorliegenden Situation die notwendige Anpassung der Lichtverteilung und steuert anschließend die Scheinwerfer entsprechend an.

Das Ergebnis aller durchgeführten Studien ist eindeutig. Anhand der Untersuchungen von statischen und dynamischen Begegnungssituation kann der Nachweis des Nutzens beziehungsweise der Wirksamkeit der entwickelten Lösung zur Reduzierung der indirekten Blendung auf nassen Fahrbahnen erbracht werden:

- Es kann mittels statischer Untersuchungen gezeigt werden, dass der gewählte Ansatz der Abschattung relevanter Bereiche der Lichtverteilung zielführend ist. Die bei nasser Fahrbahn im Vergleich zu einer trockenen Fahrbahn zu beobachtende Zunahme der Beleuchtungsstärke am Auge eines 50 m entfernten Fahrers um den Faktor 20 kann durch diese Maßnahme wieder deutlich verringert werden. Für alle verwendeten Module liegt die minimale Reduzierung der Messwerte bei knapp 90 %. Mit den Ergebnissen einer durchgeführten Probandenstudie konnte diese messtechnisch nachgewiesene Wirkung auch anhand subjektiver Bewertungen bestätigt werden, was sich in der deutlich reduzierten Blendempfindung von fast fünf Skalenstufen auf einer neunstufigen Skala widerspiegelt. Gleichzeitig wird unter diesen Bedingungen die Anpassung der eigenen Lichtverteilung von den Fahrern selbst nicht wahrgenommen, die jeweiligen Bewertungen der verschiedenen Lichtverteilungen weisen keine signifikanten Unterschiede auf. Verwendet wurde in dieser Studie ein prototypischer Matrix-Scheinwerfer, der im relevanten Winkelbereich eine Auflö-

sung von  $1^\circ$  aufweist.

- Die durch den entwickelten Prototyp möglich gewordenen Untersuchungen dynamischer Begegnungssituationen bestätigen die zuvor in den statischen Situationen gewonnenen Erkenntnisse auch für eine reale Passierfahrt. Dies manifestiert sich sowohl in durchgeführten Messungen der Beleuchtungsstärke als auch in der Bewertung des Schlechtwetterlichtsystems durch Probanden. Somit konnte eine Gesamtfunktionalität realisiert werden, deren Methodik in die Entwicklung zukünftiger Scheinwerfergenerationen einfließen sollte. Eine situative Kopplung mit anderen Lichtfunktionen, zum Beispiel dem blendfreien Fernlicht, ist darüber hinaus denkbar.

Auf dem Markt existiert aktuell kein Scheinwerfer, mit dem die entwickelte Schlechtwetterlichtfunktion direkt umgesetzt werden kann. Während bereits mehrere adaptive Fernlichtfunktionen eingeführt wurden, ist eine adaptive Anpassung der Lichtverteilung bei Schlechtwetterbedingungen im Abblendlichtbereich bis jetzt noch nicht vorgesehen worden. Die rasante Entwicklung in der Scheinwerfertechnologie führt jedoch aus heutiger Sicht schon bald zu einem Stand der Technik, der diese Individualität der Abblendlichtverteilung möglich macht. Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Anforderungen an die Entwicklung eines solchen Scheinwerfers ableiten:

- Erhöhte Beleuchtungsstärkewerte für Begegnungsabstände  $d < 10$  m führen nicht mehr zu einem verstärkten Blendeindruck. Dadurch können die Anforderung an den im Rahmen dieser Arbeit hergeleiteten, anzupassenden Winkelbereich und die Abstandssensorik herabgesetzt werden.
- Die Frage nach der erforderlichen Auflösung bei der Verwendung eines Matrix-Scheinwerfers kann nicht abschließend beantwortet werden. Einen ersten Hinweis gibt die durchgeführte statische Probandenstudie. Die Anpassung der Lichtverteilung konnte von den Probanden nicht wahrgenommen werden. Dies könnte bedeuten, dass die verwendete Auflösung von  $1^\circ$  fein genug ist, sodass durch die Schlechtwetterlichtfunktion kein störender Eindruck für den Fahrer selbst entsteht.
- LED-Scheinwerfer bieten die Möglichkeit der stufenlosen Dimmung. Die Betrachtung mehrerer Dimmstufen hat ergeben, dass die komplette Abschattung eines Bereiches zielführend ist.

## 7.2 Ausblick

Um die in der Arbeit vorgestellte adaptive Schlechtwetterlichtfunktion zur Serienreife zu bringen, sollten folgende Punkte noch genauer untersucht beziehungsweise weiterentwickelt werden:

- **Lage des Leuchtdichtemaximums** – Die Ausführungen in dieser Arbeit basieren auf der Annahme, dass die maximale Leuchtdichte einer Blendkeule im idealen Spiegelwinkel liegt. In der Literatur finden sich diesbezüglich widersprüchliche Angaben. Bei Feldversuchen bereiten vor allem die Unebenheiten einer Fahrbahn Schwierigkeiten, die exakte Position der maximalen Leuchtdichte zu bestimmen. Lokal unterschiedliche Nässegrade und das ungleichmäßige Abtrocknungsverhalten führen zu mehreren lokalen Maxima, sodass die Position des globalen Maximums nicht mehr eindeutig ist. Deswegen gilt es zu prüfen, inwieweit diese Annahme einer gerichteten Reflexion Gültigkeit besitzt. Rosenhahn [Ros99b] beobachtete mit zunehmender Abtrocknungszeit eine Verschiebung des Maximums auf der Verbindungsgeraden in Richtung der Scheinwerfer. Deswegen sollte systematisch untersucht werden, wie sich die Position des Maximums in Abhängigkeit des Nässegrades der Fahrbahn ändert. Dadurch könnte mit zusätzlichen Sicherheitsaufschlägen oder bei Kenntnis des aktuellen Nässegrades, zum Beispiel durch das vorgestellte Sensorsystem zur dynamischen Bestimmung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn, dieser Einfluss berücksichtigt oder sogar kompensiert werden.
- **Einfluss der Abtrocknungsdauer** – Im Falle einer nassen Fahrbahn wurde der durch die statische Blende erzeugte Entblendungsbereich von den Probanden nicht störend wahrgenommen. Dieser Bereich weist eine horizontale Breite von  $3^\circ$  auf und erstreckte sich vertikal beinahe über den gesamten Abblendlichtbereich. Bestätigt sich dieser Eindruck für alle relevanten Feuchtezustände, würde sich die Komplexität des entwickelten Systems reduzieren. In diesem Falle wären keine Abstandsinformationen mehr zu anderen Verkehrsteilnehmern erforderlich, da die vertikalen Winkel nicht mehr berechnet werden müssten. Zur Entblendung eines Fahrzeuges würden die Winkelinformationen über dessen Position und Ausdehnung ausreichen, die von dem Kamerasensor bestimmt werden, eine Fusion könnte ergo entfallen. Da die Winkelinformationen dann allerdings nicht mehr in die Scheinwerfer-KOS transformiert werden können, müssten die daraus resultierenden Ungenauigkeiten im Algorithmus durch einen Funktionsvorhalt in der Lichtsteuerung berücksichtigt werden.
- **Anforderungsanalyse** – Die durchgeführten Berechnungen zur Analyse der Gesamtfunktionalität und Definition der Anforderungen an den idealen Scheinwerfer basieren ebenfalls auf einer gerichteten Reflexion an der Fahrbahnoberfläche. Die Implementierung eines nässegradabhängigen Reflexionsverhaltens sollte hier zu einem verbesserten Ergebnis führen, was allerdings die angesprochene Charakterisierung des Verhaltens voraussetzt. Bisher wurde generell von einer ebenen Fahrbahn ausgegangen, die Berücksichtigung von Topographieunterschieden kann Aufschluss darüber geben, in welche Maße die Anforderungen an den Scheinwerfer hierdurch beeinflusst werden. Bei der Ermittlung der Häufigkeiten der einzelnen Blendwinkelkombinationen wird davon ausgegangen, dass alle Begegnungsabstände in der jeweils betrachteten Situation gleich wahrscheinlich sind. Gerade in Kurvensituationen werden kürzere Abstände womöglich häufiger auftreten. Mit

einer realistischen Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Begegnungsabstände der einzelnen Situationen kann die Berechnung der Häufigkeiten realitätsnäher gestaltet werden. Zuerst gilt es, diese Verteilungen in weiteren Studien zu erfassen. In den dynamischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass erhöhte Beleuchtungsstärken bei einem Abstand zwischen Messgerät und entgegenkommendem Fahrzeug von mindestens 10 m und geringer nicht mehr als störend empfunden werden. Grund hierfür sind vermutlich die recht hohen Einstrahlwinkel, sodass sich der Fahrer bereits stark im peripheren Sehen befindet. Dadurch könnte trotz höherer Beleuchtungsstärke der Blendeindruck geringer ausfallen. In einer Probandenstudie sollte noch einmal genau ermittelt werden, ab welcher Entfernung eine Entblendung notwendig ist. Je größer diese Entfernung ist, desto geringer sind die Anforderungen an Sensorik und Scheinwerfer.

- **Umfeldererkennung** – Die Grundlage zur Realisierung der Schlechtwetterlichtfunktion bildet die entwickelte Umfeldererkennung:
  - Ein wichtiger Bestandteil der Umfeldererkennung ist die Beschreibung anderer Objekte, da die Lichtverteilung unter Berücksichtigung dieser modifiziert wird. In den Versuchen konnte durch die Fusion und Prädiktion der Kamera- und Radardaten ein Mehrwert im Vergleich zu den einzelnen Sensoren aufgezeigt werden. Allerdings weisen die ermittelten Informationen noch ein „unruhiges“ Werteverhalten auf. Daher ist im nächsten Entwicklungsschritt ein Objekttracking zu integrieren, das zu einem glatteren Verlauf führt. Für die Prädiktion der Daten sollte überprüft werden, inwieweit das bisher verwendete CV-Modell ausreichend ist. Sinnvoll könnte auch der Einsatz von Multi-Modell-Schätzfiltern sein, um häufig wechselnde Fahrmanöver abbilden zu können. Die Fusion erfolgt zurzeit auf Objektebene. Um eine verbesserte Objektdiskriminierung zu erreichen, kann der Wechsel der Abstraktionsebene in Betracht gezogen werden. Gerade die Klassifizierung von verschiedenen Fahrzeugarten ist entscheidend, da die Windschutzscheibe bei einem Lkw beispielsweise deutlich höher sitzt als bei einem Pkw. Auch der zu berücksichtigende Abstand zwischen Fahreraugen und detektierbarer Fahrzeugfront unterscheiden sich, sodass minimale und maximale Abstände in Abhängigkeit der Fahrzeugart zu wählen sind. Unter Umständen kann der Radarsensor für eine bessere laterale Auflösung durch einen Lidarsensor substituiert werden, was ebenfalls den Verzicht auf die Fusion mit einer Kamera bedeuten kann. Hier ist jedoch kritisch zu prüfen, ob die Reichweite nicht zu stark durch Witterungseinflüsse begrenzt wird.
  - Den zweiten wichtigen Baustein in der Umfeldererkennung stellt der entwickelte Prototyp zur dynamischen Messung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn dar. In den Versuchen hat sich vor allem die zu geringe Auflösung des ADU als limitierend herausgestellt. Hier ist die Verwendung einer höheren Auflösung, zum Beispiel 12 Bit, empfehlenswert. Zusätzlich ist auch ein regelbarer Verstärkungsfaktor denkbar, um den Messbereich dynamisch an-

zupassen und damit die Auflösung der Sensoren für niedrigere Werte zu erhöhen. Die bisherige Ausführung des Systems ist noch nicht bezüglich des Bau- raumes optimiert. Gerade das Lichtmodul kann durch andere optische Kon- zepte deutlich kompakter ausgeführt werden. Auch die Erhöhung der Licht- ausbeute, zum Beispiel durch den Einsatz eines Reflektors, ist im Kontext der Messung sinnvoll, um den Einfluss des Quantisierungsrauschens zu reduzie- ren. Hierbei muss allerdings darauf geachtet werden, dass der Messbereich dementsprechend nicht zu klein gewählt wird. Das System ist prinzipbedingt vorzugsweise in den Unterboden des Fahrzeuges zu integrieren. Kritisch zu betrachten sind hier vor allem Verschmutzungen und äußere thermische und mechanische Einflüsse. Durch Nick- und Wankbewegungen kann sich weiter- hin die vom System nachgestellte Begegnungssituation verändern. Daher ist eine Berücksichtigung des Fahrzeugniveaus für die Auswertung ratsam. Hier- für sollte überprüft werden, wie groß die Einflüsse einer geänderten Geome- trie sind und ob diese rechnerisch kompensiert werden können. Andernfalls müssten die Daten bei einer abweichenden Solllage verworfen werden. Bis- her wurden lediglich erste Grenzwerte ermittelt, mit denen eine Zuordnung der Messwerte zu diskreten Feuchtezuständen der Fahrbahn möglich ist. Da- rüber hinaus ist eine Verknüpfung der absoluten Werte des Vorwärtsreflexi- onssensors mit einem Blendrisiko für den Gegenverkehr und der absoluten Werte des Rückwärtsreflexionssensors mit dem Adaptationsniveau des Fah- rers sinnvoll. Diese Zusammenhänge gilt es, in weiteren Probandenstudien zu erforschen. Zusätzlich hat sich angedeutet, dass bei trockener Fahrbahn eine Klassifizierung der Deckschicht möglich sein könnte. Die systematische Vermessung verschiedener Fahrbahnbeläge kann hierüber Aufschluss geben. Hilfreich kann dafür die Verwendung mehrerer Sensoren sowohl zur Bestim- mung der Rückwärtsreflexion als auch der Vorwärtsreflexion sein, um das dif- fuse Reflexionsverhalten der Fahrbahn zu ermitteln. Dieses könnte auch einen Rückschluss auf den Abnutzungsgrad der Fahrbahn zulassen, da das Reflexi- onsverhalten mit zunehmender Abnutzung stärker gerichtet ausfällt [Hen02].

- Mittels der beschriebenen Sensorik wurde ein autarkes Gesamtsystem reali- siert. In naher Zukunft wird mit der Einführung der Vernetzung der Fahr- zeuge untereinander und mit der Infrastruktur, übergreifend auch Car2X- Kommunikation genannt, zu rechnen sein. Dadurch könnten einige fahrzeug- interne Sensoren überflüssig oder deren Technologie zumindest vereinfacht werden. Ein vorstellbares Szenario wäre beispielsweise die Ausstattung der Fahrzeuge mit einem Beleuchtungsstärkesensor im Bereich der Windschutz- scheibe. Wird bei entgegenkommendem Verkehr der vorgegebene Grenzwert überschritten, meldet das Fahrzeug dem Gegenverkehr, dass der Fahrer ge- blendet wird. Anhand dieser Information kann das entgegenkommende Fahr- zeug prüfen, ob die Blendung durch Fern- oder Abblendlicht verursacht wird. Im letzteren Falle liegt – korrekt eingestellte Scheinwerfer vorausgesetzt –

höchstwahrscheinlich eine indirekte Blendung vor und eine Aktivierung der Schlechtwetterlichtfunktion sollte vorgenommen werden. Ebenfalls vorstellbar ist die Kommunikation mit stationären Straßenzustandssensoren, die die Fahrbahnverhältnisse melden.

- **Scheinwerfersystem** – Um anhand der Umfeldbeschreibung eine adaptive Lichtfunktion umsetzen zu können, bedarf es noch eines geeigneten Scheinwerfers. Die für die Versuche eingesetzte Lösung stellt ausdrücklich keine mögliche Anwendung für einen Serienscheinwerfer dar. Der Autor postuliert zu diesem Zweck den Einsatz eines Matrix- oder Pixellicht-Scheinwerfers, die aktuell immer stärker in den Markt drängen – auch wenn diese in der ersten Generation fast ausschließlich als Fernlichtmodule ausgeführt sind. Dafür muss in weiteren Untersuchungen ermittelt werden, welche Auflösung für einen solchen Scheinwerfer ausreichend ist. Ebenfalls denkbar ist die Umsetzung über eine oder mehrere dynamische Blenden, mit denen die Position und die Form des abgeschatteten Bereiches verändert werden kann. Bestätigt sich in weiteren Studien, dass vertikal eine Entblendung über den gesamten Abblendlichtbereich ohne störenden Eindruck und ohne Sicherheitsverlust vorgenommen werden kann, reduzieren sich dementsprechend die Anforderungen an die Auflösung eines Matrix-Scheinwerfers beziehungsweise vereinfacht sich die mögliche Umsetzung einer Blendenlösung.
- **Ergänzende Anpassung der Lichtverteilung** – Mit einer Serieneinführung der adaptiven Schlechtwetterlichtfunktion ist aber nicht nur anderen Verkehrsteilnehmern geholfen. Eine zuverlässige Reduzierung der indirekten Blendung ermöglicht darüber hinaus eine individuelle Gestaltung der restlichen Lichtverteilung, sodass der Fahrer selbst viel gezielter und besser unterstützt werden kann. So ließe sich beispielsweise durch eine Anpassung des Gesamtlichtstromes das aufgrund der geringen Rückwärtsreflexion niedrigere Adaptationsniveau wieder anheben und somit die Sichtbedingungen für den Fahrer verbessern. Zusätzlich könnte ein Regenlicht realisiert werden, das je nach Niederschlagsmenge eine möglichst hohe Sichtweite bei möglichst geringer Eigenblendung gewährleistet. Zur besseren Orientierung kann eine verstärkte Ausleuchtung der Markierungen des eigenen Fahrstreifens erfolgen. Durch den technologischen Fortschritt in der Scheinwerferentwicklung sind diese angesprochenen Assistenzfunktionen längst keine Zukunftsmusik mehr. Mögliche ergänzende Lichtfunktionen für Schlechtwettersituationen gilt es daher zu betrachten.

Insgesamt wird mit der Umsetzung dieser Schlechtwetterlichtfunktion ein wertvoller Beitrag zur Verkehrssicherheit geleistet. Vor allem die für den entgegenkommenden Verkehr deutliche Reduzierung des Blendrisikos ist hier hervorzuheben. Mit der Einführung dieser Funktion werden aber auch weiterführende Anpassungen der eigenen Lichtverteilung möglich, die dem Fahrer unter den genannten Schlechtwetterbedingungen eine verbesserte Ausleuchtung bieten können, sodass sowohl für entgegenkommenden Verkehr als auch für den Fahrer selbst deutlich verbesserte Sichtbedingungen erzielt werden.



---

## Literatur

---

- [ADR14] Austerschulte, A., B. Dreier und E.-O. Rosenhahn: „Analyse von Sicherheitsaspekten adaptiver Matrix-Fernlicht Funktionen der nächsten Generation“. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. 2014, S. 261–271.
- [Alo+14] Alonso, J., J. López, I. Pavón, M. Recuero, C. Asensio, G. Arcas und A. Bravo: „On-board wet road surface identification using tyre/road noise and Support Vector Machines“. In: *Applied Acoustics* 76 (2014), S. 407–415.
- [ADC11] Automotive Distance Control Systems GmbH: *Datenblatt ARS 30X /-2/-2C/-2T*. 2011. URL: [http://www.conti-online.com/www/download/industrial\\_sensors\\_de\\_de/themes/download/ars\\_300\\_datenblatt\\_de.pdf](http://www.conti-online.com/www/download/industrial_sensors_de_de/themes/download/ars_300_datenblatt_de.pdf) (besucht am 15.05.2012).
- [Bae96] Baer, R.: *Beleuchtungstechnik: Grundlagen*. 2. , stark bearbeitete Auflage. Verlag Technik Berlin, 1996.
- [Ben+07] Bender, E., M. Darms, M. Schorn, U. Stahlin, R. Isermann, H. Winner und K. Landau: „Antikollisionssystem Proreta – Auf dem Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug. Teil 1: Grundlagen des Systems“. In: *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift* 4 (2007), S. 336–341.
- [BL95] Bar-Shalom, Y. und X.-R. Li: *Multitarget-multisensor tracking: principles and techniques*. 1995.
- [Boe06] Boehlau, C.: *INVENT–Forschungsprojekt Fahrerassistenzsysteme (FAS), Teilprojekt Fahrumgebungserfassung und Interpretation: Straßenzustands- und Sichtweitensensorik. Zuwendungsempfänger HELLA KGaA Hueck & Co., Förderkennzeichen 19S1056H*. Schlussbericht. HELLA KGaA Hueck & Co., 2006.
- [Boe+09] De Boer, J., B. Panhans, A. Reith, A. Otto und F. Wellner: „Überprüfung verschiedener lichttechnischer Kennziffern bezüglich ihrer Eignung zur Erfassung der Helligkeit von Straßendeckschichten und die Entwicklung einer transportablen Einrichtung für die Messung der Helligkeit vor Ort und im Labor“. In: *IBP-Bericht WB 145* (2009).
- [Bor99] Bortz, J.: *Statistik. für Sozialwissenschaftler*. Springer Berlin Heidelberg, 1999.
- [Bre+11] Breuer, K., T. Dieckmann, B. Gerami-Manesch, A. Peuser und D. Sandkühler: *Sensor zur berührungslosen Bestimmung der Fahrbahnbeschaffenheit und dessen Verwendung*. Patent DE102011015527A1. Wabco GmbH. 15. Dez. 2011.
- [Bux+12] Buxbaum, B., B. Hagebecker, R. Lange und T. Ringbeck: „3D Time-of-Flight (ToF)“. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Sys-*

*teme für aktive Sicherheit und Komfort*. Hrsg. von Winner, H., S. Hakuli und G. Wolf. 2., korrigierte Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 187–197.

- [Cas07] Casselgren, J.: *Road surface classification using near infrared spectroscopy*. Lizentiatsarbeit. Luleå University of Technology, 2007.
- [Cha+11] Challa, S., M. R. Morelande, D. Mušicki und R. J. Evans: *Fundamentals of Object Tracking*. 1. Aufl. Cambridge University Press, 2011.
- [Con10] Continental AG: *Technical Description of the Radar System ARS300 - Industrial*. (12V/24V version). Hrsg. von Lüthin, U. und P. Schmok. 2010.
- [Con12] Continental Engineering Services GmbH: *Standardized ARS Interface*. ARS 308-2T. 2012.
- [Cre10] Cree, Inc.: *Cree®XLamp®XP-E LEDs*. Data Sheet: CLD-DS18 Rev 11. 2010. URL: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXPE.pdf> (besucht am 15.05.2013).
- [DAG14] Daimler AG: *Abmessungen des E-Klasse T-Modells*. 2014. URL: [http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc\\_germany\\_website/de/home\\_mpc/passengercars/home/new\\_cars/models/e-class/\\_s212/facts\\_/technicaldata/dimensions.html](http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passengercars/home/new_cars/models/e-class/_s212/facts_/technicaldata/dimensions.html) (besucht am 10.09.2014).
- [Dam95] Damasky, J.: *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug-Scheinwerfer*. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt, 1995.
- [Dar07] Darms, M.: *Eine Basis-Systemarchitektur zur Sensordatenfusion von Umfeldsensoren für Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt, 2007.
- [Dar12] Darms, M.: „Fusion umfelderfassender Sensoren“. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von Winner, H., S. Hakuli und G. Wolf. Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 237–248.
- [DCo12] Delphi Corporation: *Delphi Electronically Scanning Radar*. 2012. URL: <http://delphi.com/shared/pdf/ppd/safesec/esr.pdf> (besucht am 15.05.2012).
- [Dec81] Decker, P. W.: *Road surface ice detector and method for vehicles*. Patent US4274091A. 16. Juni 1981.
- [Die04] Diem, C.: *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2004.
- [DIN11] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung*. DIN EN 12665. 2011.
- [DIN12] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe*. DIN ISO 8855. 2012.

- [DIN85] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Lichtmessung. Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemeßgeräten*. DIN 5032 Teil 7. 1985.
- [DIN91] Deutsches Institut für Normung e.V.: *Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe*. DIN 70000. 1991.
- [DVR08] Deutscher Verkehrssicherheitsrat: *Gefahren im Dunkeln*. 2008. URL: <http://www.dvr.de/presse/informationen/grafiken/843.htm> (besucht am 22.10.2014).
- [DWD13] Deutscher Wetterdienst: *Ausgabe von Klimadaten zum Download (Tageswerte)*. 2013. URL: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=\\_dwdwww\\_klima\\_umwelt\\_klimadaten\\_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation/Oeffentlichkeit/Klima\\_\\_Umwelt/Klimadaten/kldaten\\_\\_kostenfrei/kldat\\_\\_D\\_\\_node.html?\\_\\_nnn=true](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation/Oeffentlichkeit/Klima__Umwelt/Klimadaten/kldaten__kostenfrei/kldat__D__node.html?__nnn=true) (besucht am 10.10.2014).
- [ECE8] Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen: „Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugscheinwerfern mit Halogenleuchtampen (H1, H2, H3, HB3, HB4, H7, H8, H9, HIR1, HIR2 und/oder H11) für asymmetrisches Abblendlicht oder für Fernlicht oder für beides“. In: *Regelung Nr. 8* (2003).
- [ECE48] Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen: „Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen“. In: *Regelung Nr. 48* (2011).
- [ECE98] Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen: „Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer mit Gasentladungs- Lichtquellen“. In: *Regelung Nr. 98* (2010).
- [ECE112] Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen: „Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen und/oder LED-Modulen ausgerüstet sind“. In: *Regelung Nr. 112* (2010).
- [ECE123] Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen: „Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen (AFS) für Kraftfahrzeuge“. In: *Regelung Nr. 123* (2010).
- [Eck93] Eckert, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. 1993.
- [Eff09] Effertz, J.: *Autonome Fahrzeugführung in urbaner Umgebung durch Kombination objekt- und kartenbasierter Umfeldmodelle*. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2009.
- [EKC06] Eastman Kodak Company: *Device Performance Specification KODAK KAC-00400 IMAGE SENSOR*. Revision 0.3.6. 2006.

- [ELE11] ELESYS North America Inc.: *Radar Technology. 76Ghz Millimeter Wave Radar*. 2011. URL: <http://www.elesys-na.com/radar-technology#2> (besucht am 15.05.2012).
- [Elf90] Elfes, A.: „Occupancy Grids: A Stochastic Spatial Representation for Active Robot Perception“. In: *Proceedings of the Sixth Conference Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. Elsevier Science, 1990, S. 136–146.
- [Eul+89] Euler, G., R. C. M. Schröder, J. Lang, R. Plhak und G. Retzlaff: „Ermittlung der zeitlichen Feuchte- und Nässeverteilung auf Fahrbahnen“. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* 567 (1989).
- [EZ84] Euler, G. und F. Zior: *Filmströmungen über rauhe, ebene, undurchlässige, schwach geneigte Oberflächen*. Schlußbericht. Forschungsbericht. DFG Forschungsvorhaben Eu 22/3-3, 1984.
- [Fal04] Falke, P.: *Fahrbahn-nässe-Sensor für Kraftfahrzeuge*. Patent DE10307896A1. 2. Sep. 2004.
- [FGSV07] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen: RASt 06*. Regelwerk. Arbeitsgruppe Straßenentwurf, 2007.
- [FGSV12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen: RAL*. Regelwerk. Arbeitsgruppe Straßenentwurf, 2012.
- [Fis14] Fischer, J.: „Adaptive Schlechtwetterlichtverteilung zur Reduzierung der indirekten Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer auf nassen Fahrbahnen“. In: *LICHT 2014. Tagungsband*. Hrsg. von Nederlandse Stichting Voor Verlichtingskunde (NSW). 2014, S. 314–321.
- [FK14] Fischer, J. und D. S. Kordt: „Dynamische Mesung der Reflexionseigenschaften einer Fahrbahn zur Realisierung adaptiver Lichtfunktionen. VDI-Berichte 2221“. In: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Hrsg. von VDI Wissensforum GmbH. 2014, S. 195–205.
- [FS88] Fujimura, K. und T. Sakamoto: „Road Surface Sensor“. In: *FUJITSU TEN Technical Journal* (1988).
- [Gai+08] Gail, J., M. Pöppel-Decker, M. Lorig, A. Eggers, M. Lerner und U. Ellmers: *Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Fahrzeugtechnik Heft F 70. 2008.
- [Gal04] Gall, D.: *Grundlagen der Lichttechnik*. 2. Aufl. Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG, 2004.
- [GDV11] Hummel, M., M. Kühn, J. Bende und A. Lang: *Fahrerassistenzsysteme. Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadensgeschehens der Deutschen Versi-*

*cherer. Fahrzeugsicherheit*. Forschungsbericht FS 03. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., 2011.

- [Ged12] Geduld, G.: „Lidarsensorik“. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Hrsg. von Winner, H., S. Hakuli und G. Wolf. 2., korrigierte Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 172–185.
- [Goe58] Goertzel, G.: „An algorithm for the evaluation of finite trigonometric series“. In: *American mathematical monthly* (1958), S. 34–35.
- [Goo14] Google: *Google Maps*. 2014. URL: <https://goo.gl/maps/fL5Te> (besucht am 17.04.2014).
- [Gri04] Griffin, B.: *GPS in der Automotive Messtechnik. Zentimetergenaue Positionsbestimmung*. 2004. URL: [http://www.genesys-adma.de/download/DGPSArtikelGeneSys\\_3404.pdf](http://www.genesys-adma.de/download/DGPSArtikelGeneSys_3404.pdf).
- [Gri99] Griesinger, M.: *Verfahren zur Bestimmung des Zustandes einer Fahrbahnoberfläche*. Patent DE19736138A1. Daimler Chrysler AG. 8. Apr. 1999.
- [HC96] Hilz, R. und C. Cavonius: „Psychophysik des Sehens im Alter“. In: *Seh- und Höreinbußen älterer Menschen*. Hrsg. von Tesch-Römer, C. und H.-W. Wahl. Steinkopff, 1996, S. 77–88.
- [HCK96] Huth-Fehre, T., K. Cammann und T. Kantimm: *Verfahren zum Feststellen des Oberflächenzustandes, insbesondere von Verkehrswegen, und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens*. Patent WO1996026430A1. Institut für Chemo- und Biosensorik Münster e.V. 29. Aug. 1996.
- [HE93] Holzwarth, F. und U. Eichhorn: *Verfahren und Vorrichtung zur berührungslosen Erfassung der Dicke einer Wasserschicht auf einer Fahrbahn*. Patent DE4133359A1. Porsche AG. 15. Apr. 1993.
- [HEL12] HELLA KGaA Hueck & Co.: *Fahrzeugvermessung auf dem Firmenparkplatz. Interne Studie*. 2012.
- [Hen02] Hentschel, H.-J.: *Licht und Beleuchtung: Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik*. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Bd. 5. Hüthig, 2002.
- [Her04] Herold, M.: *Understanding spectral characteristics of asphalt roads*. Forschungsbericht. University of California Santa Barbara, 2004.
- [HHS13] Hoffmann, I., H. Hesse und C. Schmidt: „First approach to reach the goal of a fully adaptive headlamp“. In: *10th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von Khanh, T. Q. Darmstädter Lichttechnik. 2013.
- [HM06] Hering, E. und R. Martin: *Photonik. Grundlagen, Technologie und Anwendung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

- [Hof03] von Hoffmann, A.: *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 2003.
- [Hof04] Hofmann, U.: *Zur visuellen Umfeldwahrnehmung autonomer Fahrzeuge*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, 2004.
- [Hol04] von Holt, V.: *Integrale Multisensorielle Fahrumgebungserfassung nach dem 4D-Ansatz*. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, 2004.
- [Hon12] Honsel, H.: *Entwicklung eines Fußgängererkennungssystems für das Markierende Licht auf Basis einer Fusion von Nah- und Ferninfrarotkameras*. Dissertation. Universität Hannover, 2012.
- [Huh99] Huhn, W.: *Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 1999.
- [Hüt13] Hütter, A.: *Verkehr auf einen Blick*. Techn. Ber. Statistisches Bundesamt, 2013.
- [IAS10] Ibeo Automotive Systems GmbH: *Datenblatt ibeo Lux*. 2010. URL: <http://www.ibeo-as.com/images/stories/pdf/neu/salesblatt%20lux.pdf> (besucht am 15.05.2012).
- [Imt+11] Imteaz, M. A., G. Al-Hassan, A. Shanableh und J. Naser: „Development of a mathematical model for the quantification of fog-collection“. In: *Resources, Conservation and Recycling* 57 (2011), S. 10–14.
- [Jeb+08] Jebas, C., S. Schellinger, K. Klinger, K. Manz und D. Kooß: *Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Forschungsbericht Fahrzeugtechnik Heft F 66. Universität Karlsruhe (TH) – Lichttechnisches Institut, 2008.
- [Jor06] Jordan, R.: *Objekthypothesen für Sicherheitsfunktionen auf Basis eines Radar-Sensors*. Dissertation. Universität Fridericiana Karlsruhe, 2006.
- [Kal01] Kalze, J.: „Situation Adapted Light Distributions for AFS-Headlamps“. In: *Progress in Automobile Lighting. Proceedings of the Symposium*. Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Bd. 9. Darmstädter Lichttechnik. 2001.
- [KB81] Krebs, H. und G. Böllinger: *Beurteilung und Erfassung von Nässezuständen auf Fahrbahnen*. Schlußbericht FA 4075 G 79 G. Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe, 1981.
- [Kla99] Klaus, F.: *Einführung in Techniken und Methoden der Multisensor-Datenfusion*. Habilitation. Universität Siegen, 1999.
- [Kle13] Kleinert, B.: „Blendungsbewertung von Kfz-Scheinwerfern – Was wird messtechnisch erfasst und was nicht“. In: *Lux junior 2013. Tagungsband*. 11. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs. Hrsg. von Technische Universität Ilmenau und Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LiTG). Bd. 11. 2013.

- [Kos10] Koskinen, S.: *Sensor Data Fusion Based Estimation of Tyre-Road Friction to Enhance Collision Avoidance*. Dissertation. Tampere University of Technology, 2010.
- [KP09] Koskinen, S. und P. Peussa: *FRICTI@N. FP6 - IST - 2004 - 4 - 027006*. Forschungsbericht. Information Society Technologies, 2009.
- [Kuh06] Kuhl, P.: *Statistische Kurvenverteilung für Landstraßen*. Unveröffentlichte Studie. 2006.
- [Lau08] Laurent, M.: „Characterization of road surfaces using a mobile gonio-reflector“. In: *International symposium on road surface photometric characteristics. measurements systems and results*. Hrsg. von (CIE), C. I. de l'Éclairage. 2008.
- [Liu09] Liu, F.: *Objektverfolgung durch Fusion von Radar- und Monokameradaten auf Merkmalsebene für zukünftige Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, 2009.
- [Lun08] Lunze, J.: *Regelungstechnik 2. Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung*. 5. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [Mea83] Meade, M. L.: *Lock-in amplifiers: principles and applications*. Bd. 1. 1983.
- [MEC12] Mitsubishi Electric Corporation: *Millimeter-wave Radar*. 2012. URL: [http://www.mitsubishielectric.com/bu/automotive/products/safety\\_and\\_security2/safe04.html](http://www.mitsubishielectric.com/bu/automotive/products/safety_and_security2/safe04.html) (besucht am 15.05.2012).
- [MN14] Michenfelder, S. und C. Neumann: „Propix: Aktueller Entwicklungsstand und praktische Erprobung mittels Probandenstudien“. In: *Licht 2014. Tagungsband*. Hrsg. von Nederlandse Stichting Voor Verlichtingskunde (NSW). 2014, S. 667–672.
- [MT08a] Matsuzaki, R. und A. Todoroki: „Intelligent tires for improved tire safety using wireless strain measurement“. In: *The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. International Society for Optics und Photonics. 2008.
- [MT08b] Matsuzaki, R. und A. Todoroki: „Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires“. In: *Sensors* 8 (2008), S. 8123–8138.
- [MTP10] Mesin, L., A. Troiano und E. Pasero: „In Field Application of an Innovative Sensor for Monitoring Road and Runway Surfaces“. In: *Proceedings of the 2010 First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications*. 2010, S. 157–161.
- [NTV13] n-tv Nachrichtenfernsehen: *Es werde Licht auf den Straßen: 100 Jahre Autoscheinwerfer. Bilderserie*. 2013. URL: <http://www.n-tv.de/mediathek/bilderserien/auto/100-Jahre-Autoscheinwerfer-article10498496.html> (besucht am 13.07.2013).
- [OSR07] OSRAM Opto Semiconductors: *Silizium Photodiode für den sichtbaren Spektralbereich. Version 1.0*. BPW 21. 2007. URL: <http://www.osram-os.com/Graphics/>

XPic3/00101632\_0.pdf/BPW%2021,%20Lead%20(Pb)%20Free%20Product%20-%20RoHS%20Compliant.pdf (besucht am 04.06.2013).

- [Pra10] Prat, Á.: *Sensordatenfusion und Bildverarbeitung zur Objekt- und Gefahrenerkennung*. Dissertation. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2010.
- [Rei10] Reif, K.: *Sensoren im Kraftfahrzeug*. 1. Aufl. Bosch Fachinformation Automobil. Vieweg+ Teubner, 2010.
- [Rei12] Reif, K.: *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. 4. Aufl. Vieweg+ Teubner, 2012.
- [RL07] Ruser, H. und F. León: „Informationsfusion – Eine Übersicht“. In: *tm Technisches Messen* 74.3/2007 (2007), S. 93–102.
- [Ros99a] Rosenhahn, E.-O.: „Headlamp Components for Adaptive Frontlighting – Usability of a Lighting Function for Adverse Weather Conditions“. In: *Progress in Automobile Lighting. Proceedings of the Symposium*. Hrsg. von Schmidt-Clausen, H.-J. Bd. 5. Darmstädter Lichttechnik. 1999, S. 677–688.
- [Ros99b] Rosenhahn, E.-O.: *Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 1999.
- [Ros+13] Roslak, J., C. Wilks, U. Venker und H. Hesse: „Statistics-based approaches for designing of LED array headlight systems“. In: *10th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von Khanh, T. Q. Darmstädter Lichttechnik. 2013, S. 348–359.
- [RS11] Renner, A. und B.-H. Schäfer: *Wasserdetektor*. Patent DE102010020537A1. H&S Robotic Solutions GbR. 17. Nov. 2011.
- [RZB93] Roeder, A., H. von Zuelow und R. Bodier: *Sensorsystem an Kraftfahrzeugen zur Erkennung von Nässe auf der Fahrbahn*. Patent DE4235809C1. Deutsche Aerospace AG. 9. Dez. 1993.
- [SBW99] Steinberg, A., C. Bowman und F. White: „Revisions to the JDL data fusion model“. In: *Proceedings of SPIE* 3719.1 (1999), S. 430–441.
- [Sch07] Schreuder, D.: „InSitu Messung der Reflexionseigenschaften von Straßenbelägen“. In: *Jahrbuch Straßen- und Außenbeleuchtung 2008*. Vwew Energieverlag GmbH, 2007.
- [Sch11] Schmidt, C.: „Fully Adaptive Headlamp, the next step in intelligent lighting functionality“. In: *9th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von Khanh, T. Q. Bd. 14. Darmstädter Lichttechnik. 2011.
- [Sch12] Schweiger, R.: *Echtzeitfähiges Fusionssystem zur Fußgängererkennung bei Nacht*. Dissertation. Universität Ulm, 2012.



- [Sch14a] Schmok, P.: *Bestimmung der Relativgeschwindigkeit eines Objektes*. Persönliches Gespräch. A.D.C. GmbH, 16. Sep. 2014.
- [Sch14b] Schmok, P.: *Throughput time des ARS 302*. Persönliches Gespräch. A.D.C. GmbH, 9. Apr. 2014.
- [SDW92] Schmidt-Clausen, H.-J., J. Damasky und H. Wambsganß: „Foreground Illumination – Comfort aspects and glare on wet roads“. In: *Vedilis Project No. 5. Eureka Project No. 273*. 1992.
- [SF04] Schmidt-Clausen, H.-J. und A. Freiding: *Sehvermögen von Kraftfahrern und Lichtbedingungen im nächtlichen Straßenverkehr. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Forschungsbericht Mensch und Sicherheit Heft m158. Technische Universität Darmstadt – Fachgebiet Lichttechnik, 2004.
- [SH82] Sonntag, D. und D. Heinze: *Sättigungsdampfdruck- und Sättigungsdampfdichtetafeln für Wasser und Eis*. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, 1982.
- [Spe09] Speth, J.: *Videobasierte modellgestützte Objekterkennung für Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation. Technischen Universität München, 2009.
- [SS01] Schmidt-Clausen, H.-J. und L. Schwenkschuster: *Einfluß der Helligkeit und des Reflexionsverhaltens von nassen Fahrbahnoberflächen auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei Nacht*. Forschungsbericht 812. Technische Universität Darmstadt, 2001.
- [Sti05] Stiller, C.: „Fahrerassistenzsysteme – Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr“. In: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Hrsg. von Maurer, M. und C. Stiller. 1. Aufl. Springer Verlag, 2005.
- [Stü04] Stüker, D.: *Heterogene Sensordatenfusion zur robusten Objektverfolgung im automobilen Straßenverkehr*. Dissertation. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2004.
- [SW14] Schmidt, C. und C. Wilks: „High Definition Concepts for Next Generation ADB Module“. In: *Vision 2014*. 2014.
- [TC10] TC-4-45: *Performance Assessment Method for Vehicle Headlighting Systems*. Technischer Bericht 188. CIE, 2010.
- [TI07] Texas Instruments: *OPA380. Precision, High-Speed Transimpedance Amplifier*. 2007. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa380.pdf> (besucht am 05.06.2013).
- [TRW11] TRW Automotive: *Tech Sheet Radar Technologies*. 2011. URL: [http://www.trw.com/sites/default/files/11%20tech%20sheet%20Radar%20Technologies\\_ENG\\_0.pdf](http://www.trw.com/sites/default/files/11%20tech%20sheet%20Radar%20Technologies_ENG_0.pdf) (besucht am 15.05.2012).
- [VdT08] Verband der Technischen Überwachungs-Vereine: *Merkblatt Kraftfahrwesen 751*. 2008.

- [Wei11] Weiss, T.-T.: *Hochgenaue Positionierung und Kartographie mit Laserscannern für Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation. Universität Ulm, 2011.
- [Wei14] Wein, T.: *Zunehmende Ungenauigkeit des Kamerasensors mit abnehmendem Begegnungsabstand*. Persönliches Gespräch. HELLA Aglaia Mobile Vision GmbH, 9. Sep. 2014.
- [Wen08] Wender, S.: *Multisensorsystem zur erweiterten Fahrzeugumfelderfassung*. Dissertation. Universität Ulm, 2008.
- [Win07] Winner, H.: „Mit aktiven Sensoren das Kfz-Umfeld erfassen – Funktion und Leistungsfähigkeit von Radar & Co“. In: *it – Information Technology* 49.1 (2007).
- [Win12] Winner, H.: „Radarsensorik“. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Hrsg. von Winner, H., S. Hakuli und G. Wolf. 2., korrigierte Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 123–171.
- [WR06] Wallentowitz, H. und K. Reif: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 1. Aufl. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006.
- [ZHK13] Zydek, B., N. Haferkemper und T. Q. Khanh: „Klettwitz Levelling Test: Analysis of Photometric Data and Comprehension“. In: *10th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von Khanh, T. Q. Darmstädter Lichttechnik. 2013.
- [Zio87] Zior, F.: *Regenwasserabfluss auf Fahrbahnoberflächen – experimentelle und theoretische Untersuchungen*. Technischer Bericht 38. Institut für Wasserbau, Technische Hochschule Darmstadt, 1987.
- [Zyd+14] Zydek, B., C. Schiller, D. Polin und T. Q. Khanh: „Bewertung von Scheinwerfern mit blendfreiem Fernlicht“. In: *ATZ–Automobiltechnische Zeitschrift* 116.6 (2014), S. 64–69.

---

## Betreute studentische Arbeiten

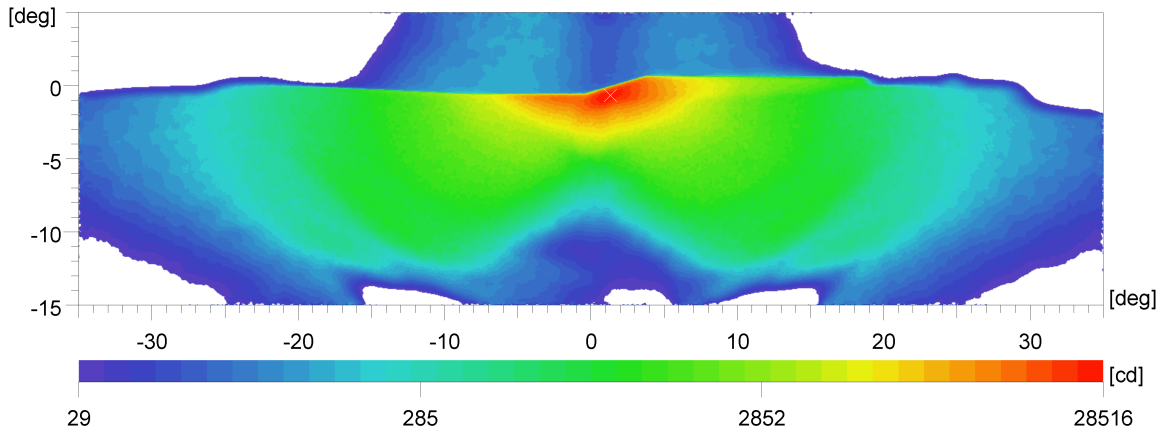
---

- [Bey13a] Beyer, C.: *Kamerabasierte Detektion witterungsbedingter Fahrbahneigenschaften*. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, 2013.
- [Bey13b] Beyer, C.: *Simulation und Vermessung von Scheinwerferreflexionen auf nasser Fahrbahn bei Nacht*. Praktikumsbericht. Karlsruher Institut für Technologie, 2013.
- [Ehl14] Ehlert, K.: *Fusion von Kamera- und Radardaten zur präzisen Entblendung anderer Verkehrsteilnehmer*. Praktikumsbericht. Hochschule Hamm-Lippstadt, 2014.
- [Gad13] Gadau, F.: *Aufbau einer Sensorbox zur Erfassung von Witterungsdaten*. Praktikumsbericht. Arizona State University, 2013.
- [Klu14] Klump, H.: *Untersuchung der Gesamtperformance des fusionierten Kamera-Radar-Systems*. Praktikumsbericht. Universität Paderborn, 2014.
- [Kor13] Kordt, D. S.: *Entwicklung eines Sensorsystems zur Detektion von Reflexionseigenschaften einer Fahrbahnoberfläche unter Berücksichtigung von kraftfahrzeugspezifischen Anforderungen*. Masterarbeit. Universität Duisburg-Essen, 2013.
- [Sch13] Schneider, S.: *Fusion von Kamera- und Radardaten auf Objektebene zur präzisen Entblendung von anderen Verkehrsteilnehmern*. Bachelorarbeit. Westfälische Hochschule, 2013.

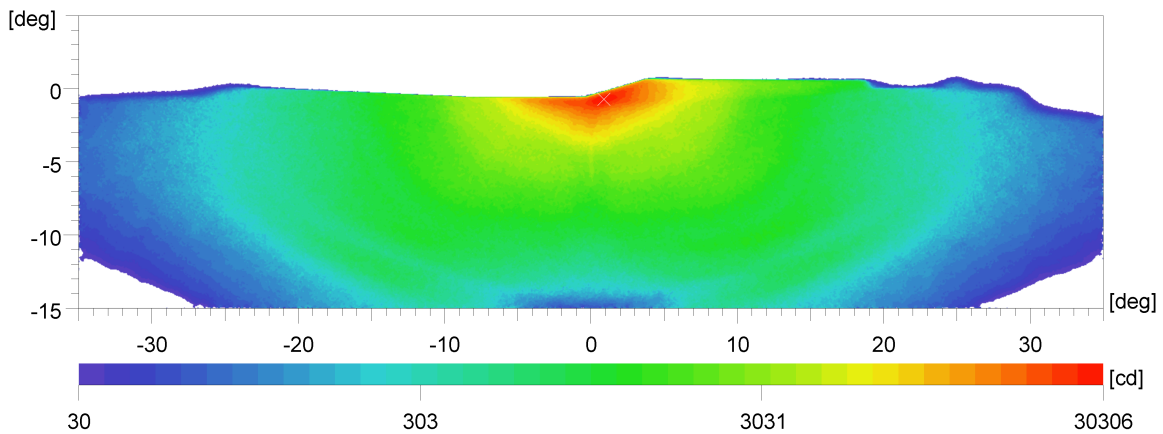
---

# A Lichtstärkeverteilungen

---

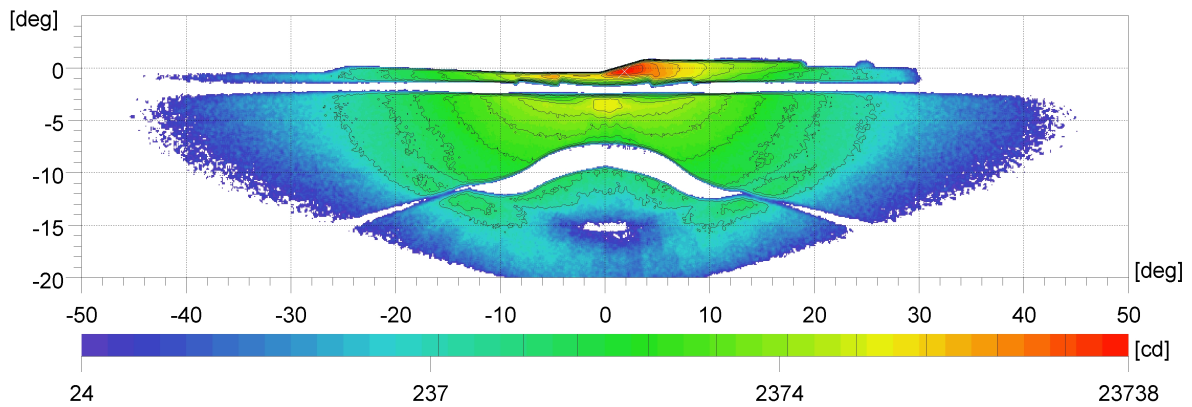


(a) HKM mit OS-Fenster



(b) HKM ohne OS-Fenster

**Abbildung A.1:** Einfluss des OS-Fensters am Beispiel eines Halogen-Moduls



**Abbildung A.2:** Lichtstärkeverteilung des HKM mit zusätzlich eingebrachter Blende

---

## B Kennlinien

---

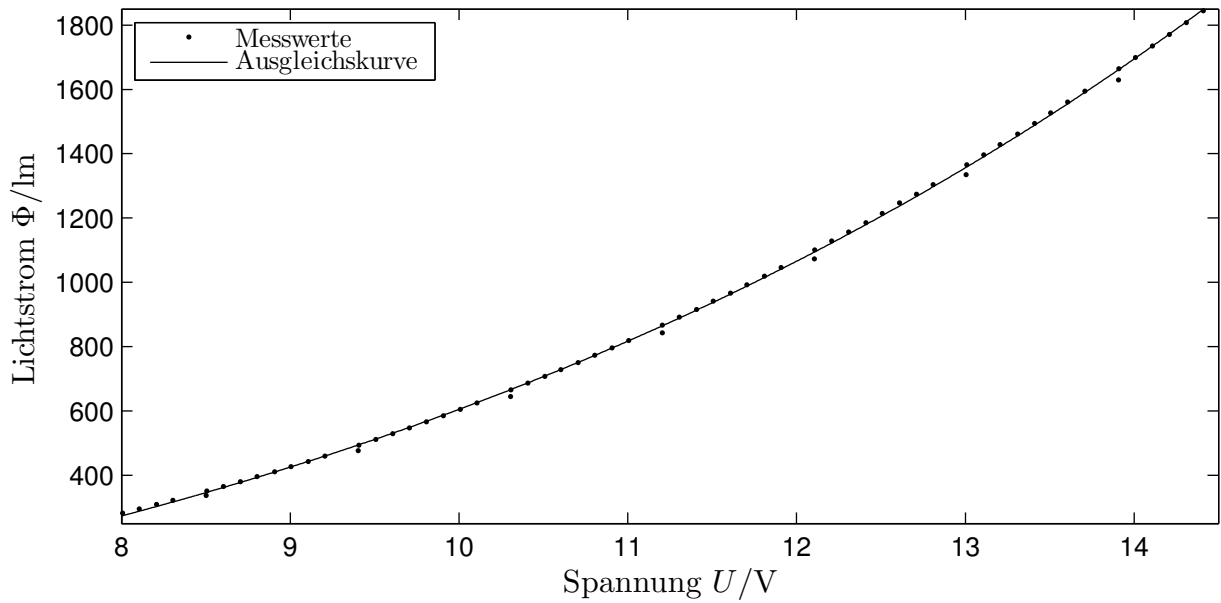


Abbildung B.1: Kennlinie einer H7-Glühlampe 58520 der Fa. *General Electric*

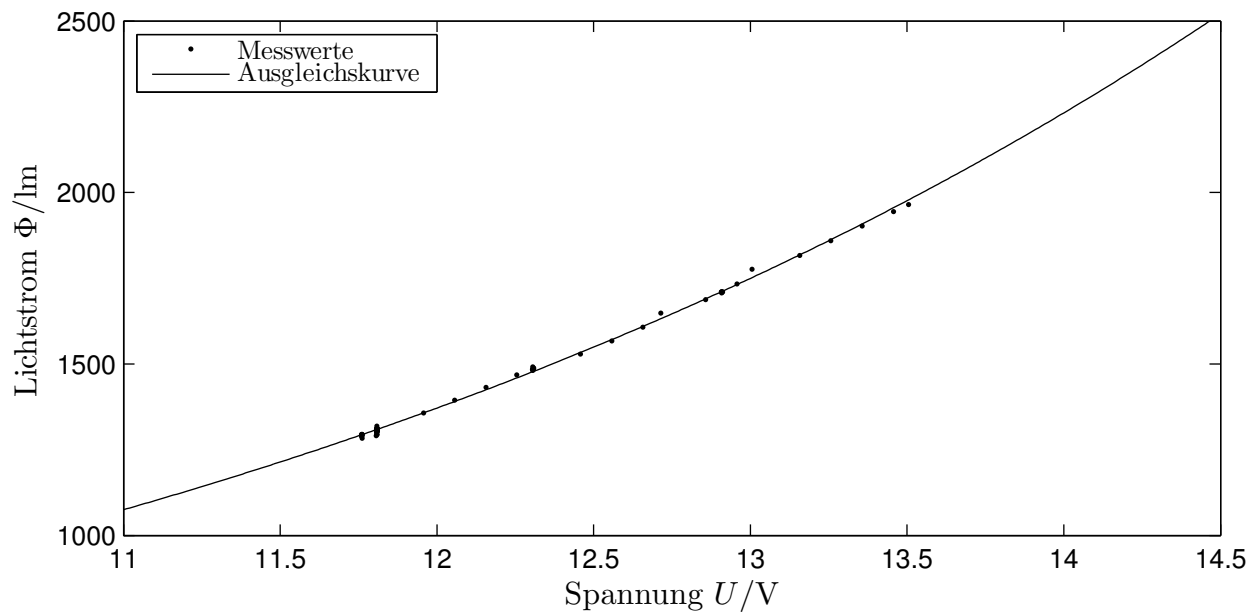


Abbildung B.2: Kennlinie einer HB3-Glühlampe des Typs 9005 der Fa. *Osram Sylvania Inc.*

---

## C Matrix-Modul

---

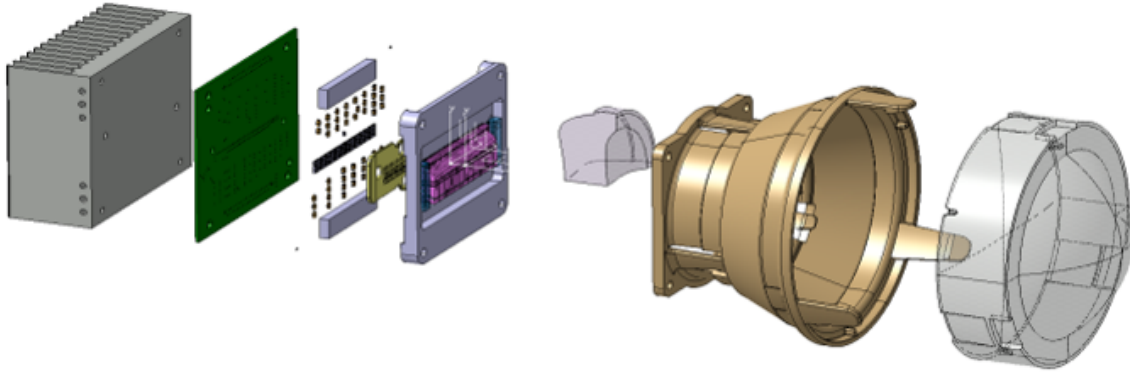


Abbildung C.1: Aufbau des Matrix-Moduls [SW14]

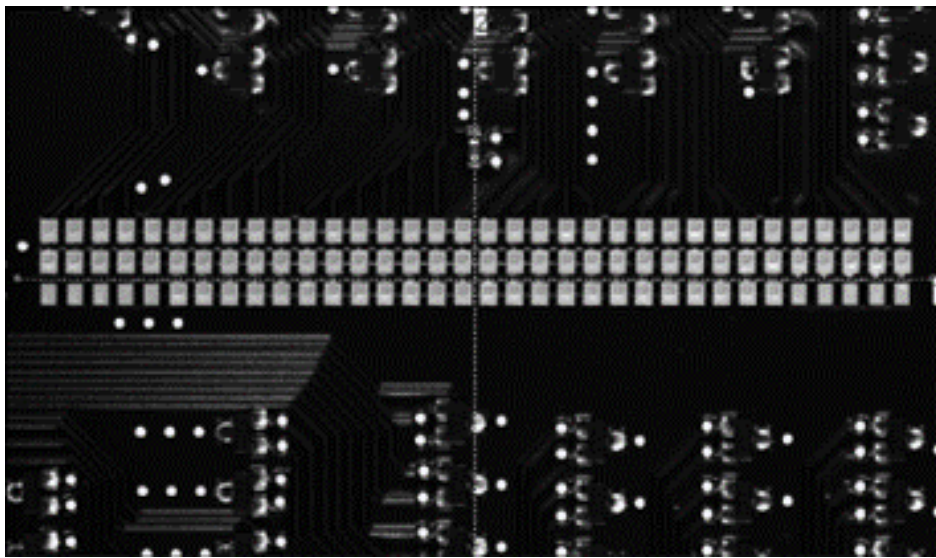
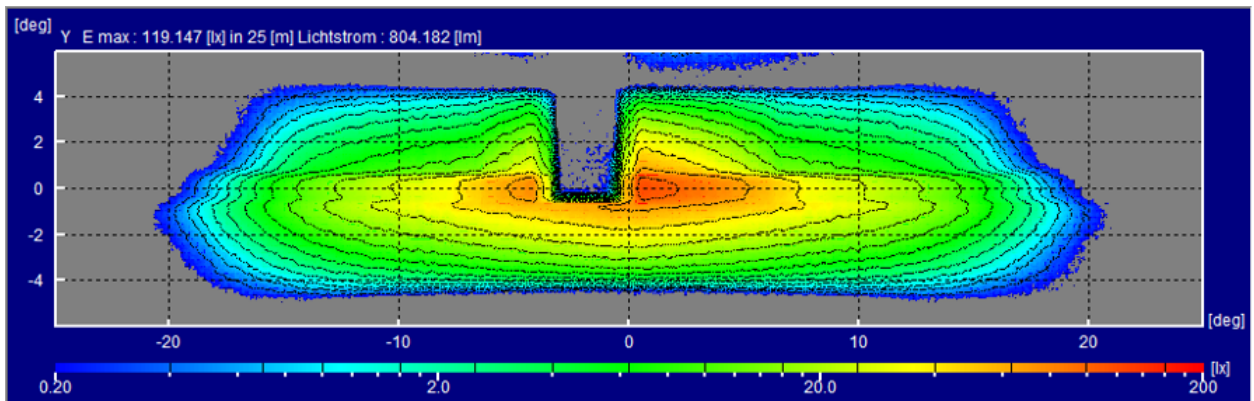
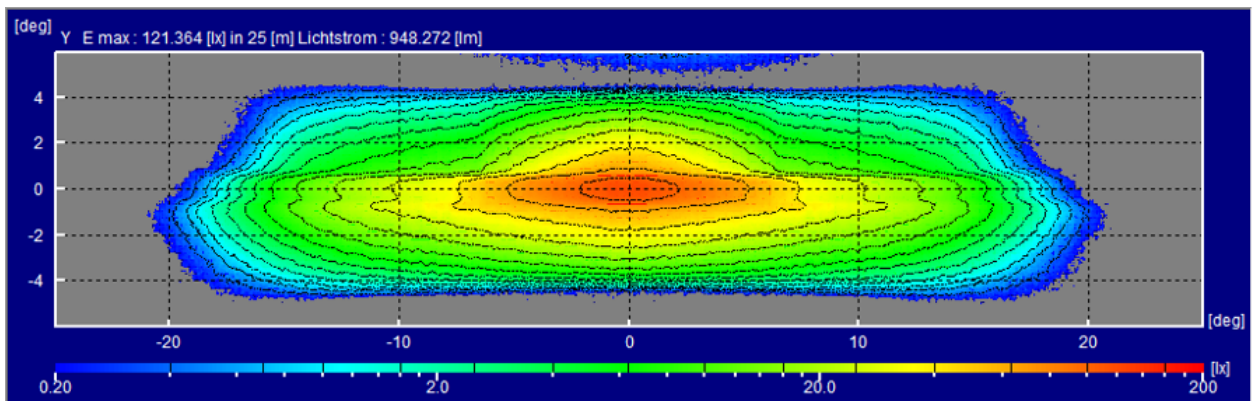
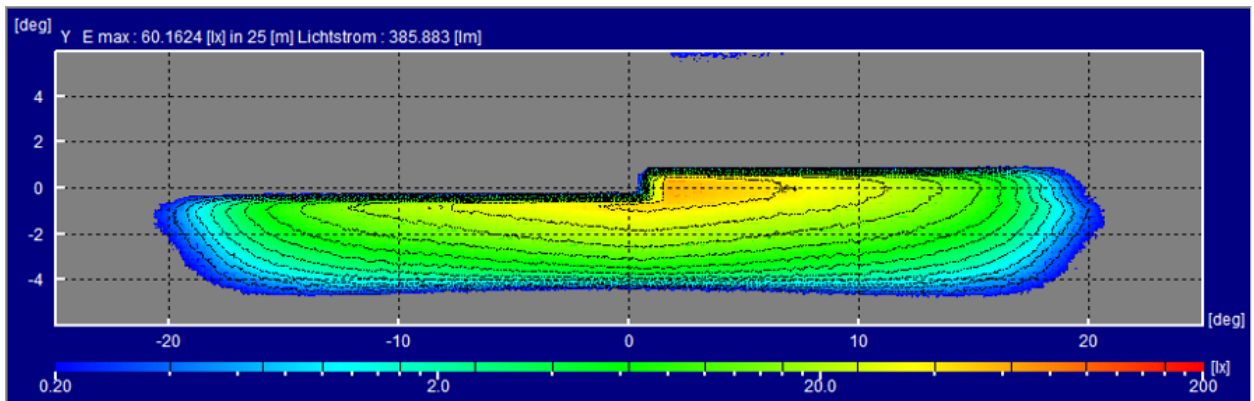


Abbildung C.2: Bestückte Leiterplatte des Matrix-Moduls [SW14]



---

## D Ergänzungen zu Berechnungen und Messungen

---

### D.1 Quantifizierung der Wirksamkeit

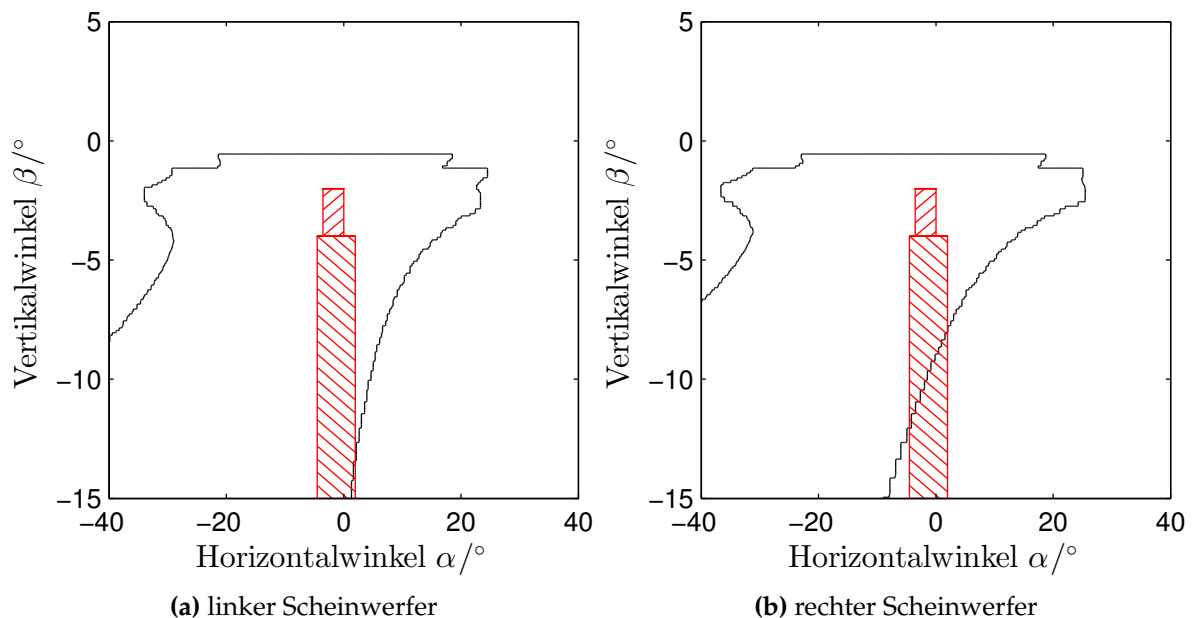
Ausführung	Beleuchtungsstärke [mlx]		Ausführung	Beleuchtungsstärke [mlx]	
	trocken	nass		trocken	nass
ohne Blende	263	2175	ohne Blende	368	2675
mit Blende	193	205	mit Blende	265	290

(a) HB3-Module bei  $U = 12\text{ V}$

(b) HB3-Module bei  $U = 14,5\text{ V}$

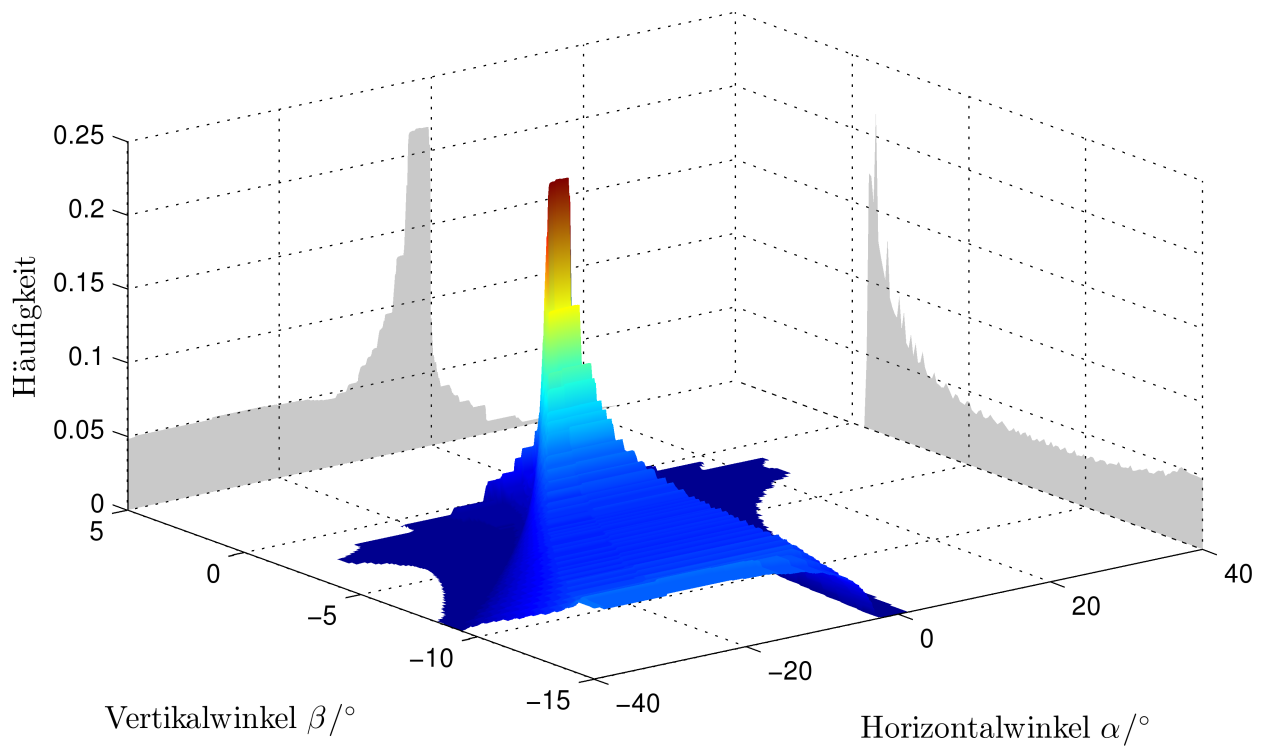
**Tabelle D.1:** Ergebnisse der Beleuchtungsstärkemessung für die HB3-Modulvarianten auf einer trockenen und einer nassen Fahrbahn

### D.2 Analyse des relevanten Winkelbereiches

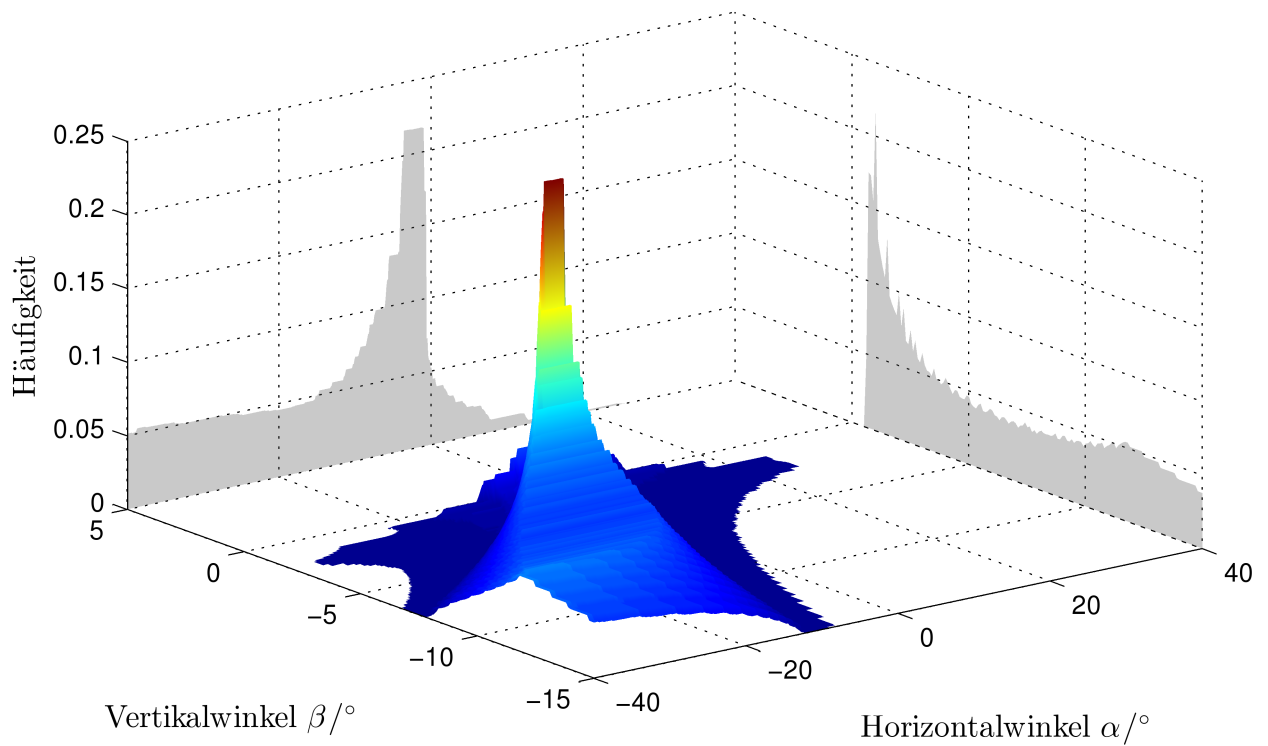


**Abbildung D.1:** Relevanter Winkelbereich, in dem sich die Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfers verändern lassen muss. Rot schraffiert sind die Segmente der Schlechtwetterlichtverteilung aus der ECE R123





(a) linker Scheinwerfer



(b) rechter Scheinwerfer

**Abbildung D.2:** Häufigkeiten der relevanten Winkel, die in der Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfers abgeschattet werden müssen

### D.3 Detektion der Straßenverhältnisse

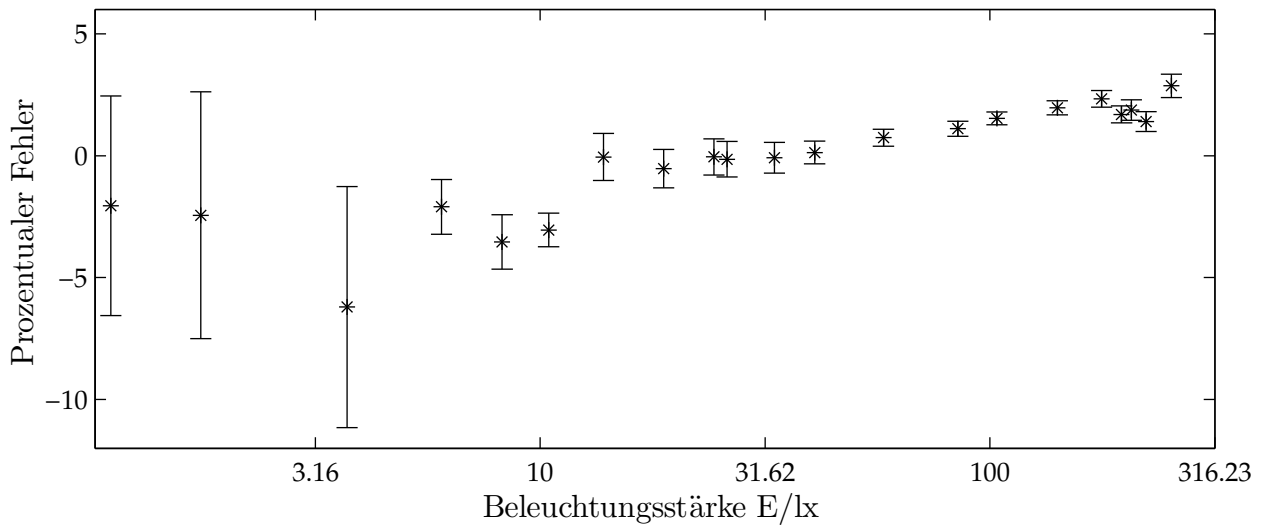


Abbildung D.3: Prozentualer Fehler des Vorwärtsreflexionssensors im Vergleich zum Referenzsystem

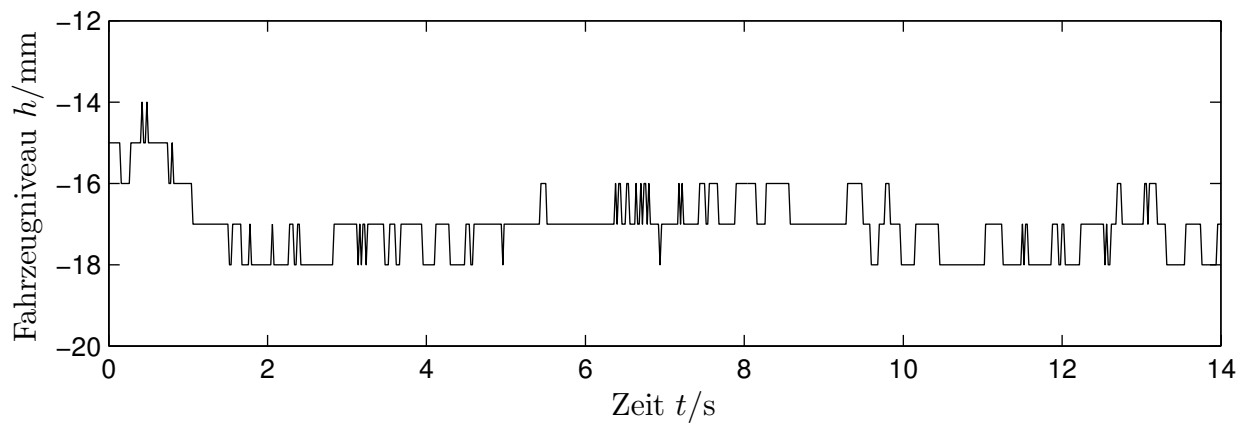
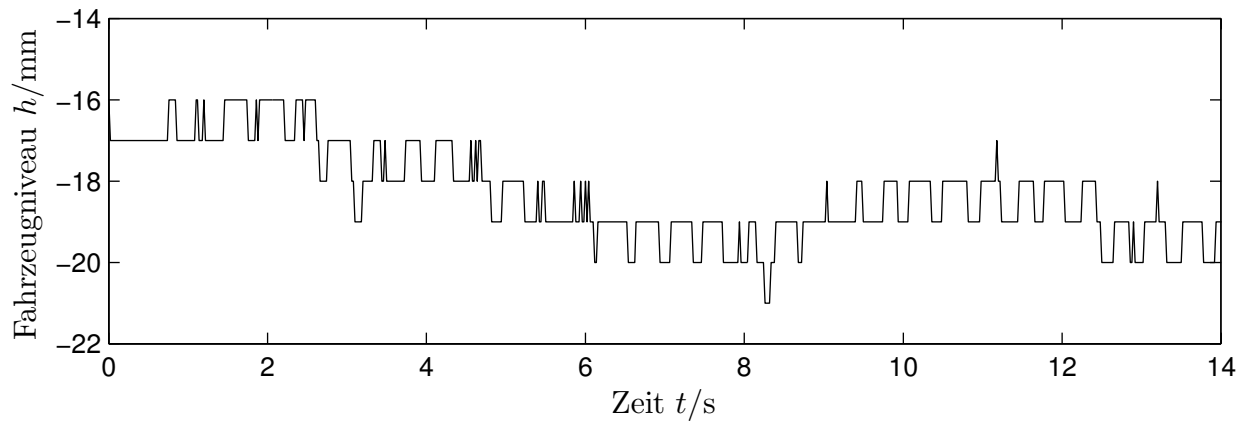
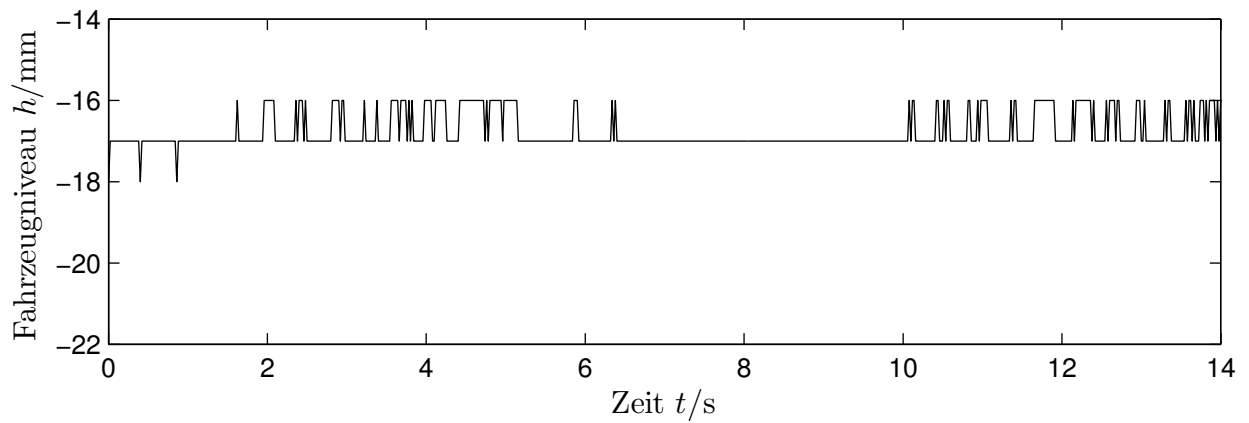
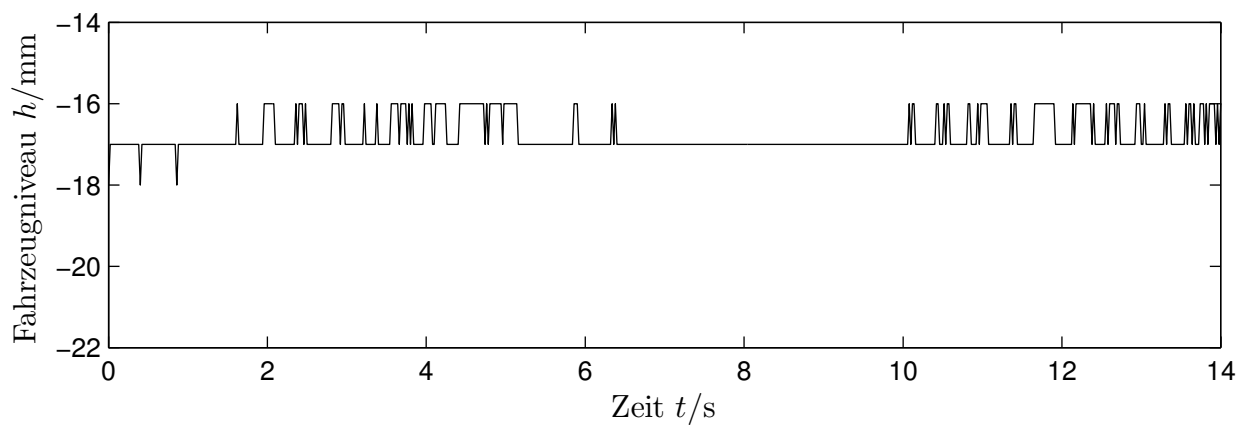


Abbildung D.4: Fahrzeugniveau bei der Fahrt über die Regenstrecke

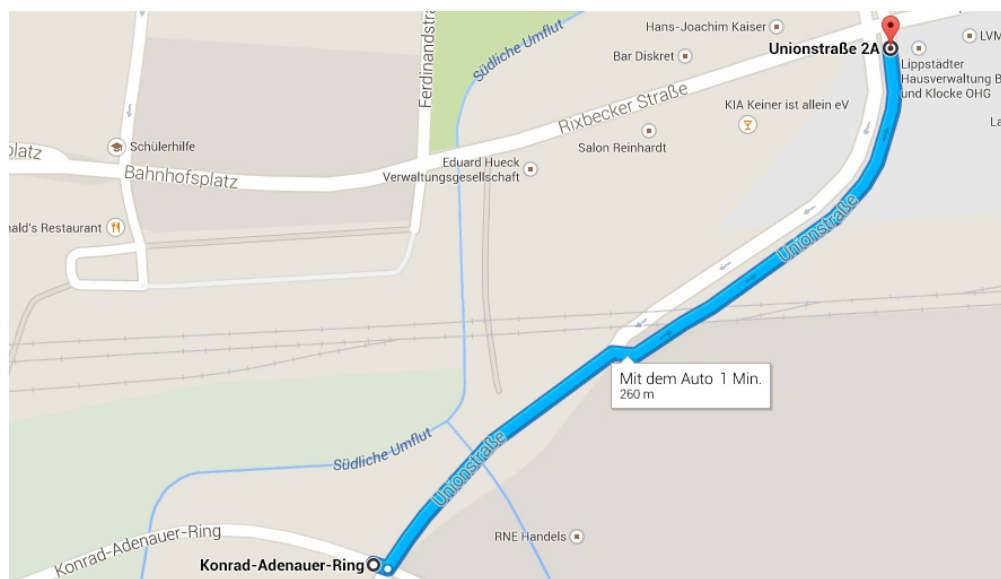


(c) Niveau hinten links

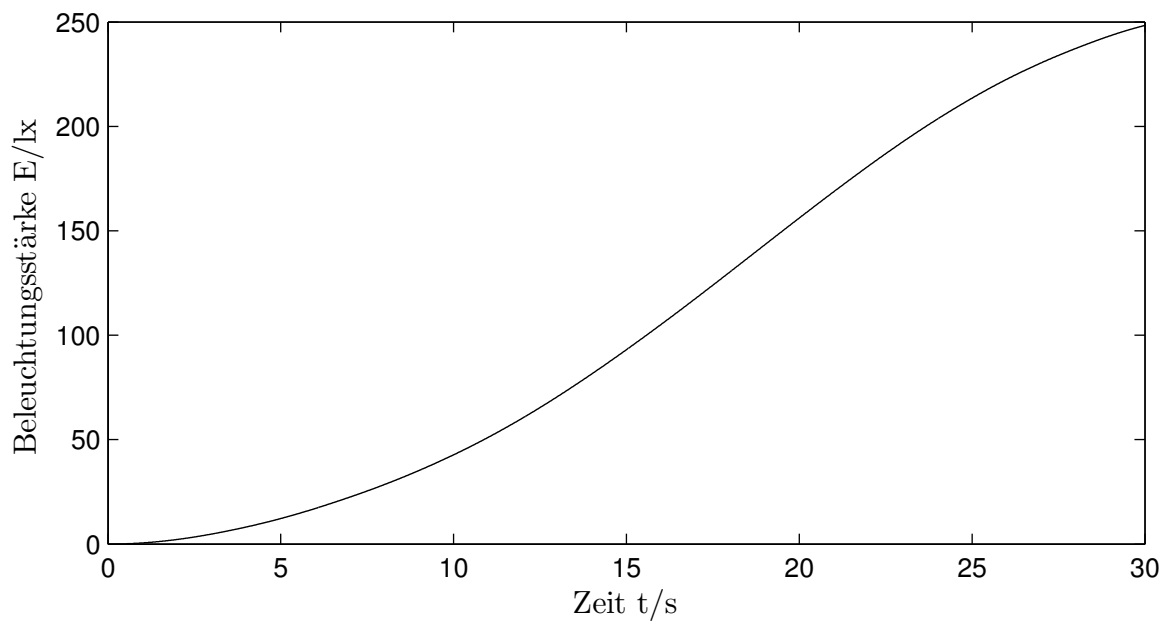


(d) Niveau hinten rechts

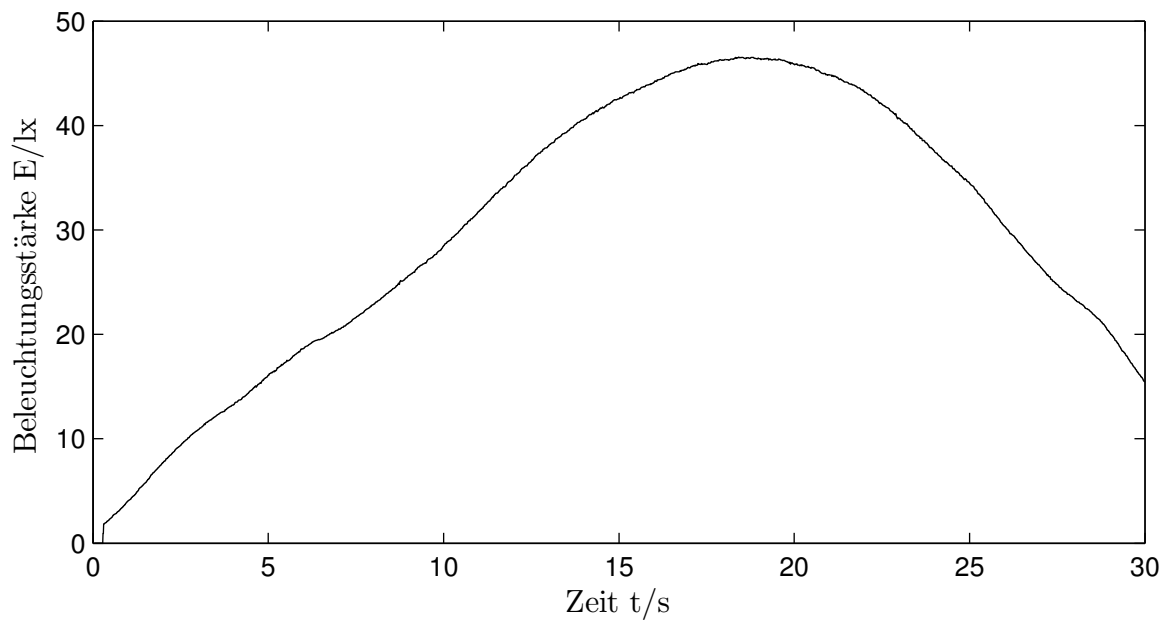
**Abbildung D.4:** Fahrzeugniveau bei der Fahrt über die Regenstrecke



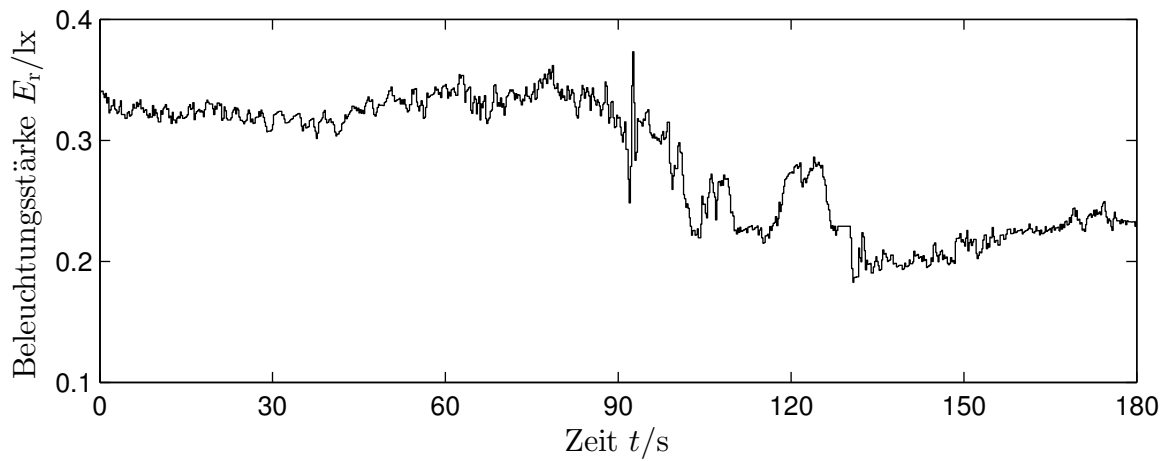
**Abbildung D.5:** Streckenverlauf für die Fahrt auf einer feuchten Fahrbahn. Kartendaten: Google, GeoBasis-DE/BKG [Goo14]



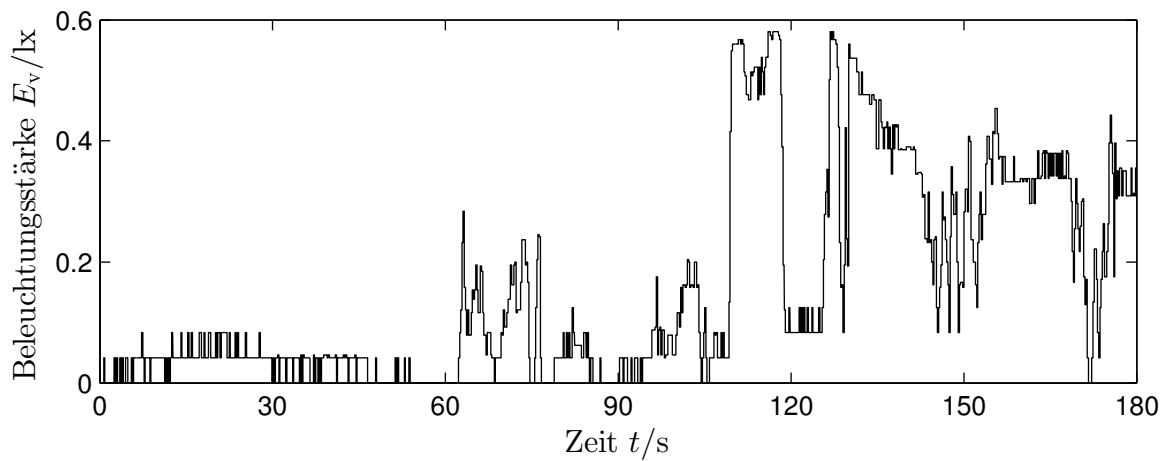
**Abbildung D.6:** Weg-Zeit-Diagramm für die zurückgelegte Strecke auf der feuchten Fahrbahn



**Abbildung D.7:** Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm für die zurückgelegte Strecke auf der feuchten Fahrbahn



(a) Messwerte des Rückwärtsreflexionssensors



(b) Messwerte des Vorwärtsreflexionssensors

**Abbildung D.8:** Verlauf der Beleuchtungsstärke bei der Fahrt über einen Parkplatz mit unterschiedlichen Asphaltarten. Der Wechsel zwischen den beiden Sorten nach circa 100 s ist trotz der geringen Auflösung des Vorwärtsreflexionssensors in beiden Verläufen zu erkennen

---

## E Ergänzungen zu den Probandenstudien

---

### E.1 Ergänzende Dokumente zur statischen Studie

#### Fragebogen: Wahrnehmung einer neuartigen Schlechtwetterlichtverteilung

##### *Einleitung*

Sehr geehrte Probandinnen, sehr geehrte Probanden,

zunächst einmal vielen Dank, dass Sie sich zur Teilnahme an diesem Versuch bereiterklärt haben.

Im Rahmen dieser Studie soll eine Lichtfunktion für Schlechtwettersituationen von Ihnen bewertet werden. Dafür stehen sich zwei Fahrzeuge mit eingeschalteten Scheinwerfern gegenüber, um Begegnungsverkehr zu simulieren. Das eine Fahrzeug kann seine Lichtverteilung ändern, um auf die Witterungsbedingungen zu reagieren. Das andere Fahrzeug hat eine unveränderbare Lichtverteilung. Als Schlechtwettersituation dient eine nasse Straße, wie sie nach einem starken Regenschauer vorliegen kann.

Sie werden nacheinander in beiden Fahrzeugen entweder auf der Fahrer- oder auf der Beifahrerposition Platz nehmen, um die jeweiligen Sichtverhältnisse zu bewerten. Es geht hierbei ganz allein um Ihre subjektive Wahrnehmung. Um die Situation möglichst realitätsnah zu gestalten, stellen Sie bitte die jeweiligen Sitze entsprechend Ihrer Größe ein. Eventuell vorhandene Wassertropfen auf der Windschutzscheibe entfernen Sie durch die Betätigung der Scheibenwischer.

Im folgenden Verlauf werden Sie in drei Durchgängen die Ihnen gezeigten Lichtverteilungen beurteilen. In jedem Durchgang werden drei unterschiedliche Lichtverteilungen für jeweils 10 Sekunden aktiviert. Zwischen den einzelnen Durchgängen wird die Fahrbahn neu bewässert, um möglichst gleichbleibende Bedingungen zu gewährleisten. In dieser Zeit beantworten Sie bitte die Fragen zum vorherigen Durchgang auf der entsprechenden Fragebogenseite. Es kann je nach Fahrzeug und Position vorkommen, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Lichtverteilungen für Sie kaum bis gar nicht wahrnehmbar sind. Lassen Sie sich davon nicht irritieren, auch hierbei handelt es sich (ausdrücklich) um verwertbare Ergebnisse.

Bitte unterhalten Sie sich während des Versuches nicht mit ihrem Partner über den Versuch bzw. ihre Meinung und sprechen Sie auch nach dem Versuch nicht mit Probanden über ihre Einschätzungen, welche den Versuch noch durchlaufen werden.

Bei Fragen können Sie sich jeweils an die anwesenden Versuchsleiter wenden.

## Fragebogen: Wahrnehmung einer neuartigen Schlechtwetterlichtverteilung

Variante 1: Fahrzeug mit adaptivem Lichtsystem

Welche Rolle nehmen Sie in dem Versuch ein?

- Fahrer
- Beifahrer

### Durchgang 1:

Als wie gut empfanden Sie die Straße bei den einzelnen Lichtverteilungen jeweils ausgeleuchtet?

sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut

### Durchgang 2:

Als wie gut empfanden Sie die Straße bei den einzelnen Lichtverteilungen jeweils ausgeleuchtet?

sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut

**Durchgang 3:**

Als wie gut empfanden Sie die Straße bei den unterschiedlichen Lichtverteilungen jeweils ausgeleuchtet?

sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des „entgegenkommenden“ Fahrzeugs auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich

Ist Ihnen ansonsten noch etwas aufgefallen? Wenn ja, beschreiben Sie nachfolgend bitte kurz Ihre Beobachtungen.

.....

.....

.....

.....



**Fragebogen: Wahrnehmung einer neuartigen Schlechtwetterlichtverteilung**

*Variante 2: Fahrzeug mit unveränderbarem Lichtsystem*

Welche Rolle nehmen Sie in dem Versuch ein?

- Fahrer
- Beifahrer

**Durchgang 1:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des „entgegenkommenden“ Fahrzeugs für die einzelnen Lichtverteilungen auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Bitte bewerten Sie die Sichtverhältnisse bei den jeweiligen Lichtverteilungen.

sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut

**Durchgang 2:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des „entgegenkommenden“ Fahrzeugs für die einzelnen Lichtverteilungen auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Bitte bewerten Sie die Sichtverhältnisse bei den jeweiligen Lichtverteilungen.

sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut

**Durchgang 3:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des „entgegenkommenden“ Fahrzeugs für die einzelnen Lichtverteilungen auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Bitte bewerten Sie die Sichtverhältnisse bei den jeweiligen Lichtverteilungen.

sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut

Ist Ihnen ansonsten noch etwas aufgefallen? Wenn ja, beschreiben Sie nachfolgend bitte kurz Ihre Beobachtungen.

.....

.....

.....

.....

## Fragebogen: Wahrnehmung einer neuartigen Schlechtwetterlichtverteilung

### Allgemeine Fragen

Sehr geehrte Probandinnen und Probanden,

vielen Dank für die Teilnahme an der heutigen Untersuchung. Wir möchten Sie bitten, nachfolgend einige Daten zu Ihrer Person anzugeben. Ihre Daten werden selbstverständlich vertraulich behandelt und ausschließlich zur Auswertung dieser Studie verwendet.

Bitte geben Sie ihr Alter an.

Bitte geben Sie ihr Geschlecht an.

- männlich  
 weiblich

Tragen Sie eine Sehhilfe?

- ja:       Brille /  Kontaktlinsen  
 nein

Wie viele Kilometer fahren Sie durchschnittlich pro Jahr?

Wie viele davon fahren Sie bei Dunkelheit?

*Bitte bewerten Sie folgende Aussagen.*

Bei widrigen Bedingungen fühle ich mich häufig von entgegenkommenden Fahrzeugen geblendet.

Stimme gar nicht zu      Stimme vollkommen zu

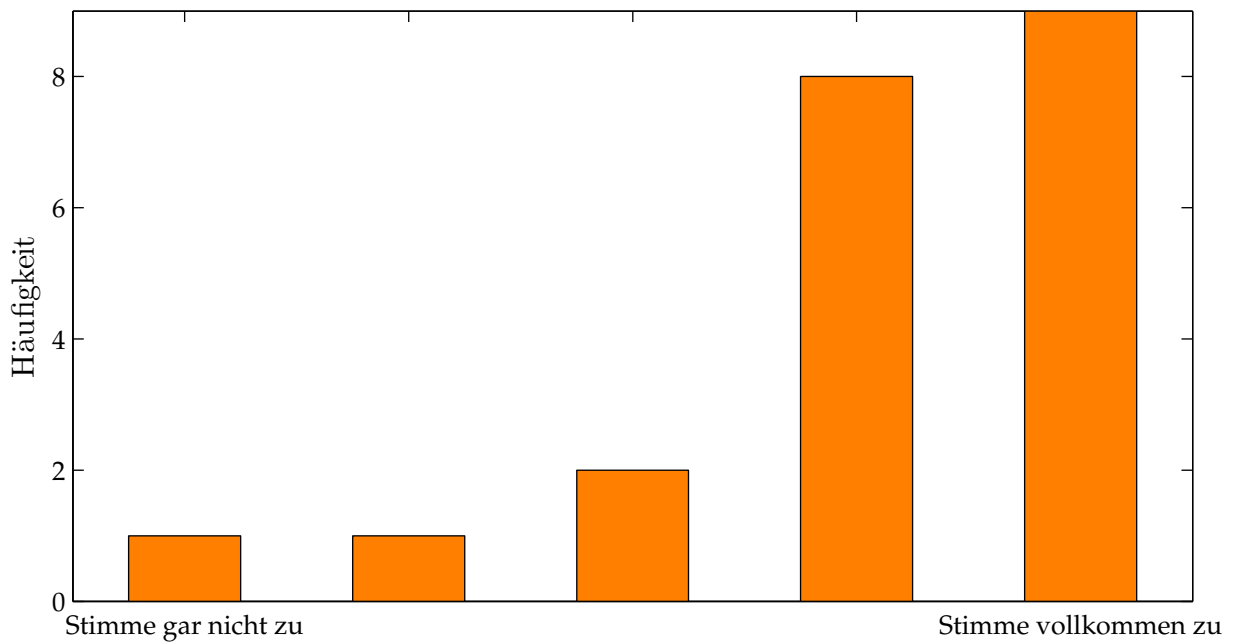
Es ist mir wichtig, andere Fahrer bei widrigen Wetterbedingungen nicht zu blenden.

Stimme gar nicht zu      Stimme vollkommen zu

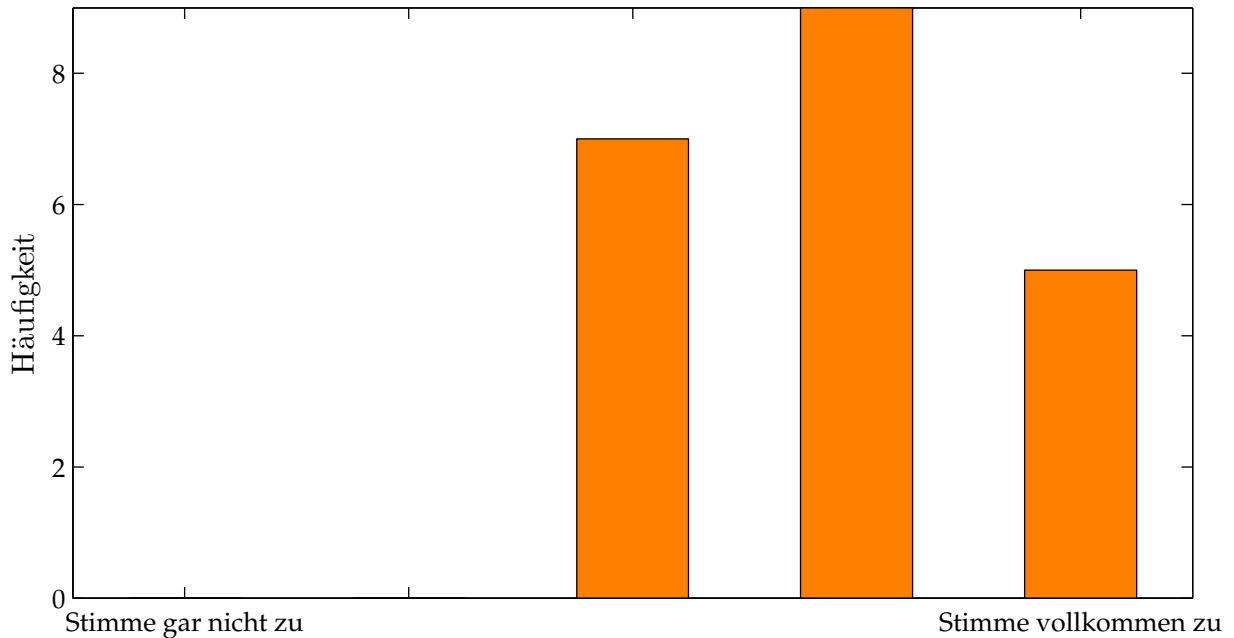
Ich würde mir ein solches System als Sonderzubehör kaufen, wenn es mein Budget erlaubt.

Stimme gar nicht zu      Stimme vollkommen zu

## E.2 Histogramme zur statischen Probandenstudie



**Abbildung E.1:** Histogramm zur Bewertung der Aussage „Es ist mir wichtig, andere Fahrer bei widrigen Wetterbedingungen nicht zu blenden“



**Abbildung E.2:** Histogramm zur Bewertung der Aussage „Ich würde mir ein solches System als Sonderzubehör kaufen, wenn es mein Budget erlaubt“

## E.3 Ergänzende Dokumente zur dynamischen Studie

### Fragebogen: Wahrnehmung einer neuartigen Schlechtwetterlichtverteilung

#### *Instruktion für das stehende Fahrzeug*

Vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben, an diesem Versuch teilzunehmen. Zunächst möchte ich Ihnen einige Informationen zum Ablauf geben.

In der folgenden Untersuchung geht es darum, wie stark die Scheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeugs bei nasser Straße blenden und ob sich dies durch geeignete technische Maßnahmen reduzieren lässt.

Um dies zu untersuchen, werden Sie in diesem stehenden Fahrzeug bleiben, während Ihnen ein anderes Versuchsfahrzeug mehrfach auf regennasser Strecke entgegenkommt. Gucken Sie dabei nicht direkt in die Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeugs, sondern halten Sie den Blick geradeaus gerichtet, als würden Sie selbst fahren. Der Fahrer des entgegenkommenden Fahrzeugs wird erst ein bis zwei Runden drehen, um sich mit dessen Bedienung vertraut zu machen. Anschließend finden insgesamt vier Versuchsdurchgänge statt.

Nach jedem dieser Versuchsdurchgänge bewerten Sie auf einem Fragebogen, wie stark Sie sich geblendet gefühlt und als wie gut ausgeleuchtet Sie die Straße empfunden haben. Auch Anmerkungen, Kommentare und Auffälligkeiten interessieren uns. Ich kündige jeweils an, wenn ein zu bewertender Versuchsdurchgang beginnt. Vor dem ersten und dem dritten Durchgang wird die Strecke jeweils kurz beregnet, damit die Bedingungen für alle Probanden gleich sind.

Haben Sie noch Fragen oder Anmerkungen zum Ablauf?

## Fragebogen: Wahrnehmung einer neuartigen Schlechtwetterlichtverteilung

### *Instruktion für den fahrenden Versuchsträger*

Vielen Dank, dass Sie sich bereit erklärt haben, an diesem Versuch teilzunehmen. Zunächst möchte ich Ihnen einige Informationen zum weiteren Ablauf geben.

In der folgenden Untersuchung geht es darum, wie stark die Scheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeugs bei nasser Straße blenden und ob sich dies durch geeignete technische Maßnahmen reduzieren lässt.

Um dies zu untersuchen, werden Sie mit unserem Versuchsfahrzeug viermal eine kurze regennasse Strecke fahren, an deren Ende ein Fahrzeug mit eingeschalteten Scheinwerfern steht. Auf ein Signal von mir fahren Sie los. Nach dem Passieren des Fahrzeugs halten Sie bitte und kreuzen auf einem Fragebogen an, wie stark Sie die Blendung empfunden haben. Anschließend fahren Sie einen Rundkurs, das heißt auf der anderen Seite zurück. An der Startposition halten Sie erneut, warten auf mein Signal und führen dann den vorausgegangenen Ablauf ein weiteres Mal durch. Insgesamt gibt es vier dieser Durchgänge. Vor dem ersten und dem dritten Durchgang wird die Strecke jeweils kurz beregnet, damit die Bedingungen für alle Probanden gleich sind.

Während Sie sich dem anderen Fahrzeug nähern, **fahren Sie bitte gleichmäßig und langsam in einer Geschwindigkeit, die Ihnen angenehm erscheint und bei der Sie sich sicher fühlen**. Achten Sie dabei bitte auf die Stärke der Blendung durch das andere Fahrzeug.

Das Fahrzeug hat eine Automatikschaltung mit einem Schalterhebel in Form eines Lenkstockhebels am Lenkrad. Die Bedienung werde ich Ihnen gleich zeigen. Wir fahren zunächst eine Runde, damit Sie sich an das Fahrzeug gewöhnen und halten dann an dieser Stelle wieder an. Wenn Sie, um sich an das Fahrzeug zu gewöhnen, weitere Runden fahren möchten, ist das kein Problem. Bitte stellen Sie zunächst die Spiegel und den Sitz nach Ihren Bedürfnissen ein.

Haben Sie weitere Fragen oder Anmerkungen zum Ablauf?

**Fragebogen: Wahrnehmung einer neuartigen Schlechtwetterlichtverteilung**

*Variante A: Stehendes Fahrzeug*

**Durchgang 1:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeugs auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich

Als wie gut empfanden Sie die Straße ausgeleuchtet?

sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
---------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------

Ist Ihnen ansonsten noch etwas aufgefallen? Wenn ja, beschreiben Sie nachfolgend bitte kurz Ihre Beobachtungen.

.....

.....

**Durchgang 2:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeugs auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich

Als wie gut empfanden Sie die Straße ausgeleuchtet?

sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
---------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------

Ist Ihnen ansonsten noch etwas aufgefallen? Wenn ja, beschreiben Sie nachfolgend bitte kurz Ihre Beobachtungen.

.....

.....

**Durchgang 3:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeugs auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich

Als wie gut empfanden Sie die Straße ausgeleuchtet?

sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
---------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------

Ist Ihnen ansonsten noch etwas aufgefallen? Wenn ja, beschreiben Sie nachfolgend bitte kurz Ihre Beobachtungen.

.....

.....

**Durchgang 4:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des entgegenkommenden Fahrzeugs auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich

Als wie gut empfanden Sie die Straße ausgeleuchtet?

sehr schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr gut
---------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------

Ist Ihnen ansonsten noch etwas aufgefallen? Wenn ja, beschreiben Sie nachfolgend bitte kurz Ihre Beobachtungen.

.....

.....

**Fahrzeugwechsel**



**Fragebogen: Wahrnehmung einer neuartigen Schlechtwetterlichtverteilung**

*Variante B: Fahrendes Fahrzeug*

**Durchgang 1:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des „entgegenkommenden“ Fahrzeugs auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich

Ist Ihnen ansonsten noch etwas aufgefallen? Wenn ja, beschreiben Sie nachfolgend bitte kurz Ihre Beobachtungen.

.....  
 .....

**Durchgang 2:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des „entgegenkommenden“ Fahrzeugs auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich

Ist Ihnen ansonsten noch etwas aufgefallen? Wenn ja, beschreiben Sie nachfolgend bitte kurz Ihre Beobachtungen.

.....  
 .....

**Durchgang 3:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des „entgegenkommenden“ Fahrzeugs auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich

Ist Ihnen ansonsten noch etwas aufgefallen? Wenn ja, beschreiben Sie nachfolgend bitte kurz Ihre Beobachtungen.

.....  
 .....

**Durchgang 4:**

Bitte bewerten Sie die Stärke der Blendung durch die Scheinwerfer des „entgegenkommenden“ Fahrzeugs auf einer Skala von 1 (kaum merklich) bis 9 (unerträglich).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
kaum merklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unerträglich

Ist Ihnen ansonsten noch etwas aufgefallen? Wenn ja, beschreiben Sie nachfolgend bitte kurz Ihre Beobachtungen.

.....  
 .....

## Fragebogen: Wahrnehmung einer neuartigen Schlechtwetterlichtverteilung

### Allgemeine Fragen

*Sehr geehrte Probandinnen und Probanden,*

*vielen Dank für die Teilnahme an der heutigen Untersuchung. Wir möchten Sie bitten, nachfolgend einige Daten zu Ihrer Person anzugeben. Ihre Daten werden selbstverständlich vertraulich behandelt und ausschließlich zur Auswertung dieser Studie verwendet.*

Bitte geben Sie ihr Alter an.

Bitte geben Sie ihr Geschlecht an.

- männlich  
 weiblich

Tragen Sie eine Sehhilfe?

- ja:       Brille /  Kontaktlinsen  
 nein

Wie viele Kilometer fahren Sie durchschnittlich pro Jahr?

Wie viele davon fahren Sie bei Dunkelheit?

*Bitte bewerten Sie folgende Aussagen.*

Bei widrigen Bedingungen fühle ich mich häufig von entgegenkommenden Fahrzeugen geblendet.

Stimme gar nicht zu      Stimme vollkommen zu

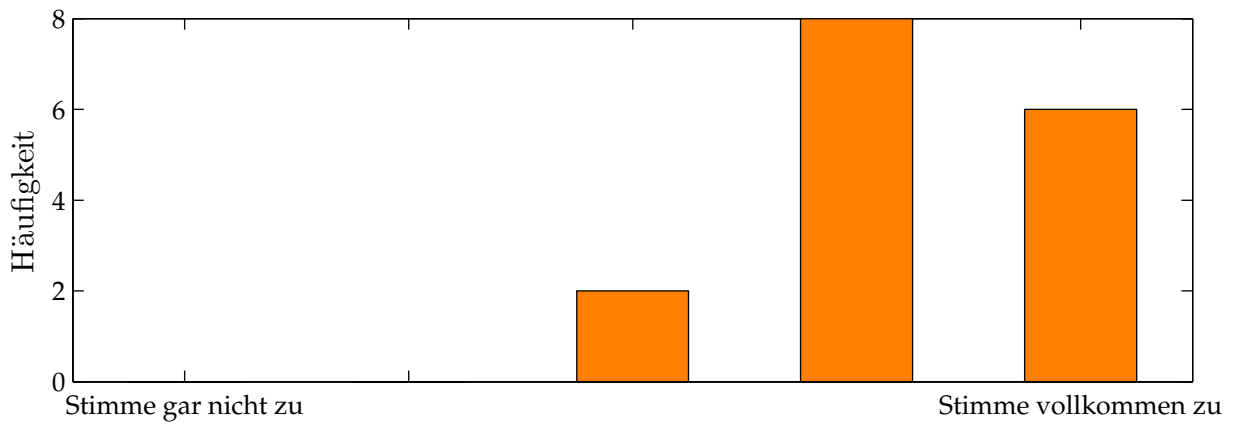
Es ist mir wichtig, andere Fahrer bei widrigen Wetterbedingungen nicht zu blenden.

Stimme gar nicht zu      Stimme vollkommen zu

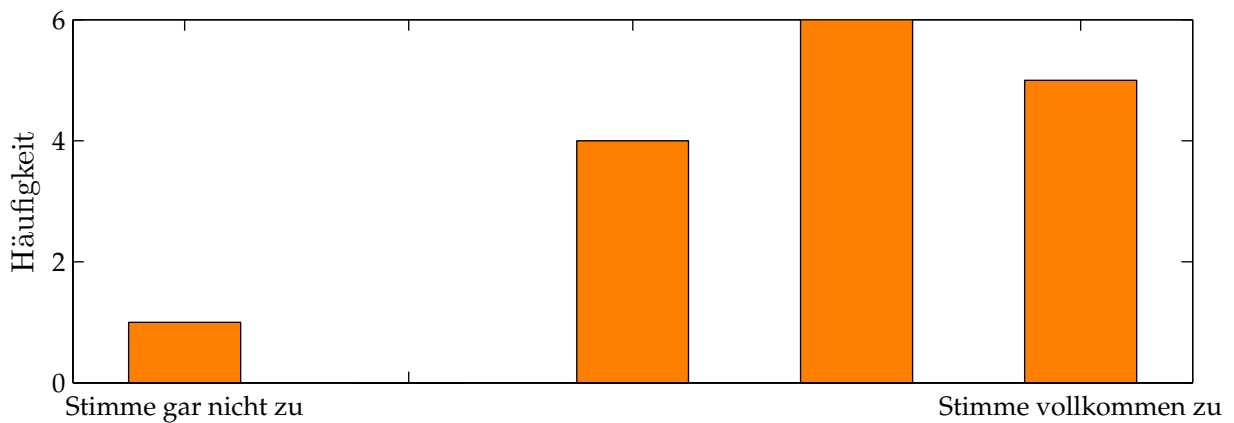
Ich würde mir ein solches System als Sonderzubehör kaufen, wenn es mein Budget erlaubt.

Stimme gar nicht zu      Stimme vollkommen zu

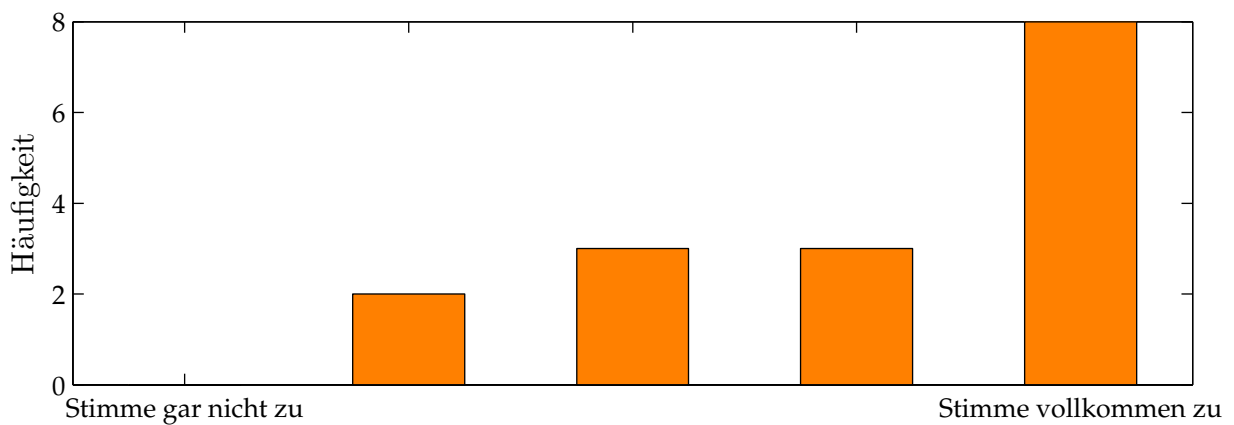
## E.4 Histogramme zur dynamischen Probandenstudie



**Abbildung E.3:** Histogramm zur Bewertung der Aussage „Bei widrigen Bedingungen fühle ich mich häufig von entgegenkommenden Fahrzeugen geblendet“



**Abbildung E.4:** Histogramm zur Bewertung der Aussage „Es ist mir wichtig, andere Fahrer bei widrigen Wetterbedingungen nicht zu blenden“



**Abbildung E.5:** Histogramm zur Bewertung der Aussage „Ich würde mir ein solches System als Sonderzubehör kaufen, wenn es mein Budget erlaubt“

---

# Lebenslauf

---

## **Persönliche Daten**

Geburtsdatum	17.09.1985
Geburtsort	Lüneburg
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	deutsch

## **Berufserfahrung**

seit 11/2014	Lead Electronic Engineer, HELLA KGaA Hueck & Co., Lippstadt
11/2011 – 10/2014	Doktorand, HELLA KGaA Hueck & Co., L-LAB, Lippstadt
10/2010 – 05/2011	Praktikant/Diplomand, Daimler AG, Hamburg-Harburg
05/2006 – 08/2006	Praktikant, Alfred Kuhse GmbH, Winsen/Luhe

## **Akademische Ausbildung**

10/2009 – 06/2011	Diplomstudium, Technische Universität Hamburg-Harburg, Studiengang Mechatronik
10/2006 – 10/2009	Bachelorstudium, Technische Universität Hamburg-Harburg, Studiengang Allgemeine Ingenieurwissenschaften, Vertiefungsrichtung Mechatronik

## **Zivildienst**

08/2005 – 05/2006	Paritätischer Wohlfahrtsverband, Winsen/Luhe
-------------------	--

## **Schulausbildung**

08/1998 – 06/2005	Gymnasium Winsen/Luhe
-------------------	-----------------------